



SCUOLA DI DOTTORATO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI “MEDITERRANEA” DI REGGIO CALABRIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, DELL’ENERGIA, DELL’AMBIENTE E DEI MATERIALI
DICEAM

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E DELLA SICUREZZA

CURRICULUM
INGEGNERIA IDRAULICA,
COSTRUZIONI IDRAULICHE E MARITTIME,
IDROLOGIA E ENERGIA DALLE ACQUE

XXXIII CICLO

**ANALISI DELLE CONDIZIONI CHE GENERANO
CONTEMPORANEITÀ DI EVENTI ALLUVIONALI E
MAREGGIATE IN CALABRIA**

DOTTORANDO:
CATERINA CANALE



TUTOR:
PROF. ING. GIUSEPPE BARBARO



COORDINATORE:
PROF. ING. FELICE ARENA



CATERINA CANALE

**ANALISI DELLE CONDIZIONI CHE GENERANO
CONTEMPORANEITÀ DI EVENTI ALLUVIONALI E
MAREGGIATE IN CALABRIA**

SOMMARIO

INTRODUZIONE	13
CAPITOLO I.....	19
Inquadramento geomorfologico e climatico della Calabria	19
1.1 Collocazione geografica e peculiarità territoriali	19
1.2 Caratteristiche geologiche e pedologiche.....	21
1.3 Caratteristiche geomorfologiche fluviali.....	24
1.4 Caratteristiche geomorfologiche delle aree costiere.....	26
1.5 Caratteristiche climatiche.....	29
CAPITOLO II.....	33
Contemporaneità di alluvioni e mareggiate in Calabria: principali eventi.....	33
2.1 Ottobre 1996 - Crotona	33
2.2 Novembre 2010 - Gioia Tauro (RC)	35
2.3 Novembre 2013 – Catanzaro.....	36
2.4 Ottobre / Novembre 2015 – Bruzzano Zeffirio (RC).....	38
2.5 Novembre 2020 - Crotona.....	41
CAPITOLO III	45
Metodologia di analisi.....	45
3.1 Database ASICal	45
3.2 Database dei dati meteomarini e atmosferici	47
3.3 Analisi dei dati meteomarini e studio delle mareggiate	51
3.4 Database dei dati pluviometrici.....	54
3.5 I parametri meteo-climatici	56
CAPITOLO IV	65
Analisi delle Componenti Principali (PCA) e modello della Regressione Lineare Multivariata (RLM)	65
4.1 Analisi statistica dei dati	65
4.2 Indici statistici	66
4.3 Analisi statistica multivariata	70
4.4 Analisi delle Componenti Principali (PCA).....	72
4.5 Regressione lineare multivariata (RLM).....	77
4.6 L'uso delle componenti principali nell'ambito della regressione lineare multivariata	81
CAPITOLO V	83

Caso studio: la Calabria.....	83
5.1 Individuazione degli eventi alluvionali	83
5.2 Individuazione delle mareggiate e accertamento della contemporaneità degli eventi	89
5.3 Analisi quantitativa degli eventi concomitanti	99
5.4 Determinazione delle componenti principali	104
5.5 Il modello della regressione lineare multipla applicato alle componenti principali..	116
DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI.....	133
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	137

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1 Foto NASA – Inquadramento geografico della Calabria.....	19
Fig. 1.2 Inquadramento altimetrico della Calabria.....	20
Fig. 1.3 Inquadramento territoriale della Calabria.	20
Fig. 1.4 Classificazione delle tipologie di suoli della Calabria (Soil Region e Province Pedologiche) - ARSSA.	22
Fig. 1.5 Carta del rischio di erosione della Regione Calabria (Metodo RUSLE) - ARSSA.	23
Fig. 1.6 Fiumara dell’Amendolea (RC).	24
Fig. 1.7 La Fiumara dell’Amendolea (RC) in piena.....	25
Fig. 1.8 La Fiumara Valanidi (RC).	25
Fig. 1.9 Suddivisione costiera della Calabria.	26
Fig. 1.10 Morfotipi della Calabria.....	26
Fig. 1.11 Costa articolata di Scalea (CS)- Riviera dei Cedri.....	27
Fig. 1.12 Costa di piana di conoide ad Africo (RC)- Riviera dei Gelsomini.	27
Fig. 1.13 Carta dell’erosione costiera.....	28
Fig. 1.14 Centri d’azione anticiclonici e ciclonici nel Mediterraneo.	29
Fig. 1.15 (a) Distribuzione delle precipitazioni medie annue; (b) Distribuzione del numero medio di giorni piovosi annui.	30
Fig. 1.16 Rosa dei venti- Direzione predominante dei venti che soffiano sui litorali della Calabria.	31
Fig. 2.1 Esondazione del Fiume Esaro durante l’evento di Ottobre 1996 a Crotona.	33
Fig. 2.2 Crollo del cavalcavia all’ingresso della città.	34
Fig. 2.3 Danni provocati dall’evento concomitante dell’Ottobre 1996 nella città di Crotona. ...	34
Fig. 2.4 Danni provocati dall’evento verificatosi a Novembre 2010 a Gioia Tauro.	35
Fig. 2.5 Allagamenti e danni alle infrastrutture per l’esondazione delle fiumare nel Novembre 2013.....	36
Fig. 2.6 Mareggiata del 19 Novembre 2013.....	37
Fig. 2.7 Mareggiata del 19 Novembre 2013; il mare impatta contro il muro paraonde.	37
Fig. 2.8 Livelli di allerta emanati dal Centro Funzionale Multirischi per l’evento di Ottobre-Novembre 2015.	38
Fig. 2.9 Perturbazione atmosferica del 30 Ottobre 2015 (a) e del 31 Ottobre 2015 (b) sulle coste ioniche della Calabria.....	39
Fig. 2.10 (a) L’esondazione della Fiumara Bruzzano ha distrutto parte della Strada Statale 106. (b) Crollo della SS 106 a seguito dello straripamento e della mareggiata concomitante. (c) La rete ferroviaria è stata danneggiata e i binari sono rimasti sospesi. (d) L’evento ha causato il crollo del ponte di collegamento fra le frazioni di Bruzzano Zeffirio.....	40

Fig. 2.11 Arpacal - Mappa delle precipitazioni cumulate durante tutto l'evento.	41
Fig. 2.12 Convergenza dei venti di Grecale e di Scirocco verso il centro di bassa pressione.	42
Fig. 2.13 Allagamenti e dissesti a Crotona nel Novembre 2020.	42
Fig. 2.14 Inondazioni costiere dovute alle piogge intense e alle mareggiate.	43
Fig. 3.1 Esondazione del fiume Crati avvenuta a Cosenza nel 1959.	46
Fig. 3.2 Alluvione del dicembre 1972 a Reggio Calabria.	46
Fig. 3.3 Mappatura rappresentativa di una parte del Mediterraneo.	47
Fig. 3.4 Mappatura della Calabria.	50
Fig. 3.5 Elevazione d'onda nel tempo.	51
Fig. 3.6 Mareggiate distinte (a); mareggiata unica (b); mareggiata unica con due picchi (c).	52
Fig. 3.7 Confronto tra la mareggiata triangolare equivalente e la mareggiata vera.	53
Fig. 3.8 Stazioni di monitoraggio gestite dal Centro Funzionale Multirischi dell'Arpacal.	54
Fig. 3.9 Pluviometri scelti per lo studio degli eventi alluvionali principali.	55
Fig. 3.10 Variazione della temperatura dell'aria con l'altitudine.	57
Fig. 3.11 Struttura di un ciclone e di un anticiclone.	59
Fig. 3.12 Principali configurazioni bariche: a) sella; b) promontorio.	59
Fig. 3.13 Spostamenti delle masse d'aria tra le zone anticicloniche e cicloniche.	60
Fig. 3.14 Cella convettiva. Circolazione delle masse d'aria.	60
Fig. 3.15 Deviazione di Coriolis sui venti che soffiano a diverse latitudini.	61
Fig. 3.16 Variazioni dell'umidità relativa con la latitudine.	62
Fig. 3.17 Andamento diurno dell'umidità relativa in funzione della temperatura.	63
Fig. 4.1 Esempi di coppie di punti e relativi coefficienti di correlazione.	69
Fig. 4.2 Esempio di rappresentazione 3D scatter-plot.	70
Fig. 4.3 Esempio di rappresentazione dei dati con diagramma a scatola a baffi.	71
Fig. 4.4 Esempio di rappresentazione dei dati con diagramma di Kiviat.	71
Fig. 4.5 Esempio di grafico "Screen Plot" per la determinazione del numero di componenti.	75
Fig. 4.6 Rappresentazione delle componenti principali per 4 variabili di riferimento.	76
Fig. 4.7 Rappresentazione della distribuzione della varianza.	76
Fig. 4.8 Distribuzione dei residui rispetto a y_i	80
Fig. 4.9 Violazione dell'ipotesi di linearità del modello. Diagramma di dispersione dei residui rispetto la variabile esplicativa.	80
Fig. 5.1 Varianza delle componenti principali e "Screen Plot" – (a) Fascia ionica, 1 ^a analisi; (b) Fascia ionica, 2 ^a analisi.	114

Fig. 5.2 Varianza delle componenti principali e “Screen Plot” – (a)Fascia tirrenica, 1 ^a analisi; (b)Fascia tirrenica, 2 ^a analisi	115
Fig. 5.3 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 1 ^a CP	120
Fig. 5.4 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 2 ^a CP	120
Fig. 5.5 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 1 ^a CP	124
Fig. 5.6 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 2 ^a CP	124
Fig. 5.7 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 3 ^a CP	124
Fig. 5.8 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 1 ^a CP	127
Fig. 5.9 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 2 ^a CP	127
Fig. 5.10 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 1 ^a CP	130
Fig. 5.11 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 2 ^a CP	130

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 3.1 Punti della maglia scelti per i comuni costieri calabresi.	49
Tab. 5.1 Eventi alluvionali ripartiti per province e per città metropolitana	83
Tab. 5.2 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della provincia di Cosenza	84
Tab. 5.3 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri di Crotona.	85
Tab. 5.4 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia ionica di Catanzaro.	85
Tab. 5.5 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia tirrenica di Catanzaro.	86
Tab. 5.6 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia tirrenica di Reggio Calabria.	86
Tab. 5.7 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia ionica di Reggio Calabria.	87
Tab. 5.8 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della provincia di Vibo Valentia.	88
Tab. 5.9 Valori di h_{crit} per le località tirreniche.	89
Tab. 5.10 Valori di h_{crit} per le località ioniche.	90
Tab. 5.11 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia ionica della provincia di Cosenza.	91
Tab. 5.12 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia tirrenica della provincia di Cosenza. ..	92
Tab. 5.13 Eventi concomitanti registrati nella provincia di Crotona.	93
Tab. 5.14 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia tirrenica della provincia di Catanzaro. 93	
Tab. 5.15 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia ionica della provincia di Catanzaro. ...	94
Tab. 5.16 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia ionica della città metropolitana di Reggio Calabria.	95

Tab. 5.17 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia tirrenica della città metropolitana di Reggio Calabria.....	96
Tab. 5.18 Eventi concomitanti registrati in provincia di Vibo Valentia.	96
Tab. 5.19 Eventi concomitanti complessivi registrati in Calabria.....	97
Tab. 5.20 Eventi concomitanti complessivi registrati in Calabria, suddivisi per fasce costiere.	97
Tab. 5.21 Stazioni di monitoraggio scelte per l'analisi pluviometrica degli eventi.	99
Tab. 5.22 Intensità di pioggia, altezze significative massime e parametri meteorologici degli eventi concomitanti nella fascia ionica.	102
Tab. 5.23 Intensità di pioggia, altezze significative massime e parametri meteorologici degli eventi concomitanti nella fascia tirrenica.....	103
Tab. 5.24 Matrice dei coefficienti- Fascia ionica, 1 ^a analisi.....	104
Tab. 5.25 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia ionica, 1 ^a analisi.	106
Tab. 5.26 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia ionica, 1 ^a analisi.....	107
Tab. 5.27 Matrice dei coefficienti- Fascia ionica, 2 ^a analisi.	107
Tab. 5.28 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia ionica, 2 ^a analisi.	109
Tab. 5.29 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia ionica, 2 ^a analisi.....	110
Tab. 5.30 Matrice dei coefficienti- Fascia tirrenica, 1 ^a analisi.	110
Tab. 5.31 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia tirrenica, 1 ^a analisi.	111
Tab. 5.32 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia tirrenica, 1 ^a analisi.	112
Tab. 5.33 Matrice dei coefficienti- Fascia tirrenica, 2 ^a analisi.	112
Tab. 5.34 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia tirrenica, 2 ^a analisi.	113
Tab. 5.35 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia tirrenica, 2 ^a analisi.	114
Tab. 5.36 Studio delle intensità di pioggia: variabili dipendente (y) e indipendenti (x ₁ , x ₂) per la stima del modello di regressione.....	118
Tab. 5.37 Studio delle intensità di pioggia: statistica della regressione e significatività del modello.....	119
Tab. 5.38 Studio delle intensità di pioggia: stima dei coefficienti regressori	119
Tab. 5.39 Studio delle altezze significative massime: variabili dipendente (y) e indipendenti (x ₁ , x ₂ , x ₃) per la stima del modello di regressione.....	122
Tab. 5.40 Studio delle altezze significative massime: statistica della regressione e significatività del modello.....	123

Tab. 5.41 Studio delle altezze significative massime: stima dei coefficienti regressori	123
Tab.5.42 Studio delle intensità di pioggia: variabili dipendente (y) e indipendenti (x_1 , x_2) per la stima del modello di regressione.....	125
Tab. 5.43 Studio delle intensità di pioggia: statistica della regressione e significatività del modello.....	126
Tab. 5.44 Studio delle intensità di pioggia: stima dei coefficienti regressori	126
Tab.5.45 Studio delle altezze di pioggia: variabili dipendente (y) e indipendenti (x_1 , x_2) per la stima del modello di regressione.....	128
Tab.5.46 Studio delle altezze significative massime: statistica della regressione e significatività del modello.....	129
Tab.5.47 Studio delle intensità di pioggia: stima dei coefficienti regressori	129

INTRODUZIONE

INTRODUZIONE

L'antropizzazione dell'ambiente e l'urbanizzazione invasiva sono cause di un'aggressiva mutazione dello scenario ambientale e di un processo irreversibile di consumo del suolo. La vulnerabilità dei territori è legata alle caratteristiche geomorfologiche e all'esposizione geografica ma è anche accresciuta dall'azione diretta ed indiretta dell'uomo sulla natura (ADDO, 2013; PHILLIPS & JONES, 2006). Si assiste ad un lento e graduale cambiamento climatico che incide sulla circolazione dell'aria nell'atmosfera e sull'innalzamento delle temperature. Se da un lato si sta verificando una desertificazione dovuta ad eventi di siccità sempre più frequenti, dall'altro si registrano fenomeni pluviometrici molto intensi a carattere alluvionale. Il cambiamento incide principalmente sulle coste provocando eventi estremi e l'innalzamento del livello del mare, con conseguenti inondazioni ed erosioni (BREIL ET ALII, 2007; LIONELLO ET ALII, 2010). La frequenza con la quale si manifestano tali eventi aumenta i rischi per l'uomo e per l'ambiente. In particolare, il problema è accentuato nelle zone costiere, per l'elevata densità abitativa. Secondo i dati forniti dall'ISTAT (Istituto nazionale di Statistica), i 646 comuni costieri italiani sono occupati stabilmente dal 30% della popolazione. Lo sviluppo di insediamenti urbani, economici e produttivi lungo i litorali ha comportato la cementificazione dei territori. Gli effetti immediati sono stati l'impermeabilizzazione e l'alterazione della conformazione naturale delle linee di riva. In presenza di eventi estremi come alluvioni e mareggiate la risposta del territorio è debole. Si accentua la vulnerabilità e si attivano processi geomorfologici di degradazione del suolo (HUONG & PATHIRANA, 2013; STOCKER ET ALII, 2013). L'esposizione della popolazione al rischio di inondazioni è tale da risultare necessaria la partecipazione attiva a difesa delle città e dei suoi abitanti con interventi strutturali e non strutturali.

In ambito normativo, la cosiddetta "Direttiva alluvioni"¹, promuove un approccio unico per la gestione e la valutazione del rischio, attraverso la mappatura delle aree soggette ad inondazioni (montane e costiere). La Direttiva propone la dotazione di un piano di coordinazione delle attività, in grado di fronteggiare il rischio di alluvione. L'ordinamento italiano ha recepito e attuato tale

¹ Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 Ottobre 2007 relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione.

direttiva con il Decreto Legislativo n.49/2010², tenendo conto della normativa nazionale vigente³. Si disciplinano tutte le attività volte a tutelare la salvaguardia della vita umana, dell'ambiente e del patrimonio. In merito alla gestione delle coste sono proposte delle raccomandazioni circa lo sviluppo sostenibile delle attività socio-economiche, mettendo in atto la Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC) (CANTASANO, 2013). I principi fondanti il sistema di gestione sono stati racchiusi nelle Raccomandazioni previste dall'Unione Europea. L'approccio prevede un cambiamento nella progettazione delle opere di difesa, garantendo il controllo dei processi di erosione senza alterare l'equilibrio ambientale.

L'attenzione degli studiosi sulle azioni da adottare a salvaguardia e tutela dell'uomo e dell'ambiente è molto alta. In letteratura sono ampiamente trattate le tematiche riguardanti gli eventi alluvionali e le inondazioni marine.

Si affronta il problema degli allagamenti in ambito cittadino, con particolare interesse all'individuazione di modelli matematici in grado di ipotizzare il percorso seguito dall'acqua (SANDERS, 2020). Lo studio del flusso in area urbana è riconducibile ad un problema bidimensionale (PRESTININZI & FIORI, 2006). Suddividendo il bacino in comparti omogenei ed interconnessi, l'analisi può essere condotta riferendosi ad un modello idraulico-idrologico pseudo-3D (MASCARENHAS ET ALII, 2002; SCIONTI ET ALII, 2018). I disagi per le città possono essere notevoli se, in presenza di piccoli bacini idrografici, si verificano alluvioni di breve durata ed elevata intensità (*flash floods*). La ripidità con la quale si manifestano pregiudica la funzionalità dei sistemi di smaltimento delle acque (DE FRANCO ET ALII, 2019).

Per quanto concerne il fronte costiero, la letteratura scientifica si interessa delle dinamiche dei litorali (BARBARO ET ALII, 2017; BORRELLO ET ALII, 2017). Molti studi si concentrano sulla variabilità della morfologia delle coste, causata dal trasporto dei sedimenti (NATESAN ET ALII, 2015; PRUMM & IGLESIAS, 2016). In presenza di alluvioni e piogge intense si registra una considerevole portata di materiale solido (WALLING, 2006; ZEMA ET ALII, 2014; YANG ET ALII, 2015, FORTUGNO ET ALII, 2017). In prossimità della foce del fiume, infatti, la variabilità della linea di costa è molto evidente (MAITI & BHATTACHARYA, 2009; TOMASICCHIO ET ALII, 2015; SICILIA ET ALII, 2020). L'apporto dei sedimenti, che determina l'avanzamento dei litorali, è contrapposto al fenomeno dell'erosione. L'impatto del moto ondoso produce effetti disastrosi per l'uomo e per

² Decreto Legislativo n.49/2010 – Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.

³ Decreto Legislativo n.152/2006 – Norme in materia ambientale
DPCM n.170/2008 - Regolamento recante disciplina attuativa dell'analisi dell'impatto della regolamentazione (AIR), ai sensi dell'articolo 14, comma 5, della legge 28 novembre 2005, n. 246.

l'ambiente. Le opere di protezione molto spesso sono insufficienti a contrastare l'azione violenta delle onde (*BARBARO ET ALII, 2014*). Si manifestano fenomeni come il run-up e l'overtopping, con conseguenti inondazioni e danni alla popolazione e alle infrastrutture (*KOMAR, 2000; ARENA ET ALII, 2013*). Per contrastare e limitare il processo di erosione è necessario conoscere l'azione del moto ondoso e l'interazione con le coste (*WILLIAMS ET ALII, 2018*). La frequenza con la quale si manifestano le mareggiate influisce pesantemente sul processo di erosione delle coste (*BOCCOTTI ET ALII, 2011*), mettendo in crisi le strutture poste in prossimità della riva del mare.

Quando alluvioni e mareggiate si manifestano separatamente, il grado di allerta è molto alto e gli effetti incidono pesantemente sulla vulnerabilità del territorio. Ma se gli eventi si presentano in contemporanea, il grado di allerta è massimo. La furia dell'acqua che scende verso valle si scontra con la risalita delle onde sulla costa. Gli aspetti più critici e devastanti si osservano in presenza di eventi simultanei. L'ordinarietà diventa eccezionalità nella contemporaneità. La necessità di conoscere i pericoli a cui il territorio e l'uomo sono esposti, ha portato alla compilazione di un database (*HANZE - Historical Analysis of Natural Hazards in Europe*), in cui sono presenti informazioni riguardanti le inondazioni che hanno interessato i paesi europei dal 1870 al 2016. All'interno sono contenuti 1564 eventi di flash-floods, inondazioni fluviali e costiere. È possibile avere contezza circa le date, i luoghi, il numero di deceduti e la stima delle perdite economiche per effetto di ciascuna calamità. Francia, Belgio, Irlanda e Italia sono stati colpiti da eventi concomitanti che hanno provocato diverse vittime. Tra i più recenti si può ricordare l'inondazione che ha interessato la Francia nel Marzo del 2013, causando 1 morto e coinvolgendo 1200 persone. Per quanto riguarda l'Italia, va menzionato l'evento del Novembre 2012 che ha provocato 7 morti nell'area del Mar Adriatico. In Irlanda, nel Novembre 2009, il fiume Lee e le forti tempeste dell'Oceano Atlantico hanno creato disagi e danni a migliaia di abitanti (*PAPROTNY ET ALII, 2018*). L'analisi storica degli eventi è importante per comprendere l'evoluzione del fenomeno. La concomitanza degli eventi non rappresenta una peculiarità di pochi territori. Si manifesta in Paesi a diverse latitudini, con cause ed effetti in scale diverse.

È noto che la combinazione di elementi meteo-climatici come vento, bassa pressione e umidità causa la formazione di perturbazioni atmosferiche che danno luogo a precipitazioni e tempeste marine (*MILLY ET ALII, 2015*). I processi meteorologici e idrologici che favoriscono le inondazioni costiere sono correlati. Infatti i sistemi di bassa pressione governano gli spostamenti delle masse d'aria e le attività cicloniche (*BEVACQUA ET ALII, 2019*). In letteratura la contemporaneità degli eventi è studiata come risultante di un evento composto, definito come la combinazione di fattori che causano impatti significativi (*LEONARD ET ALII, 2014; ZSCHEISCHLER ET ALII, 2018*). Si pone l'attenzione sul concetto di rischio, considerando la dipendenza statistica tra l'innalzamento del

livello del mare e l'aumento dell'altezza idrica dei fiumi (ZHENG ET ALII, 2014; MOFTAKHARI ET ALII, 2019). Si ricorre alla stima della probabilità congiunta. Le valutazioni basate su statistiche univariate potrebbero sottostimare i rischi associati ad eventi estremi (ZSCHEISCHLER & SENEVIRATNE, 2017; PAPROTNY ET ALII, 2018; ZELLOU & RAHALI, 2019). Uno studio condotto lungo la costa orientale ligure, ha consentito di mettere in risalto l'importanza di un'analisi combinata di inondazioni fluviali e marine. Infatti, effettuando separatamente la modellazione degli impatti sul territorio di eventi concomitanti, si osserva che non è opportuno trascurare l'effetto derivato dalle mareggiate, pur essendo più preoccupante lo scenario ottenuto per l'esondazione del fiume. Gli elementi esposti sono diversi e non possono essere esclusi dall'analisi (DE ANGELI ET ALII, 2018). Solo da un'esamina composta, si possono ricavare le aree più critiche.

Una delle regioni italiane soggetta ad eventi contemporanei è la Calabria. Il territorio è stato più volte colpito da alluvioni e mareggiate che hanno compromesso la fragile stabilità. Collocata nella parte meridionale della penisola, la Calabria presenta 712 km di costa, bagnati dal Mar Tirreno e dal Mar Ionio. I litorali sono esposti alle correnti di Scirocco e di Grecale lungo la fascia ionica e a quelle di Maestrale e di Libeccio lungo la zona tirrenica. Il territorio è caratterizzato da una complessa orografia e da una particolare geomorfologia che condizionano la risposta alle precipitazioni. Il 90% della Regione è occupato da colline e da montagne, comportando un ridotto sviluppo idrografico dei corsi d'acqua. Le pendenze delle aste idrografiche sono elevate e i tempi di corruzione molto ridotti. Le condizioni di piena si raggiungono molto velocemente (SORRISO-VALVO & TERRANOVA, 2006; SABATO & TROPEANO, 2014). Al rischio di esondazioni si associa quello di mareggiate e di inondazioni costiere.

La contemporaneità è strettamente legata alla natura della perturbazione. Nasce la necessità di studiare gli eventi contemporanei dal punto di vista prettamente meteorologico. L'impossibilità di monitorare i livelli idrici dei torrenti e la ridotta escursione di marea (pochi centimetri), hanno spinto lo studio verso l'analisi delle cause scatenanti la contemporaneità. Tenuto conto dei fattori geografici, morfologici e climatici, lo studio ha fornito importanti risultati.

Nella tesi è stata effettuata l'analisi degli eventi, verificatisi nei comuni costieri della Calabria, dal 1979 al 2018. Per tale scopo è stato esaminato il database Asical del CNR-IRPI di Cosenza, contenente i fenomeni di dissesto di tutta la Regione. Per sincerarsi della presenza della concomitante mareggiata è stata applicata la teoria di Boccotti (BOCCOTTI, 2015). Sono state elaborate le altezze significative estrapolate dai dati meteomarini forniti dal gruppo MeteOcean dell'Università di Genova. Al fine di accertare la veridicità dell'ipotesi circa la dipendenza degli

eventi dalle condizioni meteorologiche, si è proceduto alla valutazione ed elaborazione dei parametri climatici responsabili della formazione delle perturbazioni. A tal fine sono stati individuati 18 comuni pilota rappresentativi delle due fasce costiere. Attraverso l'analisi statistica multivariata con componenti principali è stato possibile individuare 4 relazioni analitiche che legano l'intensità di pioggia e l'altezza significativa massima delle mareggiate con le variabili atmosferiche. L'indagine ha consentito di legare le due grandezze, ritenute indipendenti, con gli stessi parametri, particolareggiando la procedura per ciascuna fascia costiera. Il risultato ottenuto consente di stimare l'entità dell'evento che ci si può aspettare, avendo note le caratteristiche della perturbazione (umidità relativa, pressione atmosferica, temperatura e velocità del vento). Lo studio getta le basi per una pianificazione territoriale più sicura, in linea con quanto proposto dalla Direttiva alluvioni e dalle raccomandazioni europee.



CAPITOLO I
Inquadramento geomorfologico e climatico della Calabria



CAPITOLO I

Inquadramento geomorfologico e climatico della Calabria

1.1 Collocazione geografica e peculiarità territoriali

La Calabria occupa la parte meridionale della penisola italiana (Fig.1.1). Disposta in senso latitudinale, è collocata al centro del Mar Mediterraneo ed è bagnata dal Mar Tirreno e dal Mar Ionio.

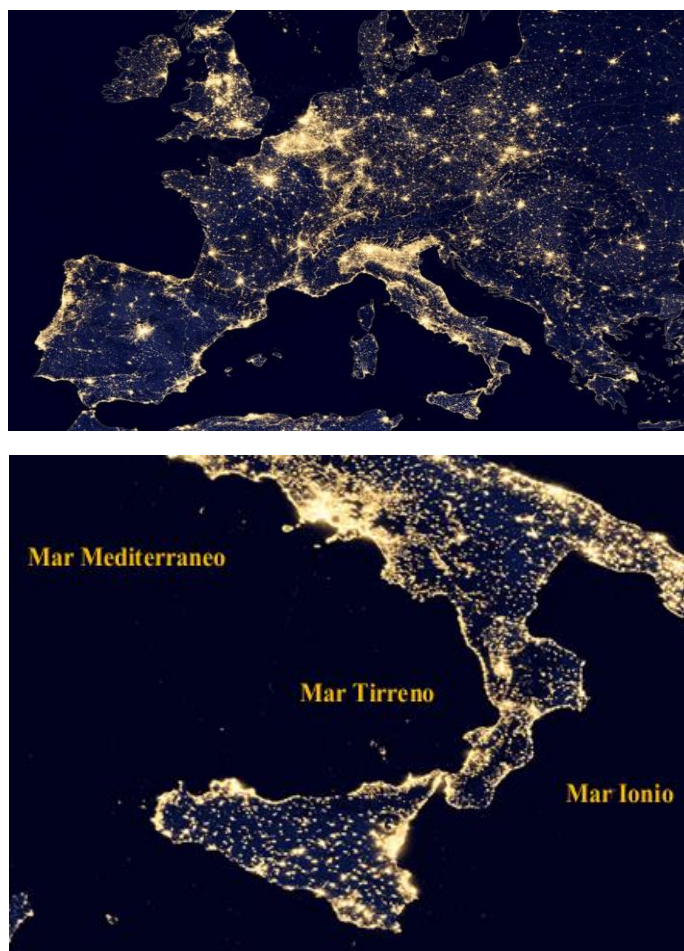


Fig. 1.1 Foto NASA – Inquadramento geografico della Calabria.

Pur essendo perimetrata da 712 km di coste, la Calabria è perlopiù occupata da colline (49,2%), rilievi montuosi (41,8%) e scarsamente da pianure (9,0%), come mostrato in figura 2.1. Al centro

della Regione si estende la catena dell'Appennino Meridionale che, con ripidità, giunge quasi fino al mare. La Calabria presenta un indice di boscosità tra i più alti dell'Italia (35,6%).

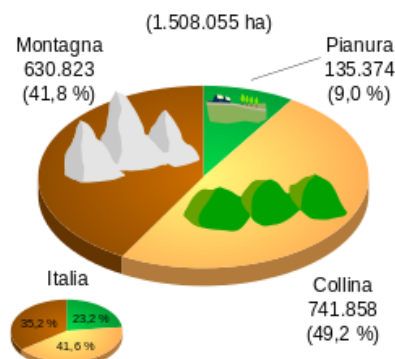


Fig. 1.2 Inquadramento altimetrico della Calabria.

La suddivisione amministrativa del territorio prevede l'esistenza di 4 province (Catanzaro, Cosenza, Crotona e Vibo Valentia) e 1 città metropolitana (Reggio Calabria). Sono presenti 404 comuni, di cui 113 costieri.



Fig. 1.3 Inquadramento territoriale della Calabria.

Il settore in cui è riconosciuto il primato della Calabria è l'agricoltura. Le condizioni climatiche e geologiche la rendono unica per la produzione di particolari colture. L'economia regionale è sostenuta anche dall'artigianato che affonda le sue radici nella civiltà mediterranea e della Magna Grecia. Dal punto di vista del patrimonio naturalistico, il territorio presenta numerose aree protette, molte delle quali riconosciute a livello europeo. Dai Parchi Nazionali alle riserve, conta molteplici Zone Speciali di Conservazione (ZSC). La Calabria è una terra ricca di storia, arte e cultura.

1.2 Caratteristiche geologiche e pedologiche

La storia tettonica della Calabria ha influenzato e determinato la geologia attuale di tale Regione. Tutto il territorio è contenuto nell'Arco calabro-peloritano, considerato un frammento della Catena Alpina e suddiviso in due unità, una meridionale ed una settentrionale. I settori sono caratterizzati da un assetto tettono-stratigrafico differente. Nonostante siano presenti rocce molto antiche, si può ritenere che la Calabria sia geologicamente giovane. Infatti, la disposizione degli strati costituenti la struttura territoriale è avvenuta in tempi recenti. I frammenti e i materiali, provenienti da sedi distanti chilometri e disposti sulle falde di ricoprimento, hanno rappresentato uno strato di deposito per gli elementi sedimentati nel corso degli anni (MANDAGLIO, 2016). L'intensa attività sismica del territorio è frutto di un sollevamento tettonico ancora attivo. Per quanto concerne il tipo di suolo, la Calabria presenta una grande variabilità di strati affioranti. Tali tipologie influiscono sull'instabilità dei versanti e dei terreni, incidendo sul rischio di dissesto idrogeologico. L'ARSSA (Agenzia Regionale per lo Sviluppo e per i Servizi in Agricoltura) ha effettuato una classificazione individuando, a piccola scala, gli ambiti territoriali omogeni. La suddivisione riguarda l'evoluzione dei suoli e gli elementi caratterizzanti. La carta è articolata in 4 livelli gerarchici. Il primo consiste in una classificazione per grandi aree, differenziate per caratteristiche macroclimatiche e macrogeologiche. È possibile individuare 4 tipologie: Soil Region 66.5 (rilievi interni della Sila, delle Serre e dell'Aspromonte), Soil Region 59.7 (massiccio del Pollino), Soil Region 62.3 (aree collinari che degradano verso il mare), Soil Region 61.1 (rilievi collinari dell'alto versante ionico). Il secondo livello gerarchico coinvolge le province pedologiche, come mostrato in figura 1.4. La classificazione ha consentito di distinguere 18 province di terre (Soil Sub Region). La suddivisione nasce da differenze riguardanti la varietà di substrato, la morfologia, la morfometria e il clima. Per la fascia costiera calabra è possibile considerare 10 Soil Sub Region. Il terzo livello dei Sistemi Pedologici (Great Soilscape) conta 54 unità, variabili per geomorfologia e litologia. L'ultimo livello suddivide il territorio in 160 Sottosistemi pedologici (Soilscape).

La tipologia di suolo più estesa, del primo livello gerarchico, è la Soil Region 62.3. In particolare, sulla fascia ionica è possibile discernere 3 grandi ambienti: pianura costiera, pianura fluviale e terrazzi antichi (corrispondenti alle province pedologiche 4, 6, 1). I fenomeni di erosione del suolo che caratterizzano tale Soil Region sono imputabili alla forte aggressività delle piogge e alla vulnerabilità delle terre. Gli strati più superficiali sono costituiti da argille limose del Pliocene. Nelle fasce di pianura, le cause principali di degrado sono da addebitare alla cementificazione. Lungo il litorale tirrenico gli ambienti più diffusi sono: terrazzi antichi, conoidi e alluvioni recenti (corrispondenti alle province pedologiche 2, 3, 8, 10). In questi depositi le caratteristiche dei suoli

dipendono dalle dimensioni dei sedimenti dei corsi d'acqua. Si possono rintracciare terreni a grana grossa ma anche fini, di stratigrafia sottile o profonda. Gli abbondanti volumi di materiale trasportato durante gli eventi meteorici eccezionali, costituiscono il ripascimento per le spiagge. A tale situazione segue la progressiva erosione.

La seconda regione pedologica più diffusa è la Soil Region 66.5. Copre l'entroterra e parte del litorale tirrenico. Si distinguono 2 grandi ambienti: rilievi collinari e pianure alluvionali (corrispondenti alle province pedologiche 8, 13). Sono suoli caratterizzati da grana moderatamente grossolana e quindi drenanti. I rischi di erosione sono imputabili all'asportazione della vegetazione di copertura.

Le altre regioni sono tipiche di ambienti alluvionali e pianure costiere in cui si verificano frequenti fenomeni di dissesto (ARAMINI ET ALII, 2003).

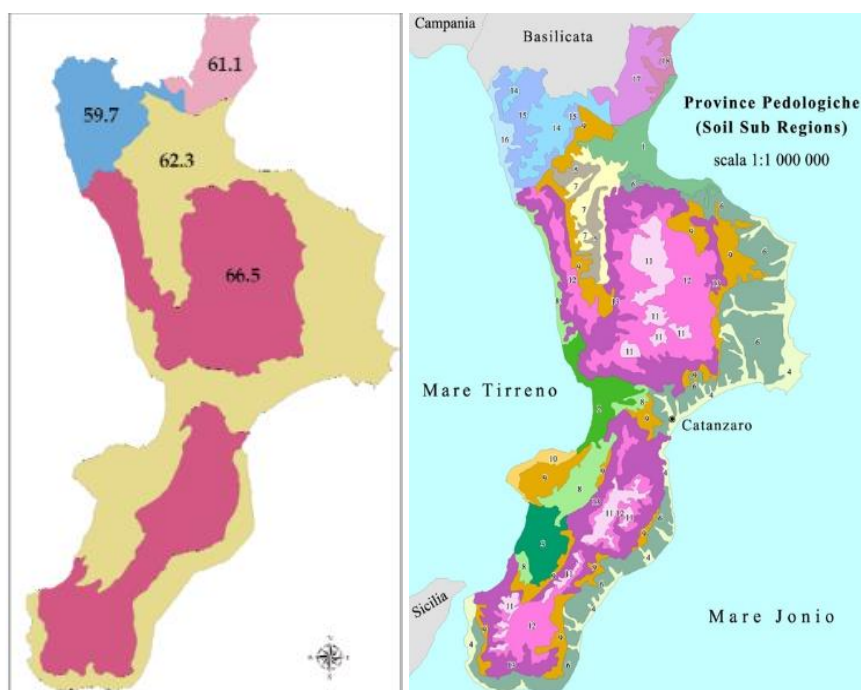


Fig. 1.4 Classificazione delle tipologie di suoli della Calabria (Soil Region e Province Pedologiche) - ARSSA.

Classificate le tipologie di suolo nel territorio calabrese, è necessario valutare e analizzare i processi erosivi. Lo studio condotto dall'ARSSA ha restituito risultati importanti circa la percentuale di superficie soggetta a degrado. Il metodo applicato (RUSLE) sfrutta l'Equazione Universale di Perdita del Suolo e include la stima di alcuni parametri: l'aggressività della pioggia, i dati pedologici, la copertura del suolo, la pendenza e la lunghezza dei versanti. Dallo studio si evince che il 51,8% del territorio è soggetto ad erosione. In particolare, il 39,4% ricade nella classe che va da "moderata" a "catastrofica" e il 12,4% nella classe "erosione leggera". Tenuto conto del ruolo svolto dalla vegetazione, le aree interessate da fenomeni erosivi più allarmanti

sono le collinari e, in particolare, i rilievi argillosi del versante ionico. Sulla base di tale analisi si evince che il territorio calabrese è soggetto ad elevato rischio di erosione a causa dell'aggressività delle acque, dell'elevata erodibilità del suolo e dell'accentuata pendenza dei versanti. Tale condizione è marcata in prossimità delle coste, come mostrato dalla figura seguente:

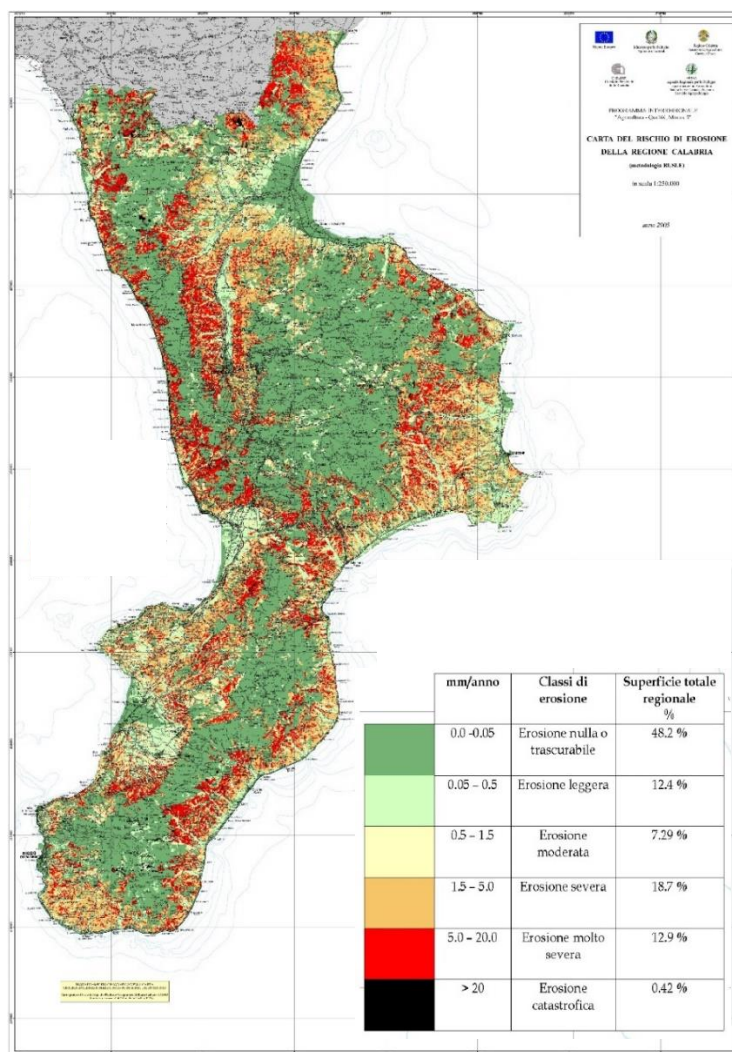


Fig. 1.5 Carta del rischio di erosione della Regione Calabria (Metodo RUSLE) - ARSSA.

L'erodibilità del suolo non è influenzata solo dalla tipologia pedologica di appartenenza ma soprattutto dall'eccessivo sviluppo dell'agricoltura. L'espansione di aree prive di copertura vegetativa, influisce pesantemente sull'azione di degrado. Le zone effettivamente più a rischio sono quelle collinari e prossime alle coste. Le attività agricole rappresentano una risorsa economica per la regione ma incidono pesantemente sulla stabilità delle terre. La copertura vegetale infatti, rende le aree interne potenzialmente meno a rischio di degrado. Tali zone, infatti, sono state rimboscate nella seconda metà del secolo scorso. L'erodibilità del suolo incide sulla risposta del territorio agli eventi alluvionali e alle precipitazioni intense.

1.3 Caratteristiche geomorfologiche fluviali

Il sollevamento tettonico ancora oggi attivo, determina l'aumento dell'energia dei sistemi montuosi e l'alterazione del profilo orografico. I versanti sono in continua evoluzione a causa dell'innalzamento delle placche. I rilievi cadono verso il mare in quasi totale assenza di pianure costiere raccordanti, con la conseguenza di una configurazione idrografica molto particolare. I corsi d'acqua che scorrono lungo il territorio calabrese presentano dei limiti riconducibili alle principali configurazioni tettoniche. I bacini sono di piccola estensione (da 10 a 160 km²) e la ridotta distanza dai sistemi montuosi al mare, determina pendenze longitudinali delle aste molto accentuate (anche più del 50%). Tali caratteristiche contraddistinguono le *fiumare* (SORRISO-VALVO, 2008).



Fig. 1.6 Fiumara dell'Amendolea (RC).

Le fiumare rientrano nei sistemi fluviali ad alto rischio idraulico, in particolare nelle zone di sbocco. Il regime idrologico è di tipo torrentizio. Si alternano esondazioni improvvise e periodi di inattività (SABATO, 2014). Le portate sono quasi nulle nella stagione estiva ma aumentano molto velocemente in presenza di eventi alluvionali. Le pendenze marcate delle aste principali comportano tempi di risposta rapidi e velocità delle correnti elevate. Da precipitazioni intense e di breve durata potrebbero seguire portate abbondanti (PETRUCCI ET ALII, 2012). Gli alvei sono molto ampi e poco profondi. La granulometria è grossolana e raramente si osservano sabbie e limi. Gli alvei e le sponde sono costituiti da materiale ghiaioso e ciottoloso, le cui dimensioni variano da pochi centimetri fino a 2 m. L'azione di trascinarsi della corrente rende le fiumare vulnerabili. Spesso si verificano danni alle opere di regimentazione (briglie, arginature, ecc.) con conseguenti esondazioni. Nelle zone montane, l'acqua agisce sui versanti provocando frane e smottamenti. L'erosione delle sponde e del letto incidono sull'apporto di materiale, causando

ostruzioni e impedimenti al normale flusso (SORRISO-VALVO, 2008). Le portate solide e liquide urtano gli ostacoli movimentando, quanto investito, verso valle. In presenza di precipitazioni intense il materiale solido trascinato dalla corrente è tale da incidere sulla morfologia dei litorali. Le coste presentano un andamento sinuoso con rientranze alternate a ripascimenti evidenti in prossimità degli sbocchi dei corsi d'acqua (MANDAGLIO, 2016).



Fig. 1.7 La Fiumara dell'Amendolea (RC) in piena.

Alle caratteristiche morfologiche, idrologiche ed idrauliche delle fiumare si combina un'azione antropica invasiva e una grave incuria. La scarsa manutenzione degli alvei causa impedimenti al normale corso dell'acqua. La presenza di vegetazione, tronchi e ogni tipo di materiale trasportato dalla corrente, ostacola il passaggio della piena. In alcuni casi, le arginature sono interrotte in più punti per consentire l'accesso ai centri urbani o agli edifici industriali. Le improvvisate vie di collegamento rappresentano dei percorsi preferenziali per l'acqua, favoriscono le esondazioni. I livelli di criticità di molte fiumare sono allarmanti. Ne è un esempio la fiumara Valanidi.



Fig. 1.8 La Fiumara Valanidi (RC).

1.4 Caratteristiche geomorfologiche delle aree costiere

La Calabria detiene il 10% del patrimonio costiero italiano. Alterna distese di sabbia a baie e promontori. La fascia litoranea è suddivisa in coste e riviere (figura 1.9), corrispondenti, in maniera approssimativa, ai confini amministrativi dei capoluoghi.



Fig. 1.9 Suddivisione costiera della Calabria.

Lo sviluppo costiero calabrese è pari a 712 km, di cui 312 km sono coste rocciose, 365 km sono spiagge e circa 35 km sono coste armate. In queste, la naturale evoluzione del litorale è condizionata dall'azione antropica. I morfotipi distinguibili sono i seguenti:

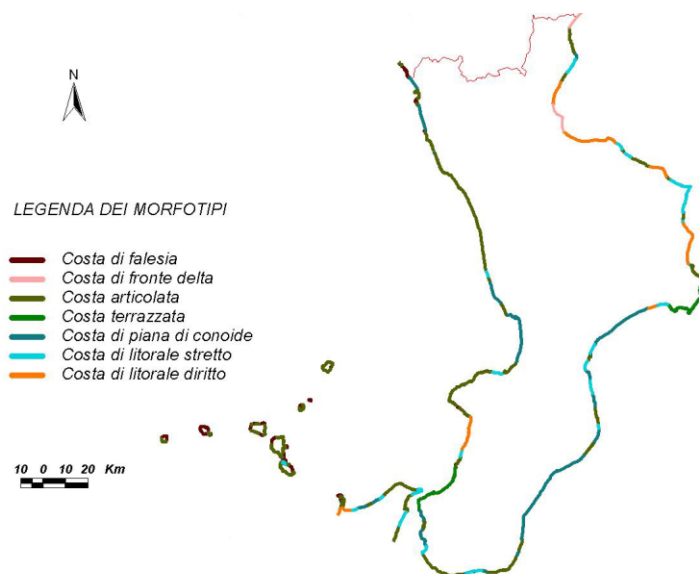


Fig. 1.10 Morfotipi della Calabria.

Per oltre 230 km, la maggior parte dei quali lungo la fascia tirrenica, si osservano coste articolate. Sono caratterizzate da rilievi montuosi affacciati sul mare che lasciano spazio a piccole spiagge confinate, solitamente in ghiaia: le “pocket beaches”. Gli apporti di materiale provengono dalle frane delle pareti dei rilievi e dai corsi d’acqua e hanno una granulometria piuttosto fine. Il trasporto dei volumi solidi lungo riva segue la direzione Nord. Il processo di erosione costiera è particolarmente preoccupante.

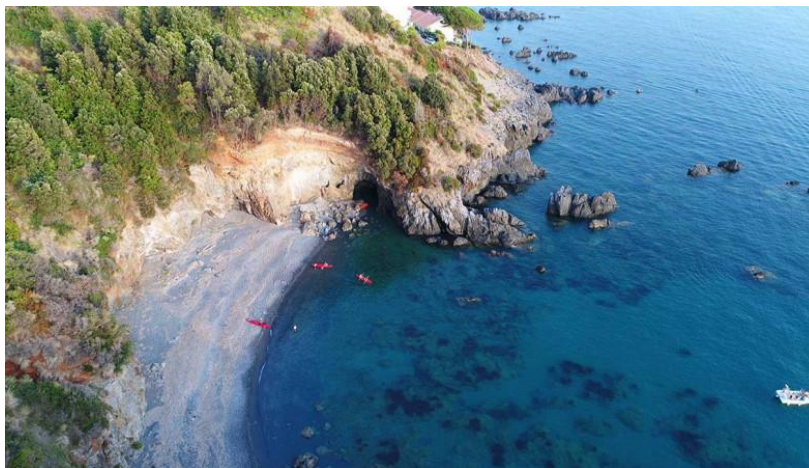


Fig. 1.11 Costa articolata di Scalea (CS)- Riviera dei Cedri.

La seconda tipologia di costa alta osservabile è la terrazzata. È tipica del litorale crotonese e del tratto reggino che si affaccia allo Stretto di Messina. La riva poggia su un pendio digradante o su una falesia soffice. Le batimetriche evidenziano profondità variabili gradualmente. Gli apporti di materiale solido dai corsi d’acqua restituiscono un profilo sottomarino poco pendente.

La fascia ionica è perlopiù caratterizzata da coste basse. Il morfotipo più frequente è la costa di piana di conoide, con un’estensione di 176 km (FERRETTI ET ALII, 2003).



Fig. 1.12 Costa di piana di conoide ad Africo (RC)- Riviera dei Gelsomini.

Lungo il litorale ionico, la spiaggia ha una granulometria piuttosto grossolona. Le dimensioni vanno da pochi millimetri (sabbia) a qualche centimetro (ciottoli). L'apporto cospicuo di materiale proveniente dai corsi d'acqua durante gli eventi meteorici, ha comportato un profilo sottomarino abbastanza pendente. Parte della portata solida è dispersa sui fondali marini che assumono le caratteristiche dei canyons, con grandi profondità e pareti ripide. Gli abbondanti volumi lungo la costa seguono la direzione Sud e costituiscono il ripascimento delle spiagge a cui segue la progressiva erosione (MANDAGLIO, 2016).

In definitiva si evince un rischio medio di erosione costiera in quasi tutto il litorale ionico, contro un rischio di categoria R3 lungo la fascia tirrenica:

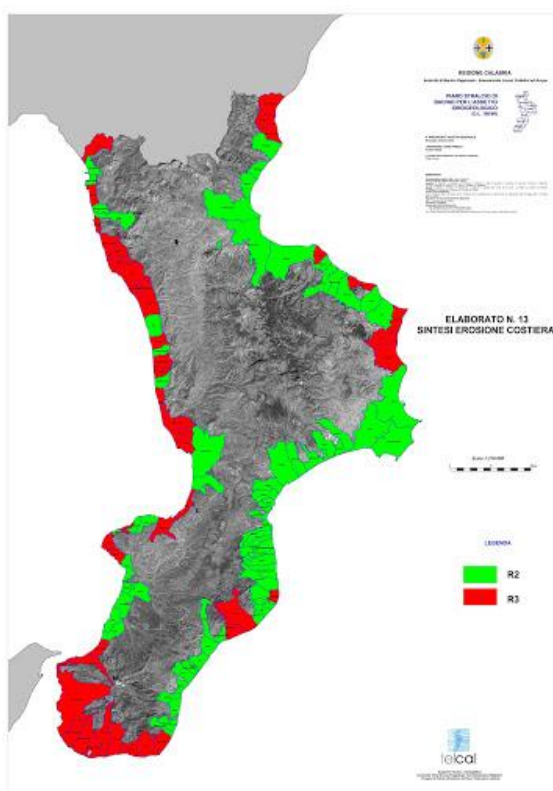


Fig. 1.13 Carta dell'erosione costiera.

Sul litorale reggino e dell'alto Tirreno l'alternanza naturale di stadi di avanzamento e di arretramento della linea di costa, mostra un carattere più dominante in fase erosiva. L'azione del mare è perennemente attiva e non è compensata dal materiale proveniente dalle aree interne per la presenza di opere idrauliche di sistemazione degli alvei. Se da un lato gli interventi hanno ridotto le frane e hanno migliorato la stabilità dei pendii, dall'altro hanno considerevolmente limitato l'apporto di materiale solido lungo le coste (MANDAGLIO, 2016). Risulta necessario prevedere strutture a difesa dei litorali.

1.5 Caratteristiche climatiche

La Calabria presenta delle peculiarità geografiche e morfologiche che la rendono unica fra tutte le regioni d'Italia. Il clima calabrese è tipicamente mediterraneo e, secondo la classificazione di Köppen, appartiene al sottogruppo Cs: "temperato caldo con estate secca" (FRATIANI & ACQUAOTTA, 2017). Per valutare le caratteristiche climatiche della regione, è necessario analizzare il modello di circolazione atmosferica nel Mediterraneo. I centri d'azione che influenzano le condizioni meteorologiche nel bacino sono 3 (figura 1.14):

1. l'anticiclone delle Azzorre;
2. l'anticiclone russo-siberiano;
3. la depressione dell'Islanda.



Fig. 1.14 Centri d'azione anticiclonici e ciclonici nel Mediterraneo.

L'interferenza e l'attività dei singoli moti è vincolata all'orografia del bacino del Mediterraneo. I rilievi montuosi agiscono sulle masse d'aria in transito, deflettono i venti e proteggono i territori dalle correnti fredde provenienti da Nord. L'intrusione di queste correnti, che si scontrano con la condizione stazionaria e calda del Mediterraneo, determina delle depressioni locali nel Tirreno. L'intensità delle perturbazioni può essere notevole e causare fenomeni temporaleschi.

Il clima calabrese è influenzato, come il clima mediterraneo, dai moti e dalle interazioni delle masse d'aria ma è caratterizzato ancora più dalla struttura fisica del territorio. Il sistema morfologico, complesso ed imponente, condiziona i fenomeni meteorologici (ARAMINI ET ALII, 2003). La dorsale appenninica divide la Calabria in due versanti: ionico e tirrenico. Le differenze termiche e pluviometriche registrate tra le due fasce sono imputabili all'azione di schermo che i rilievi montuosi esercitano nei confronti delle masse d'aria. Le correnti umide collidono con la

piattaforma montana, inducendo le masse a risalire e a liberare calore latente. Nella caduta, lungo il versante opposto, l'aria si riscalda generando il Föhn, vento secco e caldo. La distribuzione delle precipitazioni e la risposta del territorio sono vincolate dalla presenza di rilievi che si ergono in prossimità dei litorali. La piovosità media annua si aggira intorno ai 1151 mm, superando di gran lunga la media nazionale dei 970 mm.

La distribuzione spaziale della precipitazione media annua e del numero medio di giorni piovosi annui è di seguito rappresentata:

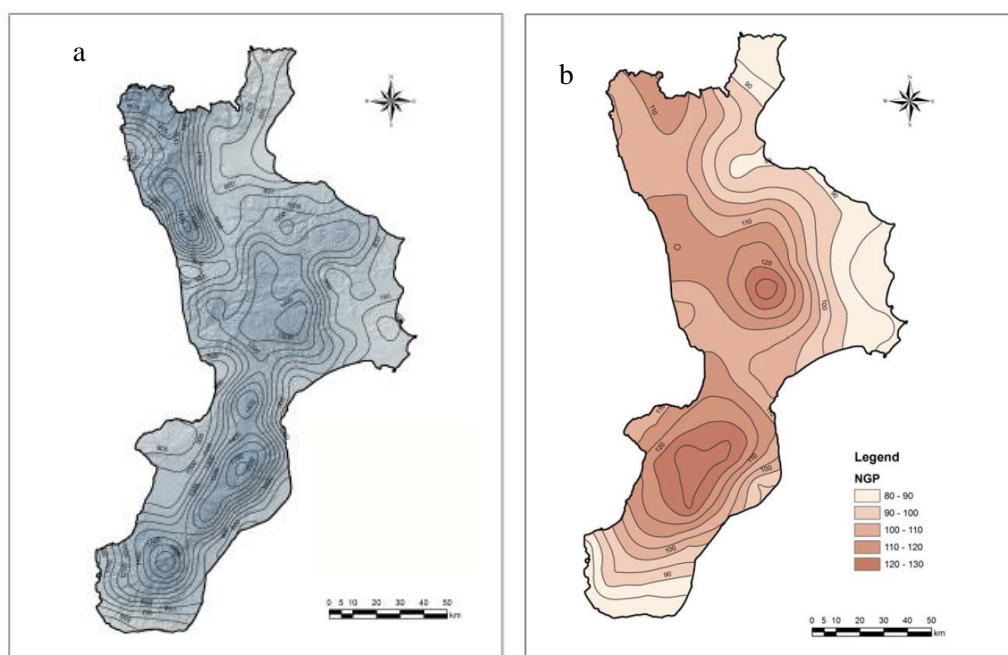


Fig. 1.15 (a) Distribuzione delle precipitazioni medie annue; (b) Distribuzione del numero medio di giorni piovosi annui.

Si osserva che le precipitazioni medie annue minori e il numero di giorni piovosi annui più bassi sono relativi alla fascia ionica e i valori più alti si registrano nell'entroterra e nella fascia tirrenica settentrionale (TERRANOVA ET ALII, 2006). Questo risultato è in linea con le differenze riscontrate nei regimi pluviometrici dei due versanti.

Il litorale ionico è investito dalla corrente di Scirocco proveniente da Sud-Est (figura 1.16). È un vento caldo umido che preannuncia piogge abbondanti e maltempo. Le masse d'aria cariche di umidità si scontrano con la catena montuosa, generando un innalzamento delle correnti fino a 1800 m di quota e provocando eventi meteorologici eccezionali. Da Nord-Est soffia il vento di Grecale. In Calabria, i territori più esposti all'azione di tale vento sono ubicati nell'alto Ionio. L'entrata nel bacino del Mediterraneo avviene attraverso i Balcani. Le masse d'aria sono molto fredde e secche e l'intensità con cui agiscono è piuttosto forte. In autunno-inverno il Grecale porta

pioggia e burrasche. Le correnti a cui la fascia ionica è esposta, spiegano la natura pluviometrica. Il regime di pioggia è di tipo impulsivo soprattutto nel periodo autunnale. A lunghi periodi di siccità, seguono precipitazioni brevi ma intense che condizionano i problemi idrogeologici del territorio (VERSACE ET ALII, 1989). Il litorale tirrenico è soggetto agli influssi dell'Atlantico con le correnti fredde di Maestrale, provenienti da Nord-Ovest e alle correnti di Libeccio, più calde ma meno persistenti, provenienti dall'Africa. Per via del contrasto termico che si genera tra polo ed equatore, i venti che soffiano da Occidente sono molto forti e favoriscono l'insorgenza di precipitazioni quando si scontrano con le masse provenienti da Sud. Le perturbazioni causano piogge frequenti ma quasi mai durature ed intense. Sono proprio le correnti Occidentali a giustificare la maggior piovosità della fascia tirrenica rispetto a quella ionica. La media di pioggia annua è compresa, infatti, tra i 1500 e i 2500 mm.

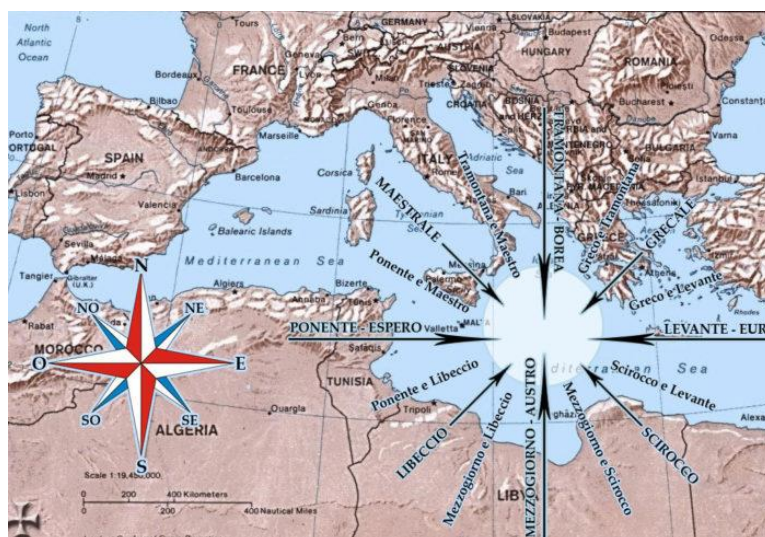


Fig. 1.16 Rosa dei venti- Direzione predominante dei venti che soffiano sui litorali della Calabria.

Le caratteristiche anemologiche del sito influenzano anche il clima ondosio. La costa ionica è soggetta all'azione del moto proveniente da un ventaglio di direzioni abbastanza ampio, centrato rispetto alla provenienza del vento di Scirocco. Le altezze significative medie sono generalmente minori a quelle registrate nel Mar Tirreno. La fascia occidentale calabrese è investita da un moto ondosio che si concentra in un bene preciso settore (circa 300° rispetto al Nord), perfettamente orientato con la direzione delle perturbazioni di Nord-Ovest (BARBARO, 2016). La morfologia costiera, la conformazione dei bacini e le scarse caratteristiche meccaniche dei terreni affioranti, combinate con eventi di pioggia di forte intensità e con un consumo del suolo crescente, rappresentano condizioni scatenanti i fenomeni di dissesto, con conseguenze disastrose per la popolazione. Nel capitolo successivo verrà presentata la metodologia di studio per l'accertamento della contemporaneità degli eventi.



CAPITOLO II

Contemporaneità di alluvioni e mareggiate in Calabria: principali eventi

CAPITOLO II

Contemporaneità di alluvioni e mareggiate in Calabria: principali eventi

2.1 Ottobre 1996 - Crotonese

La Calabria è spesso colpita da fenomeni catastrofici che pregiudicano profondamente la fragile stabilità e compromettono la sicurezza dei cittadini. Numerosi sono gli accadimenti che hanno sconvolto la Regione negli ultimi decenni, ma emblematico è l'evento che ad Ottobre del 1996 ha messo in ginocchio Crotonese. Da giorno 4 fino a giorno 14 si sono susseguite piogge abbondanti e mareggiate. L'esondazione del fiume Esaro a ridosso dell'area industriale crotonese causò la morte di 6 persone, migliaia di sfollati e danni a centinaia di imprese e abitazioni.



Fig. 2.1 Esondazione del Fiume Esaro durante l'evento di Ottobre 1996 a Crotonese.

Le piogge caddero insistenti per tutta la settimana raggiungendo complessivamente i 330 mm di altezza cumulata. Solo alle ore 9:00 del 14 Ottobre il pluviometro di Crotonese registrò 72.8 mm di pioggia. Gli affluenti del fiume Esaro si ingrossarono, straripando in più punti e invadendo i quartieri di Gabelluccia, Poggio Pudano, Marinella e Fondo Gesù. L'onda di piena del fiume travolse e uccise alcune persone rimaste intrappolate in auto. L'acqua entrò nelle abitazioni e invase la zona commerciale, raggiungendo in alcune aree, l'altezza di 4 m. La furia del torrente

asportò diversi ponti, isolando completamente interi quartieri. In particolare il crollo del cavalcavia posto all'ingresso della città causò un'onda anomala, abbattendosi sui rioni limitrofi.



Fig. 2.2 Crollo del cavalcavia all'ingresso della città.

La città fu colpita negli stessi giorni da una violenta mareggiata. L'altezza significativa superò per alcune ore i 3 m, invadendo le fasce costiere. Furono impegnati 1600 uomini per ripristinare la viabilità e dare soccorso alla gente. I danni materiali ammontarono a circa 2 miliardi delle vecchie lire. Crotona ne uscì devastata.



Fig. 2.3 Danni provocati dall'evento concomitante dell'Ottobre 1996 nella città di Crotona.

2.2 Novembre 2010 - Gioia Tauro (RC)

Lungo la fascia tirrenica, particolare attenzione è rivolta agli eventi che interessano la Piana di Gioia Tauro per la presenza della fiumara Budello. Nel Novembre 2010 le precipitazioni insistenti e copiose ingrossarono il torrente, causandone lo straripamento e la rottura degli argini. In meno di 3 ore caddero 220 mm di pioggia. L'acqua e il fango in alcuni punti della Strada Statale 18 raggiunsero i 2 m di altezza, abbattendosi sulle abitazioni. La furia del torrente devastò parte della città e provocò centinaia di sfollati. Le attività commerciali e artigianali furono pesantemente colpite. Numerose le carcasse di animali travolte e le auto seppellite da detriti.

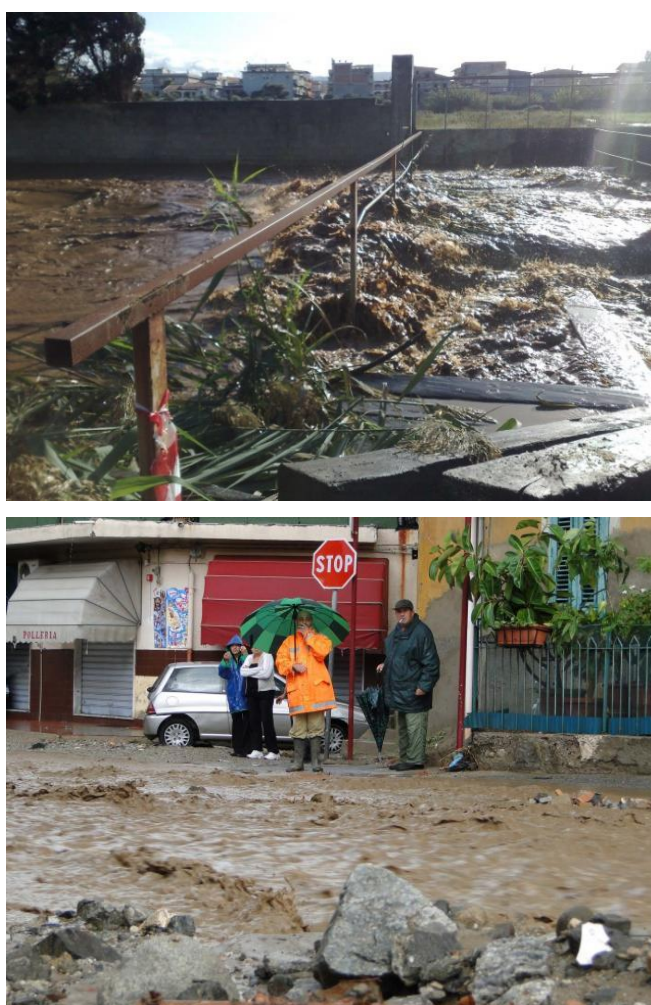


Fig. 2.4 Danni provocati dall'evento verificatosi a Novembre 2010 a Gioia Tauro.

La fascia più colpita fu la valliva. I maggiori danni si contarono lungo la foce del torrente, in cui si fece sentire anche l'azione del mare. La perturbazione riguardò la fascia costiera. Dal 31 Ottobre al 02 Novembre 2010 si registrò una mareggiata. L'altezza significativa massima superò i 2 m. I danni stimati superarono i 300 milioni.

2.3 Novembre 2013 – Catanzaro

Nella notte tra il 18 e il 19 Novembre 2013 una violenta ondata di maltempo flagellò la città di Catanzaro. 137 mm di pioggia in meno di 6 ore causarono l'esonazione dei torrenti Fiumarella e Alli. Allagamenti e smottamenti provocarono disagi alla popolazione. Negozi e abitazioni furono presi d'assalto dalle acque delle fiumare. L'interruzione della rete ferroviaria e di molte strade di collegamento procurò l'isolamento di moltissime famiglie. Il danno più ingente fu dovuto alla rottura della condotta di adduzione. L'impeto delle acque dei fiumi indusse danneggiamenti alle tubazioni costringendo 70000 abitanti senz'acqua potabile per diversi giorni. L'80% degli impianti idrici presentò criticità.



Fig. 2.5 Allagamenti e danni alle infrastrutture per l'esonazione delle fiumare nel Novembre 2013.

Contemporaneamente alla pioggia, sul fronte costiero, si verificò una mareggiata violenta. Per tutta la durata della precipitazione furono registrate onde molto alte. L'altezza significativa massima raggiunta fu di 3.70 m. Il lungomare e il litorale furono danneggiati pesantemente.



Fig. 2.6 Mareggiata del 19 Novembre 2013.



Fig. 2.7 Mareggiata del 19 Novembre 2013; il mare impatta contro il muro paraonde.

2.4 Ottobre / Novembre 2015 – Bruzzano Zeffirio (RC)

Un evento meteorico particolarmente violento ha riguardò la fascia ionica e parte della tirrenica dal 31 ottobre al 02 novembre 2015. Il Centro Funzionale Multirischi dell'Arpacal, in tale occasione, diramò diversi avvisi di criticità, come mostrato in figura 2.8 (ARCURI ET ALII, 2015). In tutto il territorio furono registrati esondazioni, frane, smottamenti, allagamenti e mareggiate. Le reti di collegamento principali e secondarie subirono cedimenti, causando danni a migliaia di cittadini. Molte abitazioni furono sgomberate e numerose famiglie rimasero isolate per diversi giorni. Furono registrati fenomeni di erosione costiera lungo la fascia ionica. Le mareggiate abbattono le opere a difesa della costa ed interi tratti di lungomare. La risalita del mare sulle spiagge seminò distruzione. Dal punto di vista geotecnico, molte furono le frane e numerosi gli smottamenti.

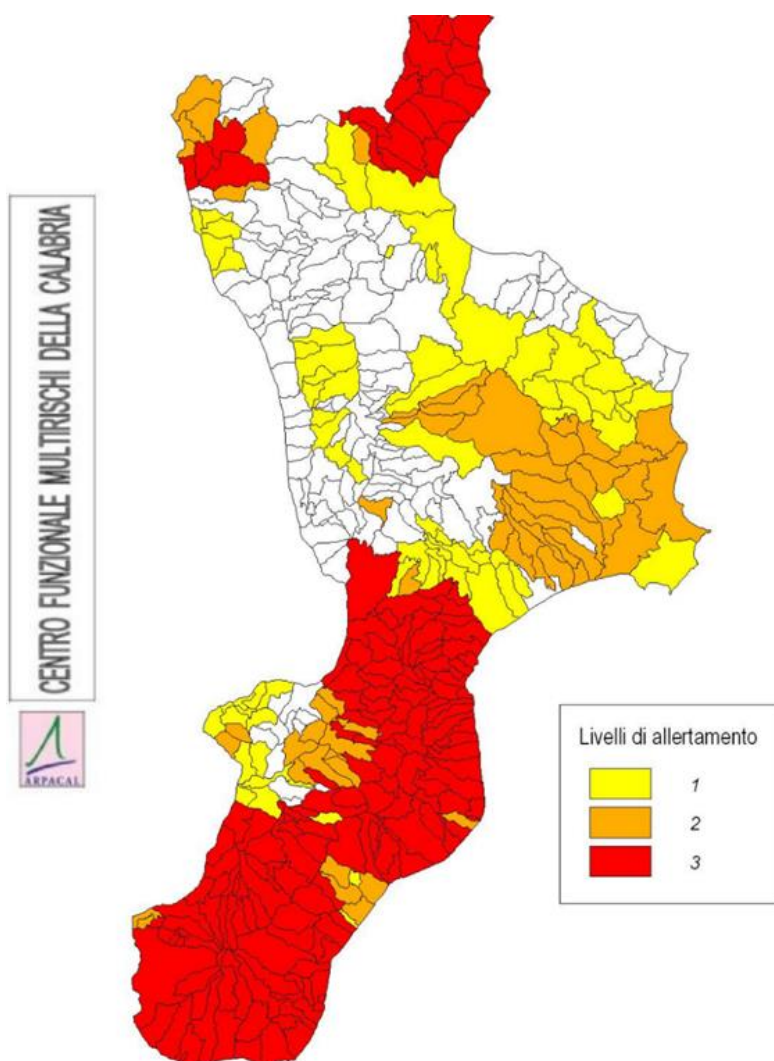
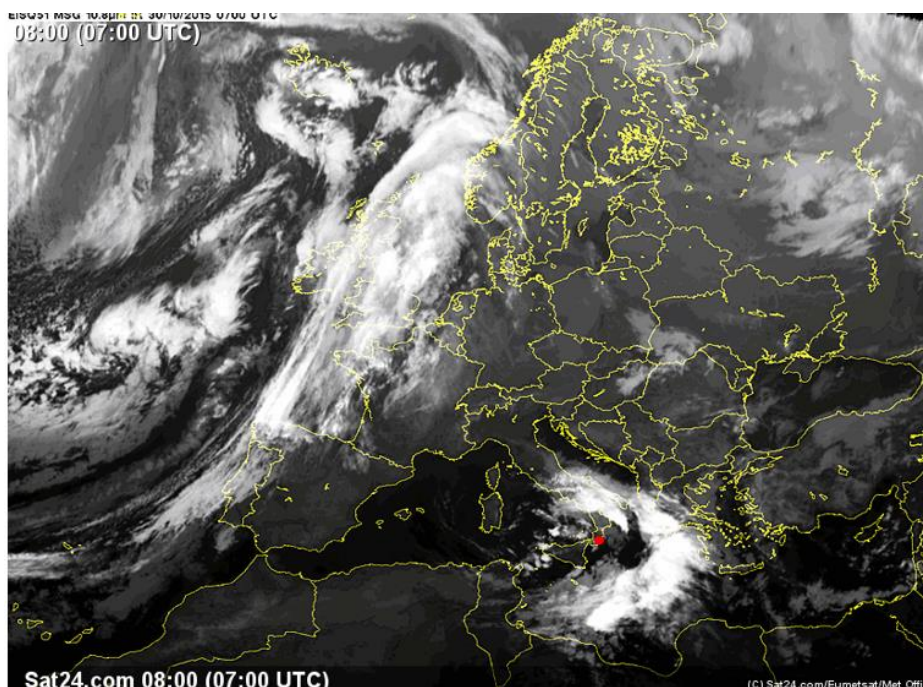
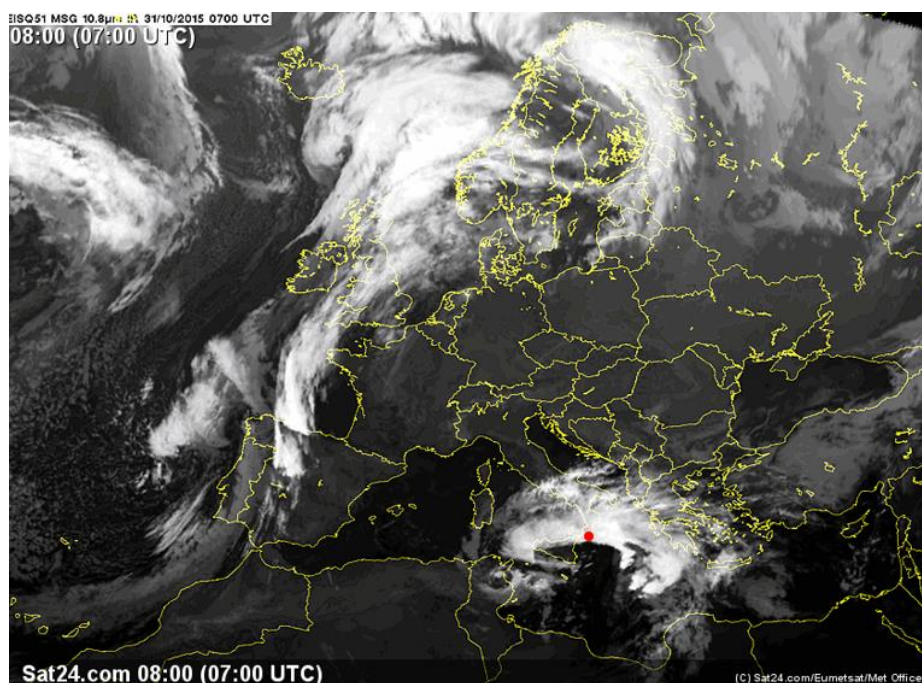


Fig. 2.8 Livelli di allerta emanati dal Centro Funzionale Multirischi per l'evento di Ottobre- Novembre 2015.

La perturbazione ebbe le caratteristiche simili ai cicloni tropicali. Il sistema di bassa pressione fu caratterizzato da un nucleo caldo, l'“occhio”, ben delimitato e libero da nubi (figura 2.9 a e b). Attorno al centro di depressione i venti soffiarono con forte intensità:



(a)



(b)

Fig. 2.9 Perturbazione atmosferica del 30 Ottobre 2015 (a) e del 31 Ottobre 2015 (b) sulle coste ioniche della Calabria.

Da tale evento, il territorio calabrese ne uscì significativamente indebolito. In particolare, il comune di Bruzzano Zeffiro, collocato lungo la fascia ionica reggina, fu devastato da una violenta mareggiata e dall'esonazione della fiumara omonima. L'acqua del torrente in piena che procedeva verso valle fu ostacolata dalla forza del mare che risaliva sulla spiaggia. Le reti idrica ed elettrica subirono interruzioni, causando non pochi disagi agli utenti. I danni alle infrastrutture e al territorio furono notevoli. Centinaia di persone rimasero isolate per i danneggiamenti recati alla viabilità. Si verificò il crollo della Strada Statale 106, della linea ferroviaria jonica e del ponte che collegava le frazioni del Comune, come mostrato in figura:



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2.10 (a) L'esonazione della Fiumara Bruzzano ha distrutto parte della Strada Statale 106. (b) Crollo della SS 106 a seguito dello straripamento e della mareggiata concomitante. (c) La rete ferroviaria è stata danneggiata e i binari sono rimasti sospesi. (d) L'evento ha causato il crollo del ponte di collegamento fra le frazioni di Bruzzano Zeffiro.

La pioggia cumulata durante tutto l'evento fu di 342,6 mm e l'altezza significativa massima registrata fu di 5,78 m. La mareggiata ebbe una durata di 89 ore e la precipitazione insistette incessantemente per oltre 24 h. L'eccezionalità dell'evento è legata alla persistenza del fenomeno. Il territorio ne uscì indebolito e particolarmente compromesso.

2.5 Novembre 2020 - Crotona

Un significativo evento, che recentemente ha seminato distruzione e panico, riguarda la provincia di Crotona. L'altezza cumulata nelle 24 ore ha raggiunto i 250 mm in molti comuni. Per tutta la durata dell'evento sono caduti l'equivalente di 2/3 di pioggia di un intero anno. Secondo il rapporto trasmesso dall'Arpacal, l'analisi dei dati pluviometrici ha consentito di accertare l'eccezionalità dell'evento. Dallo studio delle serie storiche dei massimi annuali è stato possibile riscontrare che il valore dell'altezza cumulata di pioggia registrata il 21 Novembre è stato il più alto dal 1916.

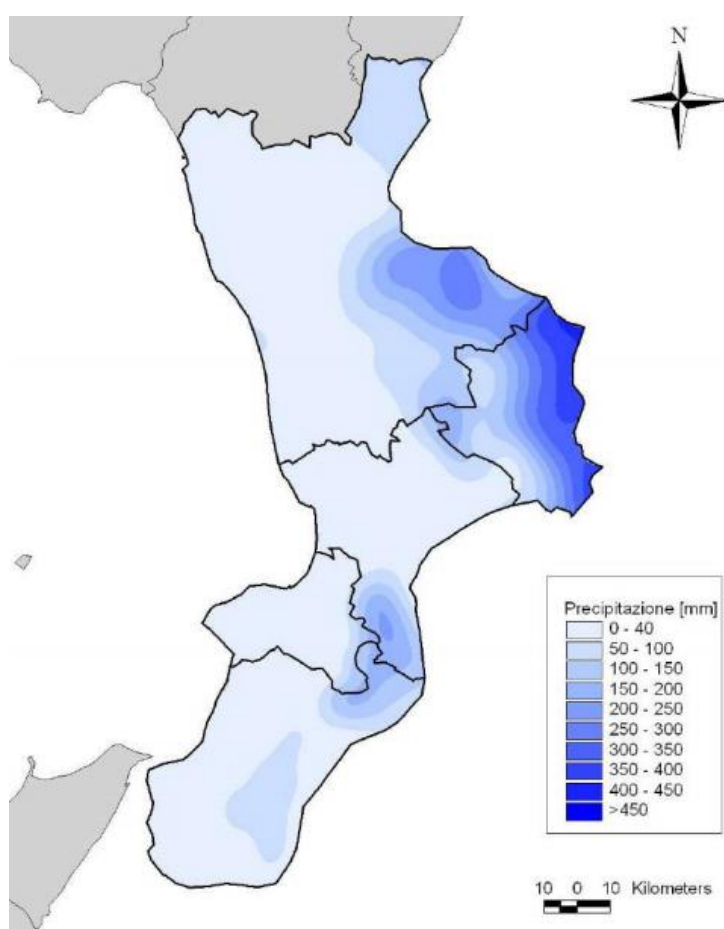


Fig. 2.11 Arpacal - Mappa delle precipitazioni cumulate durante tutto l'evento.

L'ondata di maltempo è stata generata dalla formazione di un vortice ciclonico in concomitanza con la discesa di aria fredda. La convergenza dei venti di Grecale da Nord- Est e di Scirocco da Sud- Est hanno dato origine al fenomeno, come mostrato in figura 2.12. La fase acuta di maltempo si è avuta per la straordinaria stazionarietà del ciclone. L'occhio del fenomeno atmosferico è rimasto fermo sulle medesime aree per circa 40 ore.

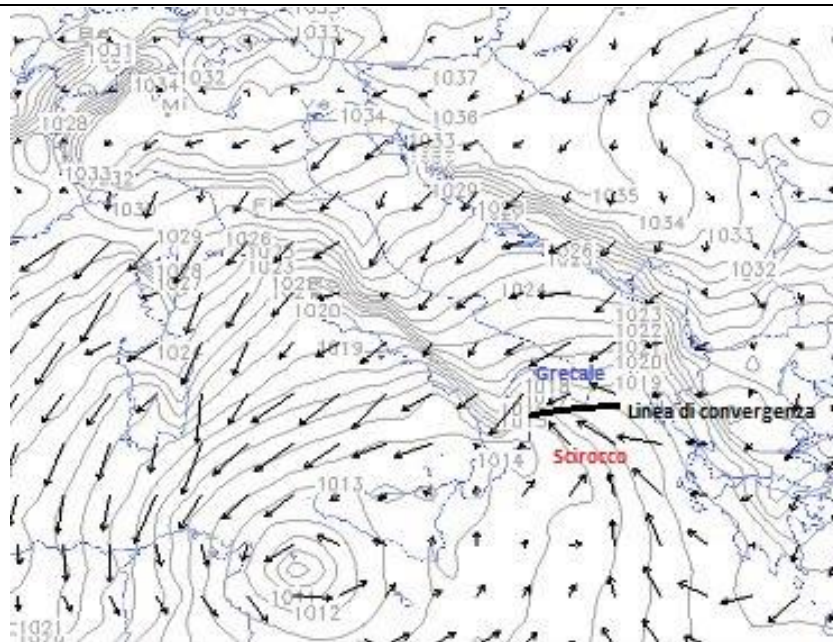


Fig. 2.12 Convergenza dei venti di Grecale e di Scirocco verso il centro di bassa pressione.

In conseguenza di tale evento eccezionale, si è verificata l'esonazione del fiume Esaro che ha causato allagamenti e criticità in numerose zone. Negozi ed abitazioni sono stati invasi da fango e acqua. Le strade sono diventati fiumi e in molti tratti si sono verificati importanti cedimenti strutturali. Numerose le auto in trappola e le persone in difficoltà. In via precauzionale sono state evacuate diverse abitazioni.



Fig. 2.13 Allagamenti e dissesti a Crotona nel Novembre 2020.

Le forti raffiche di vento hanno generato anche violente mareggiate. Le spiagge e i centri limitrofi sono stati invasi dalle acque.



Fig. 2.14 Inondazioni costiere dovute alle piogge intense e alle mareggiate.

Gli eventi presentati sono ben rappresentativi di una problematica ricorrente nelle zone costiere calabresi.

Lo studio condotto sui 113 comuni che si affacciano al mare, è stato possibile esaminando 3 databases. In una prima fase sono state individuate le alluvioni e, solo successivamente, si è accertata la manifestazione della mareggiata. Questo procedimento non può essere applicato in maniera biunivoca in quanto l'agitazione ondosa a ridosso dei litorali è molto frequente. Infine, per alcune zone costiere rappresentative delle due fasce, è stato possibile indagare sulle condizioni scatenanti la contemporaneità. La metodologia applicata è di seguito presentata.

CAPITOLO III
Metodologia di analisi

CAPITOLO III

Metodologia di analisi

3.1 Database ASICal

La prima fase dello studio ha riguardato l'analisi degli eventi di dissesto idrogeologico che hanno colpito i comuni costieri dal 1979 al 2018. Per conoscere e studiare le alluvioni verificatisi in Calabria, è stato necessario collocare temporalmente e spazialmente i fenomeni. Le informazioni utili all'esamina di tali eventi sono state raccolte, in maniera sistematica, da un gruppo di ricercatori di Cosenza. I dati digitalizzati costituiscono la banca ASICal (Aree Storicamente Inondate in Calabria).

L'attività di repertorio è stata avviata dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) del Consiglio Nazionale di Ricerca (CNR) di Cosenza e dall'Osservatorio di Documentazione Ambientale del Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria. I primi dati provengono da pubblicazioni tecnico scientifiche, da scritti storici sul dissesto idrogeologico e da storiografie dei centri abitati regionali. I resoconti risalenti alla fine dell'Ottocento e fino al 1980, sono stati raccolti grazie alla collaborazione dell'Archivio di Stato di Cosenza. I documenti riguardano richieste di interventi, sopralluoghi, testimonianze e relazioni tecniche redatte da funzionari che descrivono il fenomeno e riportano dati attendibili sui danni registrati. Una grande mole di dati è stata recuperata dallo spoglio dei quotidiani regionali. La consultazione degli articoli cartacei è stata processata fino al 1998. Da tale anno è stato possibile procedere con la selezione del materiale presente nell'archivio on-line delle testate giornalistiche (PETRUCCI & VERSACE, 2004). L'implementazione degli eventi più recenti è stata attuata grazie alle informazioni provenienti da agenzie di stampa e da associazioni locali. In particolare la serie storica ricostruita per il XX secolo risulta essere particolarmente attendibile, per via dei controlli incrociati eseguiti sulla grande quantità di dati pervenuti. Il database potrebbe presentare delle lacune dovute all'impossibilità di reperire informazioni su tutti i fenomeni di dissesto. Le notizie raccolte sono organizzate in strutture eterogenee contenenti un insieme di campi: anno, mese, giorno, descrizione dell'evento e località. La presentazione del fenomeno di dissesto avviene in termini di tipologia (frana, esondazione, mareggiata), di danni materiali ed immateriali e di

interventi effettuati. Spesso la descrizione è corredata e integrata da immagini e foto, come indicato nelle figure seguenti:



Fig. 3.1 Esondazione del fiume Crati avvenuta a Cosenza nel 1959.

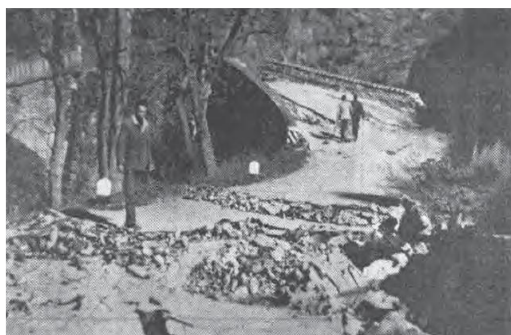


Fig. 3.2 Alluvione del dicembre 1972 a Reggio Calabria.

La raccolta di dati storici fornisce un utile spunto di indagine sulla conoscenza delle aree più esposte ai fenomeni di dissesto e sui cambiamenti che il territorio subisce nei decenni per l'azione aggressiva delle condizioni meteorologiche (PETRUCCI & POLEMIO, 2003).

Ai fini dello studio degli eventi alluvionali che hanno provocato esondazioni o piene, sono stati esaminati 6379 records. Dai fenomeni di dissesto analizzati (frane, smottamenti, mareggiate, condizioni meteorologiche avverse, ecc.), sono state estrapolate le informazioni inerenti il giorno dell'evento e la località colpita. Sono state inoltre desunte notizie riguardanti i torrenti straripati e che hanno provocato danni alle opere di regimentazione delle acque in condizioni di piena. Con i rapporti forniti dall'Arpacal attraverso la Carta Idrografica della Regione Calabria, è stato possibile ricavare le caratteristiche geometriche di ogni fiumara: superficie del bacino idrografico, lunghezza dell'asta principale, pendenza media, quota media. Tali informazioni sono necessarie per comprendere il rapporto tra l'entità dell'evento e le dimensioni fisiche del torrente interessato dall'alluvione. In particolare l'attenzione è stata posta sulla data di manifestazione dell'evento, presupposto necessario per l'accertamento della contemporaneità con la mareggiata. La seconda fase del progetto ha riguardato l'elaborazione dei dati contenuti nel database del gruppo MeteOcean, di seguito presentato.

3.2 Database dei dati meteomarini e atmosferici

Il gruppo MeteOcean del DICCA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale) dell'Università di Genova ha fornito un database di dati atmosferici e meteomarini per la Calabria. Il modello operativo presso il Dipartimento e in grado di restituire la propagazione delle onde, è il WavewatchIII. Le equazioni che lo governano simulano le variazioni, nel tempo e nello spazio, dell'elevazione del mare e della corrente superficiale, l'oscillazione media della superficie prodotta dal vento, la dissipazione e gli effetti dovuti all'attrito con il fondo. Il gruppo MeteOcean fornisce quotidianamente le previsioni di onde, sfruttando il Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). I dati sono riferiti ad una griglia di punti distanti 10 km per l'intero bacino del Mediterraneo e soltanto 2 km per il Mar Tirreno settentrionale.



Fig. 3.3 Mappatura rappresentativa di una parte del Mediterraneo.

Sulla stessa griglia e con lo stesso modello operativo impiegato per la previsione, il gruppo MeteOcean ha effettuato lo studio hindcast. È stata sviluppata un'analisi retrospettiva per il periodo che va dal 1° gennaio 1979 al 31 dicembre 2018, con una risoluzione di $0,1^\circ$. In particolare si è proceduto alla simulazione dei venti e dei campi atmosferici. Per la descrizione della generazione di onde e dei processi di evoluzione si è ricorso nuovamente al modello d'onda di terza generazione WavewatchIII. La validazione di questi dati è stata effettuata confrontando i risultati numerici e le registrazioni delle boe ondametriche.

I nodi della maglia scelti per la Calabria sono 52 (Tab.3.1). Molti sono rappresentativi delle condizioni meteomarine e atmosferiche di più comuni limitrofi. In alcuni casi, invece, sono stati individuati più punti per uno stesso comune.

COMUNI COSTIERI	PUNTO	PROFONDITA' FONDALE [m]	LAT [°N]	LONG [°E]
<i>Rocca Imperiale, Montegiordano</i>	4530	125.32	40.08	16.7654
<i>Roseto Capo Spulico</i>	4689	186.75	39.99	16.7654
<i>Amendolara, Trebisacce</i>	4848	180.04	39.90	16.7654
<i>Villapiana, Cassano allo Ionio</i>	5011	357.56	39.81	16.6380
<i>Corigliano Calabro, Rossano</i>	5173	343.46	39.72	16.6380
<i>Crosia, Calopezzati, Pietrapaola</i>	5333	587.05	39.63	16.8927
<i>Mandatoriccio, Scala Coeli, Cariatì</i>	5496	309.57	39.54	17.0200
<i>Crucoli, Cirò</i>	5497	651.84	39.54	17.1474
<i>Cirò Marina</i>	5832	870.21	39.36	17.2747
<i>Melissa, Strongoli</i>	6004	1005.92	39.27	17.2747
<i>Crotone</i>	6177	216.87	39.18	17.2747
<i>Isola Capo Rizzuto</i>	6528	617.87	39.00	17.2747
<i>Isola Capo Rizzuto</i>	6715	779.56	38.91	17.2747
<i>Isola Capo Rizzuto</i>	6900	735.76	38.82	17.1474
<i>Cutro</i>	6899	854.33	38.82	17.0200
<i>Botricello, Cropani, Belcastro</i>	6898	434.91	38.82	16.8927
<i>Sellia Marina, Simeri Crichi, Catanzaro</i>	6897	461.27	38.82	16.7654
<i>Borgia, Squillace, Staletti, Montauro, Montepaone, Soverato</i>	7080	659.91	38.73	16.6380
<i>Satriano, Davoli, San Sostene, Sant'Andrea, Isca</i>	7262	647.27	38.64	16.6380
<i>Badolato, Santa Caterina dello Ionio</i>	7443	86.56	38.55	16.6380
<i>Guardavalle, Monasterace</i>	7624	112.42	38.46	16.6380
<i>Stilo, Camini, Riace</i>	7807	332.44	38.37	16.6380
<i>Stignano, Caulonia</i>	7990	756.19	38.28	16.5107
<i>Roccella Ionica, Marina di Gioiosa, Grotteria, Siderno</i>	7989	145.22	38.28	16.3834
<i>Locri, Portigliola, Sant'Ilario dello Ionio, Ardore</i>	8168	335.88	38.19	16.2560

<i>Bovalino, Casignana, Bianco, Africo</i>	8344	729.73	38.10	16.2560
<i>Ferruzzano, Bruzzano Zeffirio</i>	8514	912.91	38.01	16.2560
<i>Brancaleone</i>	8685	316.28	37.92	16.1287
<i>Palizzi, Bova Marina</i>	8864	1279.84	37.83	16.0014
<i>Condefuri, San Lorenzo</i>	8863	1339.83	37.83	15.8740
<i>Melito Porto Salvo</i>	8862	1423.84	37.83	15.7467
<i>Montebello, Motta San Giovanni, Reggio Calabria</i>	8683	1298.21	37.92	15.6194
<i>Villa San Giovanni, Scilla, Bagnara, Seminara</i>	7988	120.43	38.28	15.7467
<i>Palmi, Gioia Tauro, S. Ferdinando</i>	7622	352.93	38.46	15.7467
<i>Nicotera, Joppolo</i>	7442	213.32	38.55	15.8740
<i>Ricadi</i>	7261	460.88	38.64	15.7467
<i>Tropea, Parghelia, Zambrone</i>	7078	361.86	38.73	15.8740
<i>Briatico</i>	6895	435.03	38.82	16.0014
<i>Vibo Valentia, Pizzo Calabro, Curinga</i>	6896	256.32	38.82	16.1287
<i>Lamezia Terme, Gizzeria</i>	6711	142.64	38.91	16.1287
<i>Falerna, Nocera Terinese</i>	6527	317.79	39.00	16.0014
<i>Amantea</i>	6350	340.42	39.09	16.0014
<i>Belmonte, Longobardi</i>	6175	319.39	39.18	16.0014
<i>Fiumefreddo Bruzio, Falconara Albanese, San Lucido</i>	6002	224.11	39.27	16.0014
<i>Paola, Fuscaldo</i>	5830	101.16	39.36	16.0014
<i>Guardia Piemontese, Acquappesa, Cetraro</i>	5659	473.31	39.45	15.874
<i>Bonifati, Sangineto</i>	5493	412.29	39.54	15.7467
<i>Belvedere Marittimo</i>	5331	181.05	39.63	15.7467
<i>Diamante, Grisolia, Santa Maria del Cedro</i>	5172	218.36	39.72	15.7467
<i>Scalea</i>	5009	122.51	39.81	15.7467
<i>San Nicola Arcella, Tortora</i>	4846	161.83	39.90	15.7467

Tab. 3.1 Punti della maglia scelti per i comuni costieri calabresi.



Fig. 3.4 Mappatura della Calabria.

Per ciascun nodo e con passo temporale di 1 ora sono state fornite le serie storiche dei seguenti parametri:

- ✓ altezze significative in m;
- ✓ periodo medio e di picco in s;
- ✓ componenti orizzontali e verticali della velocità del vento in m/s;
- ✓ umidità relativa a 2 m in %;
- ✓ umidità specifica a 2 m in kg/kg;
- ✓ temperatura a 2 m in °K;
- ✓ pressione atmosferica a 2 m in Pa.

L'accertamento della contemporanea mareggiata è stato garantito dall'elaborazione delle altezze significative, applicando la teoria di Boccotti (*BOCCOTTI, 2015*). Nota la data dell'alluvione, sono state estrapolate le serie storiche centrate rispetto al giorno dell'evento. Nel paragrafo successivo sarà presenta la formulazione analitica a base dello studio.

3.3 Analisi dei dati meteomarini e studio delle mareggiate

Si definisce *stato di mare reale* una successione di onde consecutive, sufficientemente piccola da poterla ritenere stazionaria ma abbastanza grande da poter essere rappresentativa della condizione del mare. Solitamente si considerano 100-300 onde. Fissato un punto in mare, la registrazione dell'elevazione d'onda $\eta(t)$ in funzione del tempo, restituisce la seguente forma:

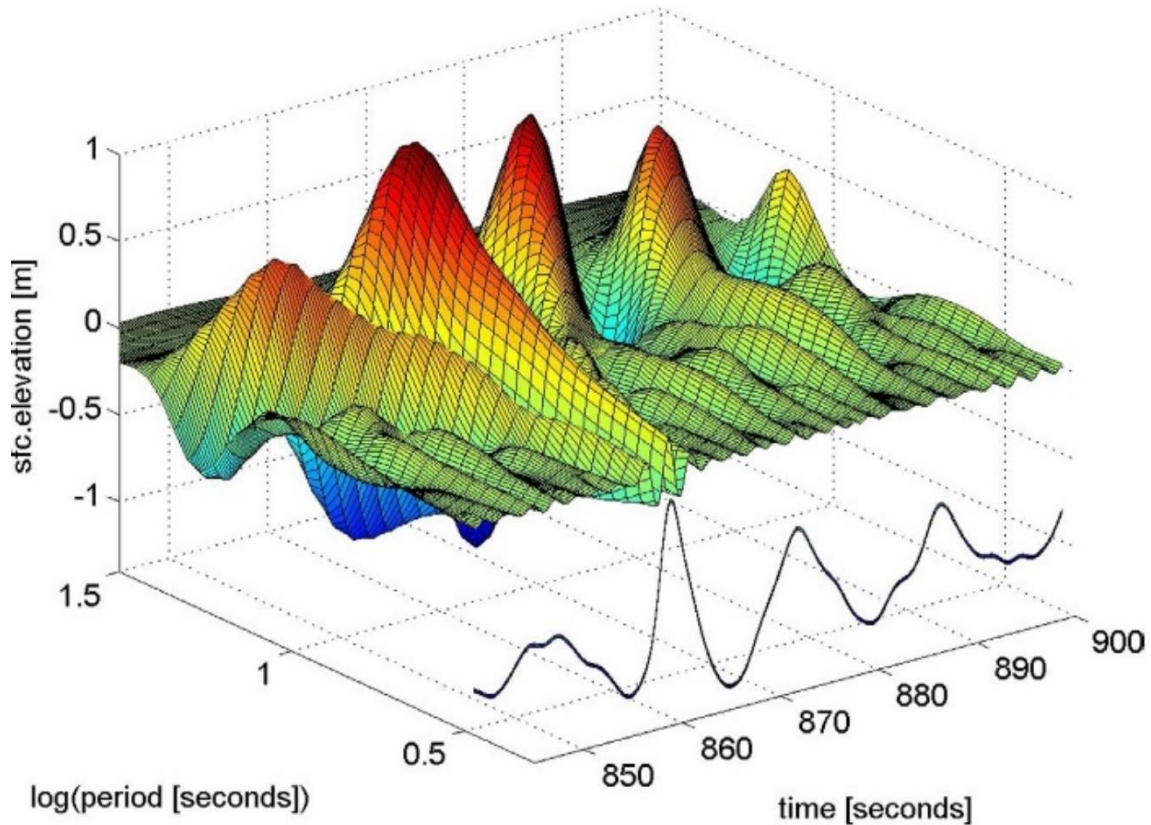


Fig. 3.5 Elevazione d'onda nel tempo.

Nota l'elevazione d'onda, è possibile introdurre il concetto di *altezza significativa* dello stato di mare:

$$H_s(t) = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \eta^2(t') dt'} \quad (3.1)$$

La funzione è aleatoria, continua e gradualmente variabile. Si può ritenere che di località in località, il valor medio di $H_s(t)$ non sia costante (BOCCOTTI, 2015).

L'analisi delle altezze significative consente di individuare le mareggiate. Secondo la definizione di Boccotti (BOCCOTTI, 2015) per mareggiata si intende "Una successione di stati di mare durante

la quale l' $H_s(t)$ supera una soglia critica h_{crit} e non scende al di sotto di tale soglia per durate di tempo superiori ad un valore Δt_{crit} prefissato". Per il Mediterraneo l'intervallo di tempo critico è 12 ore.

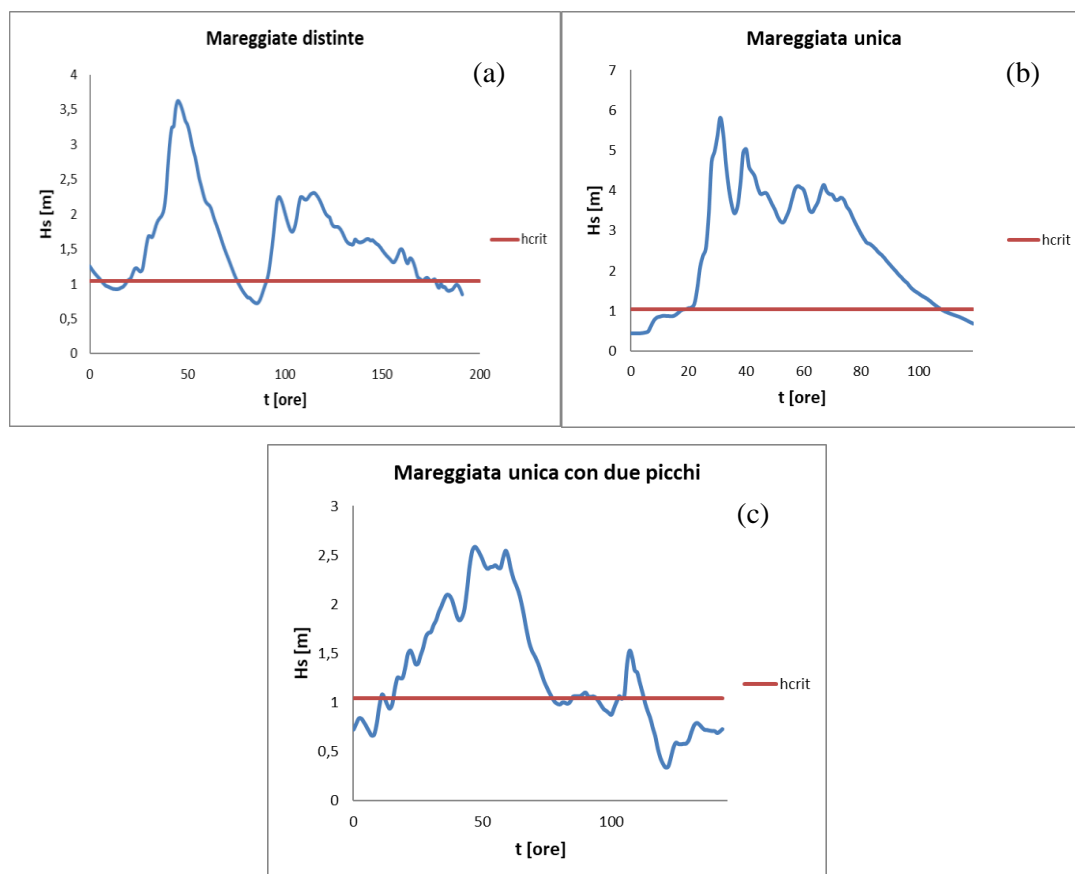


Fig. 3.6 Mareggiate distinte (a); mareggiata unica (b); mareggiata unica con due picchi (c).

La soglia critica è strettamente legata alla località oggetto di studio, essendo dipendente dall'altezza significativa media secondo l'espressione (ARENA & BARBARO, 1999):

$$h_{crit} = 1.5\bar{H}_s \quad (3.2)$$

L'altezza significativa media è valutata sull'intera serie storica di ogni punto della maglia scelto. Sono state determinate 52 altezze critiche.

L'individuazione della mareggiata è stata effettuata estrapolando le H_s dal database e centrando il giorno dell'alluvione. In molti casi l'intervallo temporale di osservazione è stato ampliato, in quanto l'agitazione ondosa ha avuto inizio precedentemente o si è conclusa successivamente l'evento di pioggia.

Secondo la teoria di Boccotti (BOCCOTTI, 2015) ad ogni mareggiata vera è possibile associare una mareggiata triangolare equivalente (MTE). La particolarità della mareggiata triangolare sta nella

sua rappresentazione. È caratterizzata da un'altezza a pari all'altezza significativa massima della mareggiata vera ed una base b ottenuta imponendo che l'altezza d'onda massima attesa delle due mareggiate (reale e triangolare) sia coincidente. Mentre l'altezza a è determinata direttamente dalla serie temporale, la base b è ricavata procedendo iterativamente. La figura mostra le due mareggiate a confronto:

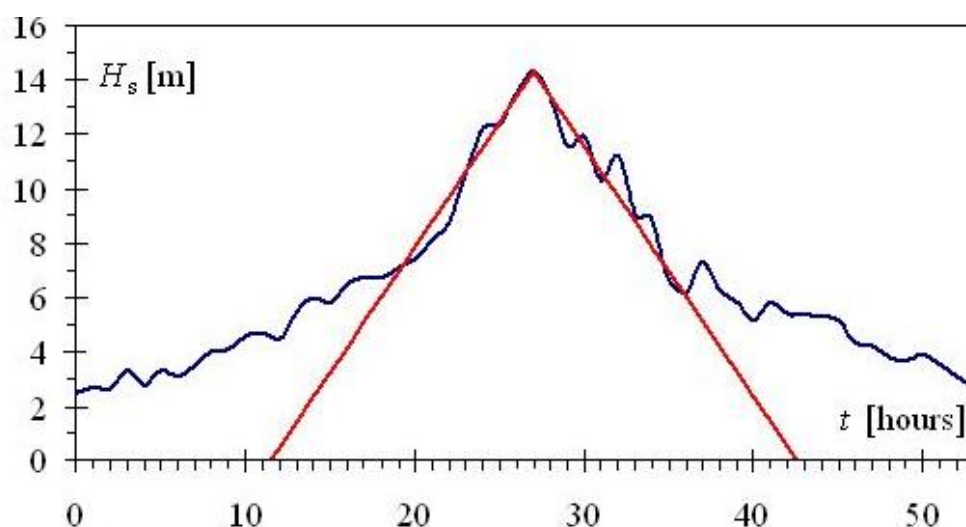


Fig. 3.7 Confronto tra la mareggiata triangolare equivalente e la mareggiata vera.

È possibile dunque definire il periodo di ritorno come segue:

$$T(H_s > h) = \frac{b_{10} \left(1.12 - 0.12 \frac{h_t}{a_{10}} \right)}{1 + u \left(\frac{h_t}{w} \right)^u} \exp \left(\frac{h_t}{w} \right)^u \quad (3.3)$$

In cui h è la soglia da superare; a_{10} e b_{10} rappresentano l'altezza media e la durata media delle N mareggiate, calcolate come le 10 mareggiate più forti individuate per ogni anno di registrazione (su 10 anni di registrazione, $N=10n_{\text{anni}}=100$). I parametri w e u sono caratteristici della località in esame e rientrano nella probabilità omnidirezionale di superamento, la cui distribuzione è di tipo Weibull.

In particolare il fattore w ha le dimensioni di una lunghezza e rappresenta un fattore scala del moto ondoso. Tanto più è grande tale valore, tanto più evidente è l'agitazione ondosa. Il parametro u è adimensionale ed influenza il rapporto tra le altezze significative calcolate per diverse soglie di probabilità. Maggiore è il rapporto, minore risulterà u .

Per approfondire le cause scatenanti la contemporaneità di alluvioni e di mareggiate, si è proceduto all'analisi di un terzo database, contenente i dati storici pluviometrici.

3.4 Database dei dati pluviometrici

Accertata la contemporanea manifestazione della mareggiata si è proceduto all'analisi quantitativa dell'evento di pioggia. Sono stati scelti 18 comuni costieri rappresentativi delle fasce ionica e tirrenica. Per l'esame dei dati storici pluviometrici si è fatto ricorso ad un terzo database, gestito dal Centro Funzionale Multirischi (CFM) dell'Arpacal (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Calabria). Il CFM svolge attività di monitoraggio, di sorveglianza e di registrazione dei fenomeni meteorologici della Regione Calabria. Rientra nella rete di Centri di monitoraggio di cui fanno parte tutti i centri funzionali decentrati italiani e il Dipartimento di Protezione Civile. Attraverso l'elaborazione dei dati meteo-idro-pluviometrici e dei dati geologici e geomorfologici, vengono effettuate modellazioni circa gli scenari probabili attesi. Il Centro Funzionale ha il compito di emettere avvisi e bollettini da diramare, in merito al livello di allerta del fenomeno in atto. Fornisce un costante supporto alla Protezione Civile regionale e nazionale. Per quanto concerne i monitoraggi, l'Arpacal gestisce le 146 stazioni di misura distribuite sul territorio calabrese.



Fig. 3.8 Stazioni di monitoraggio gestite dal Centro Funzionale Multirischi dell'Arpacal.

Per ciascuna delle stazioni in Figura 3.8, è possibile consultare i dati storici delle piogge, delle portate e dei parametri meteorologici. In particolare, per le precipitazioni, il database contiene le altezze cumulate per durata inferiore al giorno, le serie dei massimi annuali, le serie mensili e giornaliere.

Al fine di determinare l'intensità di pioggia di ciascun evento alluvionale, si è proceduto con la scelta dei pluviometri prossimi al mare e più vicini ai torrenti esondati o in piena. Sono stati individuati 22 stazioni di monitoraggio dalle quali è stato possibile estrapolare le altezze cumulate di pioggia orarie.



Fig. 3.9 Pluviometri scelti per lo studio degli eventi alluvionali principali.

Note le altezze di pioggia cumulate, sono state determinate le intensità di precipitazione di ogni singolo evento. La valutazione quantitativa ha consentito definire l'entità dei fenomeni e di relazionare le grandezze con i parametri atmosferici principali.

3.5 I parametri meteo-climatici

Le previsioni meteorologiche sono determinate dall'analisi di numerosi parametri atmosferici. Si parla di *tempo atmosferico* se la situazione meteo studiata è relativa ad un intervallo temporale ristretto; si chiama *clima* la successione delle condizioni meteorologiche in un dato luogo, per un tempo molto lungo. In entrambi i casi, i parametri fisici principali alla base dello studio sono:

- ✓ la temperatura;
- ✓ la pressione;
- ✓ i venti;
- ✓ l'umidità relativa e assoluta.

I parametri elencati sono misurabili attraverso opportuni strumenti e sono traducibili in numeri. Sono proprio tali elementi, combinandosi, a condizionare e influenzare il tempo atmosferico (BRUGNONI ET ALII, 2006).

LA TEMPERATURA

La temperatura esprime lo stato di agitazione termica delle molecole dell'aria. Quando due masse di proprietà termiche diverse entrano in contatto, avviene un trasferimento di calore fino al raggiungimento dell'equilibrio. La massa a temperatura più alta cede energia termica a quella a temperatura più bassa. La distribuzione spaziale di tale parametro consente di valutare l'escursione termica annua. All'Equatore è minima e ai Poli è massima. La maggior capacità termica dei mari rispetto alle terre influisce sulla variazione di temperatura registrata durante l'anno. È minore in prossimità delle coste e molto elevata nelle zone dell'entroterra.

I fattori che provocano l'agitazione termica sono:

- ✓ altitudine;
- ✓ latitudine;
- ✓ distribuzione delle terre e dei mari;
- ✓ venti e correnti marine;
- ✓ distribuzione delle catene montuose;
- ✓ esposizione;
- ✓ copertura nuvolosa;
- ✓ vegetazione.

A causa della radiazione emessa dal suolo, gli strati bassi dell'atmosfera si riscaldano. Nella troposfera, perciò, la temperatura diminuisce di circa 6.5°C ogni 1000 m. L'andamento della temperatura in funzione dell'altezza geopotenziale è di seguito presentato:

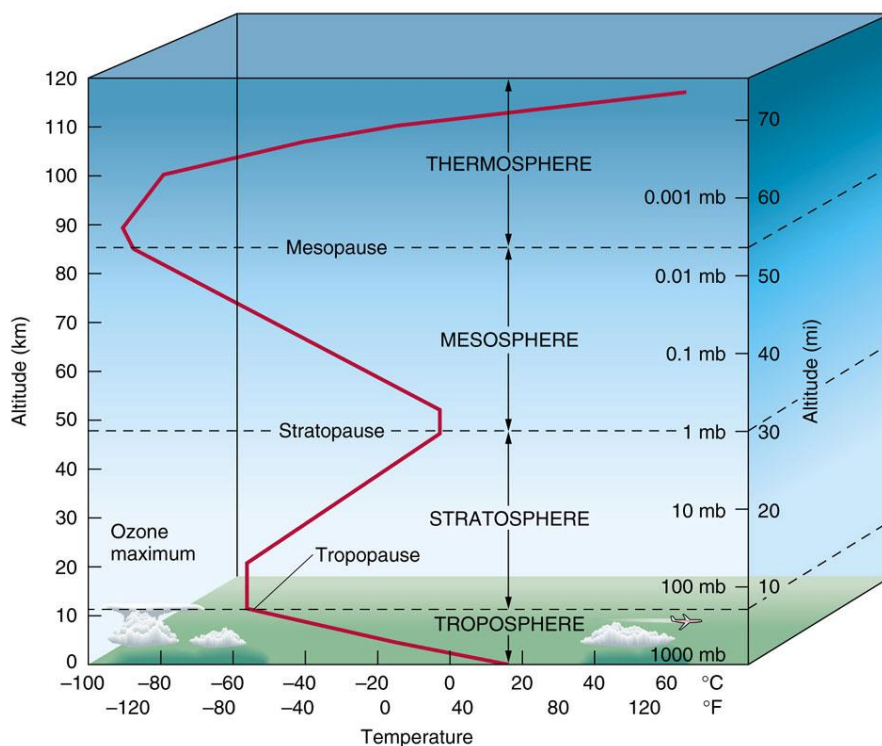


Fig. 3.10 Variazione della temperatura dell'aria con l'altitudine.

Un altro importante fattore d'influenza elencato è il vento. La circolazione dell'aria consente una redistribuzione dell'energia termica fungendo da regolatore di temperatura. L'importanza della conoscenza di tale parametro nasce dal condizionamento che genera nella stabilità verticale dell'atmosfera. I moti convettivi e le condizioni associate di cattivo tempo (per moti ascendenti) e di bel tempo (per moti discendenti) dipendono dalla temperatura (GIUFFRIDA & SANSOSTI, 2006). In un'analisi a lungo termine, si osserva che le escursioni termiche nel tempo caratterizzano il clima di una località.

La temperatura influenza diverse grandezze fisiche: la densità, la pressione e l'umidità. Masse d'aria calda risultano essere meno dense e più rarefatte delle masse d'aria fredda.

Il Sistema Internazionale impone di esprimere la misura di tale grandezza utilizzando la scala Kelvin (°K). Comunemente, in meteorologia, si predilige il grado Celsius o grado centigrado (°C). Il passaggio da una scala all'altra è possibile attraverso la seguente equazione:

$$t^{\circ C} = t^{\circ K} - 273,15 \quad (3.4)$$

LA PRESSIONE

La colonna d'aria che sovrasta l'unità di superficie terrestre esercita, con il suo peso, una pressione chiamata *pressione atmosferica*. L'unità di misura in meteorologia è l'ettopascal (hPa) e il valor medio al livello del mare è di 1013.25 hPa. La variabilità nello spazio e nel tempo è da imputare a diversi fattori:

- ✓ altitudine;
- ✓ temperatura;
- ✓ umidità.

Allontanandosi dal suolo la pressione esercitata dal peso dell'aria diminuisce. Salendo di quota si registra una riduzione 1 hPa per ogni 10 m.

Come accennato in precedenza, la temperatura influisce sulla pressione. Riscaldandosi, l'aria si dilata, diventa meno densa e quindi meno pesante nell'unità di superficie. La massa tende a salire, comportando una diminuzione di pressione sottostante. Al contrario, l'abbassamento di temperatura provoca un addensamento dell'aria che tende a spostarsi verso il basso con il conseguente aumento della pressione sulla superficie terrestre. Anche l'umidità esercita un effetto determinante. Le masse umide sono più leggere di quelle secche. Le particelle d'acqua sono meno pesanti di molte altre componenti presenti in atmosfera e determinano un abbassamento della pressione (BRUGNONI ET ALII, 2006). Le variazioni giornaliere sono causate da molteplici fattori. L'andamento e l'ampiezza delle oscillazioni dei valori dipendono molto dalla località in esame. La distribuzione del parametro è variabile nello spazio e nel tempo. La linea che congiunge i punti alla stessa pressione è definita *isobara*. Dall'analisi delle forme assunte da tali linee, si possono distinguere le principali configurazioni bariche:

- ✓ il ciclone o zona di bassa pressione, individuata da isobare chiuse, circolari o ellittiche, il cui valore decresce dalla periferia verso il centro;
- ✓ l'anticiclone o zona di alta pressione, individuata da isobare chiuse, circolari o ellittiche, il cui valore decresce procedendo dal centro verso la periferia;
- ✓ la sella, formata da due anticicloni e due cicloni i cui centri (di alta e bassa pressione) sono opposti gli uni agli altri;
- ✓ il promontorio ha la forma di U rovesciata. È un'area dell'anticiclone che separa due depressioni.

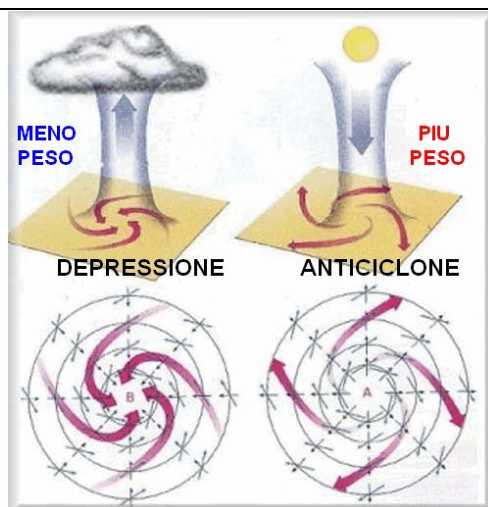


Fig. 3.11 Struttura di un ciclone e di un anticiclone.

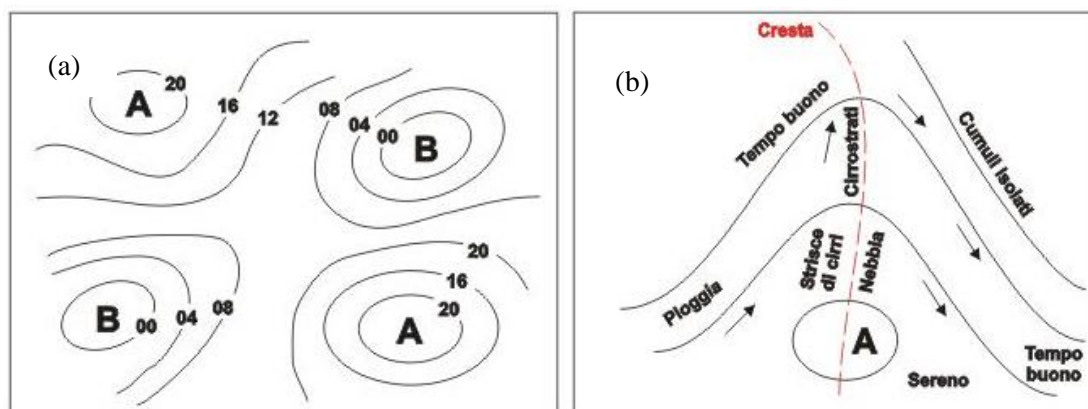


Fig. 3.12 Principali configurazioni bariche: a) sella; b) promontorio.

La vicinanza tra le isobare indica una variazione piuttosto marcata della pressione. Le linee molto fitte rappresentano il segnale di una forza di gradiente diretta dalla zona di alta pressione a quelle di bassa. La movimentazione delle masse genera il vento. Generalmente si associa il cattivo tempo alle zone di bassa pressione e il bel tempo alle zone di alta pressione. In realtà, per una corretta valutazione occorre esaminare la tendenza barometrica, cioè la variazione che si ha in 3 ore per tale parametro. L'abbassamento o l'innalzamento sono segnali di un peggioramento o un miglioramento nelle condizioni atmosferiche.

Nelle aree anticicloniche l'aria fredda e secca tende a spostarsi verso il basso e a divergersi con moto vorticoso in corrispondenza delle zone circostanti di bassa pressione. Nelle aree cicloniche avviene l'opposto. L'aria calda e umida converge verso il centro di bassa pressione e si solleva in quota dando luogo a nubi e precipitazioni.

Gli spostamenti delle masse d'aria, generano i venti. Dalle zone cicloniche salgono, si raffreddano e si dirigono orizzontalmente verso le aree anticicloniche. Quindi discendono al suolo e convergono nuovamente verso le zone di bassa pressione, chiudendo il ciclo. La circolazione delle masse d'aria avviene all'interno delle celle convettive:

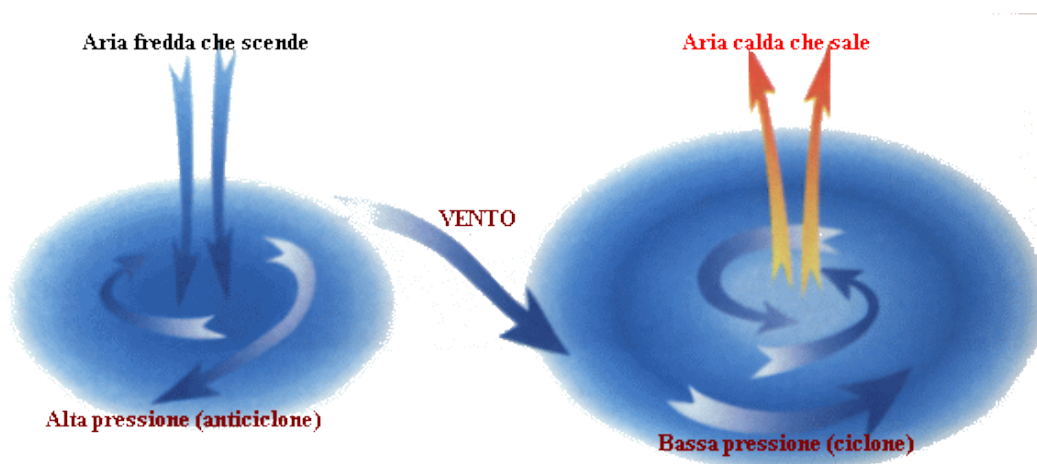


Fig. 3.13 Spostamenti delle masse d'aria tra le zone anticicloniche e cicloniche.

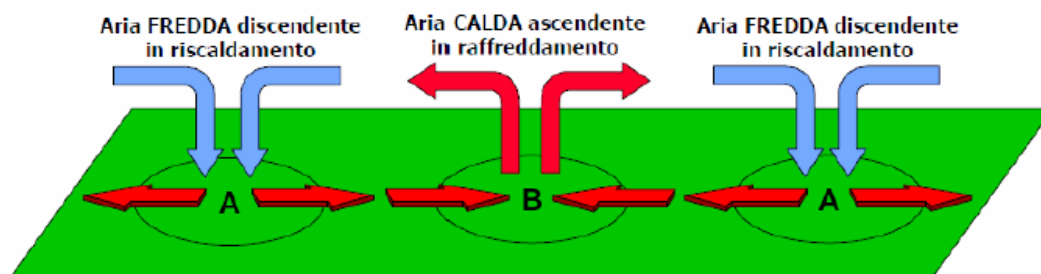


Fig. 3.14 Cella convettiva. Circolazione delle masse d'aria.

Gli spostamenti sono controllati e originati dal gradiente barico, ossia il rapporto della differenza di pressione tra l'area ciclonica e anticiclonica, con la loro distanza. Tanto maggiore è il gradiente, tanto elevata sarà la velocità del vento. Per quanto riguarda la direzione di spostamento delle masse, entrano in gioco diversi fattori che deviano la traiettoria teorica prevista dal gradiente barico. Le cause sono da imputare a:

- ✓ la forza di Coriolis;
- ✓ la forza di attrito;
- ✓ la forza centrifuga;
- ✓ gli ostacoli orografici.

La forza di Coriolis devia i venti fino a portarli in direzione quasi parallela a quella delle isobare. È dovuta alla rotazione della Terra attorno al proprio asse. Tutti i punti appartenenti al sistema Terra-atmosfera hanno la stessa velocità angolare ed impiegano lo stesso tempo a compiere un giro completo. La distanza percorsa però, è diversa e cresce dai Poli all'Equatore. In conseguenza di ciò, la velocità lineare della rotazione aumenta al diminuire della latitudine. Le masse d'aria che provengono dai Poli si muovono da zone in moto più lento a zone in moto più rapido. Essendo che la rotazione della Terra attorno al proprio asse avviene da Ovest verso Est, l'azione della forza di Coriolis fa sì che i venti siano deviati alla loro destra nell'emisfero boreale e alla loro sinistra nell'emisfero australe.

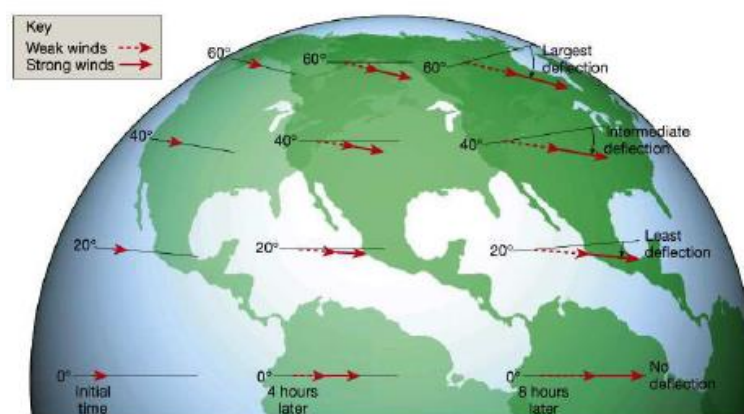


Fig. 3.15 Deviazione di Coriolis sui venti che soffiano a diverse latitudini.

Tra i fattori devianti la direzione dei venti rientra la forza di attrito. È proporzionale alla velocità del vento ma ha verso opposto e agisce come azione frenante. Il movimento delle masse d'aria è influenzato anche dalla forza centrifuga che imprime una deviazione alla traiettoria curvilinea verso l'esterno (*BRUGNONI ET ALII, 2006*). Nei cicloni la forza centrifuga spinge l'aria verso la periferia e agisce in direzione opposta alla forza motrice (forza di gradiente). Negli anticicloni invece, la forza centrifuga è in sintonia con la forza di gradiente. Il vento è dunque più intenso nei cicloni che negli anticicloni. Questi ultimi presentano infatti, isobare più distanti, segno di una forza debole. Inoltre, in presenza di rilievi montuosi si verifica la convezione forzata. La massa d'aria è costretta a risalire il versante, si raffredda e condensa, generando nebbia, nubi o pioggia (*GIUFFRIDA & SANSOSTI, 2006*).

I venti possono essere distinti in planetari e locali. I primi sono responsabili della circolazione generale dell'atmosfera. Oggetto di particolare interesse sono i venti locali che compiono brevi traiettorie e si ripetono con frequenza. Sono proprio questi a caratterizzare le condizioni meteorologiche e climatiche di un territorio.

L'UMIDITA'

L'umidità esprime il contenuto di vapore acqueo presente nell'atmosfera. La quantità varia tra lo 0,2% al 4% per effetto dell'evaporazione dell'acqua dalle superfici liquide della Terra. L'immagazzinamento di vapore d'acqua non avviene indefinitamente. Raggiunto il limite possibile si dice che la massa d'aria è satura e la temperatura alla quale si verifica questa condizione è detta *temperatura di rugiada*. L'ulteriore aggiunta di particelle di vapore è eliminata con la condensazione (passaggio dallo stato aeriforme allo stato liquido) o sublimazione (passaggio dallo stato aeriforme a quello solido).

Il grado di umidità è principalmente espresso attraverso due grandezze igrometriche: l'umidità assoluta e l'umidità relativa. L'umidità assoluta è il peso di vapore acqueo presente nell'unità di volume di aria secca (g/cm^3). Rappresenta la tensione che il vapore esercita in 1 m^3 di aria. Non essendo di facile determinazione è scarsamente utilizzata. L'umidità relativa è una grandezza adimensionale, espressa dal rapporto percentuale fra la quantità di vapore acqueo contenuto in una massa d'aria (g_v) e la quantità di vapore massima (G_v) che lo stesso ambiente potrebbe contenere per essere saturo, alle medesime condizioni di temperatura e di pressione:

$$U_r = \frac{g_v}{G_v} \cdot 100 \quad (3.5)$$

A differenza dell'umidità assoluta, l'umidità relativa fornisce lo stato dell'aria rispetto alla saturazione. Considerando una massa che presenta una $U_r = 85\%$, si può dedurre che l'aria alla stessa temperatura, può assorbire ancora il 15% dell'umidità necessaria prima di diventare satura. La distribuzione nello spazio e nel tempo dell'umidità relativa è caratterizzata da evidenti variazioni. Nelle zone marine raggiunge il 90% mentre in quelle desertiche può toccare il valore del 5-10% (BRUGNONI ET ALII, 2006). In funzione della latitudine l'andamento è il seguente:

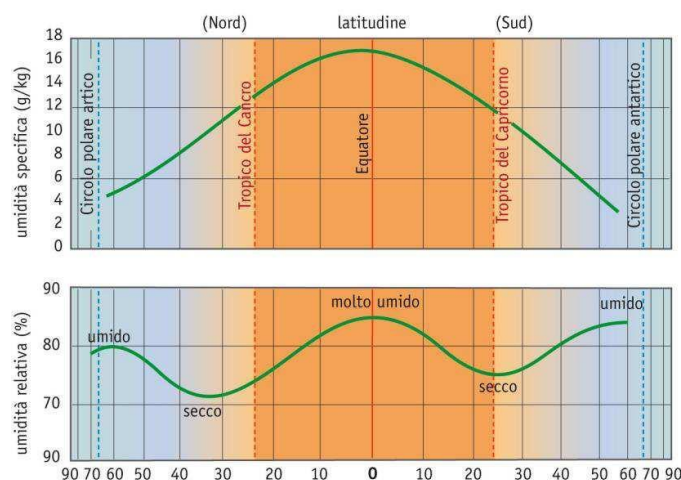


Fig. 3.16 Variazioni dell'umidità relativa con la latitudine.

Tale parametro dipende dalla temperatura dell'aria e risente delle escursioni termiche diurne (DI CANDIA, 2012). La relazione che lega i due elementi meteo-climatici è inversa:

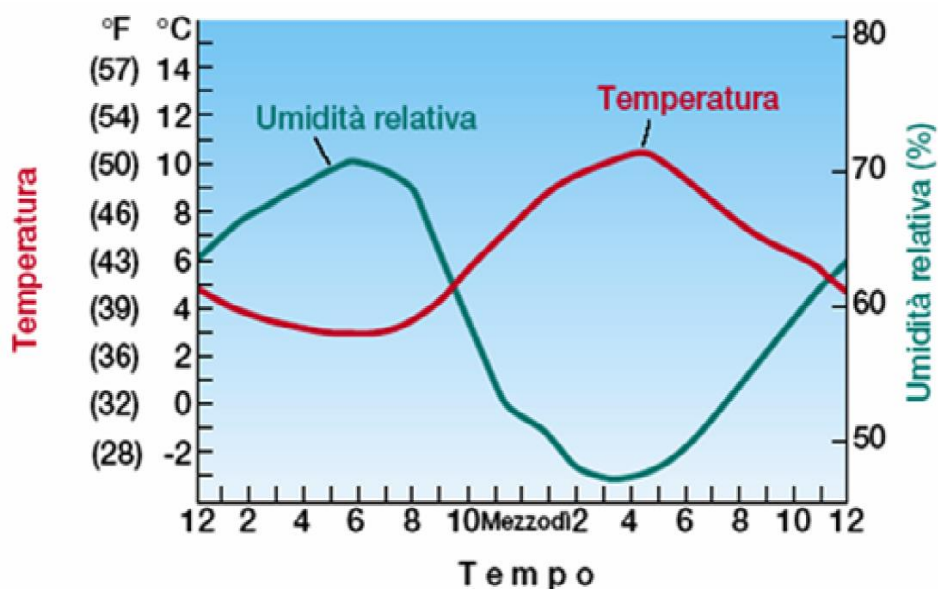


Fig. 3.17 Andamento diurno dell'umidità relativa in funzione della temperatura.

Dalla curva si osserva che al minimo di umidità relativa, corrisponde il massimo valore di temperatura. Soprattutto in prossimità del mare, un abbassamento termico può comportare il raggiungimento delle condizioni di saturazione ($U_r = 100\%$). In presenza di nuclei di condensazione, l'abbassamento ulteriore della temperatura, comporta la formazione di nebbie e foschie.

I parametri meteo-climatici presentati sono strettamente legati tra loro. La pressione diminuisce all'aumentare della temperatura e dell'umidità. Con il calore l'aria si dilata, diventa meno densa e quindi meno pesante. La presenza inoltre di particelle umide, spinge la massa d'aria verso l'alto alleggerendola. Il passaggio delle stesse masse da zone di alta pressione a bassa è motivo della formazione dei venti. D'altro canto una riduzione della temperatura comporta un aumento dell'umidità relativa.

La combinazione di tutti i parametri considerati è causa della generazione di perturbazioni e mareggiate. Pur essendo dipendenti in maniera significativa l'uno dall'altro, non è possibile trascurarne il peso che ciascun elemento ha nella manifestazione di eventi meteorologici. Per superare il problema della ridondanza delle variabili, si è fatto ricorso all'analisi in componenti principali, di seguito presenta.



CAPITOLO IV

**Analisi delle Componenti Principali (PCA) e modello della Regressione
Lineare Multivariata (RLM)**



CAPITOLO IV

Analisi delle Componenti Principali (PCA) e modello della Regressione Lineare Multivariata (RLM)

4.1 Analisi statistica dei dati

La statistica è la scienza che studia i fenomeni collettivi o di massa. Sfruttando metodi matematici, organizza una serie di dati capaci di descrivere sinteticamente un evento, traendo conclusioni generali per lo studio di situazioni più complesse. Bisogna effettuare una distinzione tra analisi ed interpretazioni di dati. Nel primo caso si adottano metodologie atte a classificare ed elaborare i dati disponibili. Con l'interpretazione si cerca di attribuire un significato ai risultati ottenuti e di valutare le possibili applicazioni. Si parla perciò di *statistica descrittiva* quando si delineano i caratteri delle serie sperimentali attraverso grafici e valori significativi. I dati grezzi sono trasformati, riorganizzati e ordinati in modo chiaro e comprensibile. Una buona analisi descrittiva deve essere dettagliata e accurata e deve fornire informazioni complete e centrate sui concetti chiave. Per tale ragione la visualizzazione dei dati avviene sotto forma di istogrammi, grafici a torta, tabelle, ecc.

La mole di informazioni ottenute è elaborata dalla *statistica inferenziale* per fare previsioni su situazioni future o incerte. Spesso l'andamento dei dati è talmente regolare da poterlo rappresentare con una funzione matematica. È però improbabile che una variabile segua perfettamente una distribuzione teorica, come la normale. La rappresentazione dei dati è idealizzata ma attendibile per fare stime e previsioni. Le conclusioni raggiunte sull'analisi del campione (insieme degli elementi su cui si effettuano misurazioni e osservazioni) possono essere estese a tutta la popolazione statistica (RICCI, 2003).

In funzione poi del numero di variabili da studiare, le tecniche di analisi statiche si dividono in: univariate, bivariate e multivariate (includono le bivariate).

In presenza di molti dati, lo studio diretto attraverso grafici e diagrammi può non essere di immediata comprensione. Occorre effettuare una sintesi attraverso un'elaborazione che restituisca gli *indici statistici*.

4.2 Indici statistici

Gli indici statistici consentono di sintetizzare una certa caratteristica e confrontare situazioni diverse. Nell'analisi univariata si ricorre usualmente alle seguenti grandezze:

INDICI STATISTICI DI TENDENZA CENTRALE

- ❖ *moda;*
- ❖ *mediana;*
- ❖ *media;*
- ❖ *quartili.*

INDICI STATISTICI DI DISPERSIONE

- ❖ *varianza;*
- ❖ *scarto quadratico medio.*

Nell'analisi statistica bivariata e multivariata valgono gli indici di tendenza centrale e di dispersione ma, in aggiunta, si considerano:

INDICI STATISTICI DI CONNESSIONE

- ❖ *covarianza;*
- ❖ *correlazione.*

Gli indici statistici di tendenza centrale esprimono un valore sintetico attorno al quale i dati si distribuiscono. Di seguito saranno presentati nel dettaglio.

MODA

La moda rappresenta il valore più frequente in una distribuzione. È un indicatore sintetico di posizione. Tra gli indici di tendenza centrale è la meno stabile, quindi è utilizzata per soli scopi descrittivi. Per l'individuazione del valore si ricorre agli istogrammi. Una distribuzione può avere più termini modali o nessuno (se la frequenza è uguale per ogni modalità).

MEDIANA

La mediana è il valore che occupa la posizione centrale nell'insieme ordinato degli n dati. Se n è dispari tale grandezza si trova al posto $(n+1)/2$; se n è pari, i punti dell'intervallo $[x_{n/2}, x_{(n+1)/2}]$ sono mediane. Risulta essere una misura robusta in quanto non è influenzata da dati anomali. Ogni valore estratto a caso dalla distribuzione ha la particolarità di essere superiore o inferiore alla mediana.

MEDIA

La media aritmetica semplice è data dalla somma di tutti i valori delle variabili della popolazione (x_i), diviso il numero di elementi della popolazione stessa (n).

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$

Se i dati si presentano con una certa frequenza, si sfrutta la media ponderata. Si sommano tutti i valori delle variabili moltiplicate per il peso (p_i) e si divide tutto per la somma dei pesi:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (4.2)$$

QUARTILI

I quantili si differenziano per il numero di parti uguali in cui suddividono la distribuzione. La mediana ne è un esempio (cinquantesimo percentile). A tale famiglia appartengono i quartili che ripartiscono i dati in 4 parti di uguale distribuzione e frequenza. Si distinguono:

- * primo quartile q_1 , il 25% dei dati è minore o uguale a tale valore;
- * secondo quartile q_2 , il 50% dei dati è minore o uguale a tale valore;
- * terzo quartile q_3 , il 75% dei dati è minore o uguale a tale valore.

Gli indici statistici di dispersione misurano il grado di omogeneità di un fenomeno e la sua attitudine a manifestarsi con intensità diverse.

VARIANZA

La varianza caratterizza molto bene la variabilità di un campione. È data dalla seguente espressione:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (4.3)$$

Essendo una grandezza quadratica, non è confrontabile direttamente con la media. Estrahendo la radice quadrata si determina una misura espressa nella stessa unità della variabile. Si ottiene dunque lo scarto quadratico medio.

SCARTO QUADRATICO MEDIO

Lo scarto quadratico medio o deviazione standard restituisce la misura della dispersione della variabile attorno alla media:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (4.4)$$

In presenza di due o più distribuzioni è possibile calcolare, separatamente per ciascuna, gli indici di statistica esposti. Si riesce ad avere una descrizione particolareggiata delle variabili ma non si hanno informazioni sulle relazioni esistenti. Per superare questo limite, valutare la dipendenza e conoscere la variazione di una distribuzione in funzione delle altre, si ricorre ai due indici statici di connessione: la covarianza e la correlazione.

COVARIANZA

La covarianza è la misura di come due distribuzioni (X e Y) varino assieme. Restituisce la dipendenza che intercorre tra le stesse:

$$\sigma_{x,y} = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (4.5)$$

È ovvio considerare che $\sigma_{x,x}$ è la varianza della singola distribuzione. Generalizzando tale grandezza al caso di più di due distribuzioni, si ottiene la *matrice delle covarianze*. È una matrice simmetrica in cui ogni valore rappresenta la variazione di una variabile rispetto alle altre.

CORRELAZIONE

La correlazione esprime la relazione che intercorre tra due variabili. A ciascun valore di una prima distribuzione corrisponde con regolarità un valore della seconda. Il grado di correlazione tra due variabili è espresso tramite l'indice. Il rapporto tra la covarianza e il prodotto delle deviazioni standard delle due distribuzioni, fornisce l'indice di Pearson:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.6)$$

Vale: $-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$.

L'indice è pari a:

- ❖ -1 se la correlazione è inversa (al crescere di un elemento corrisponde la decrescita dell'altro);
- ❖ 0 se è completamente assente la correlazione;
- ❖ 1 se la correlazione è diretta (al crescere di un elemento corrisponde la crescita dell'altro).

Inoltre se risulta:

- ❖ $\rho_{xy} < 0,3$, si ha una correlazione debole;

-
- ❖ $0,3 < \rho_{xy} < 0,7$, si ha una correlazione moderata;
 - ❖ $0,7 < \rho_{xy} < 1$, si ha una correlazione forte.

La correlazione non dipende dal rapporto causa- effetto delle due variabili ma solo dalla tendenza a variare simultaneamente.

In presenza di n distribuzioni, gli indici di correlazione sono disposti in una matrice simmetrica di $n \times n$ elementi, chiamata *matrice di correlazione*. I coefficienti sulla diagonale sono tutti pari a 1.

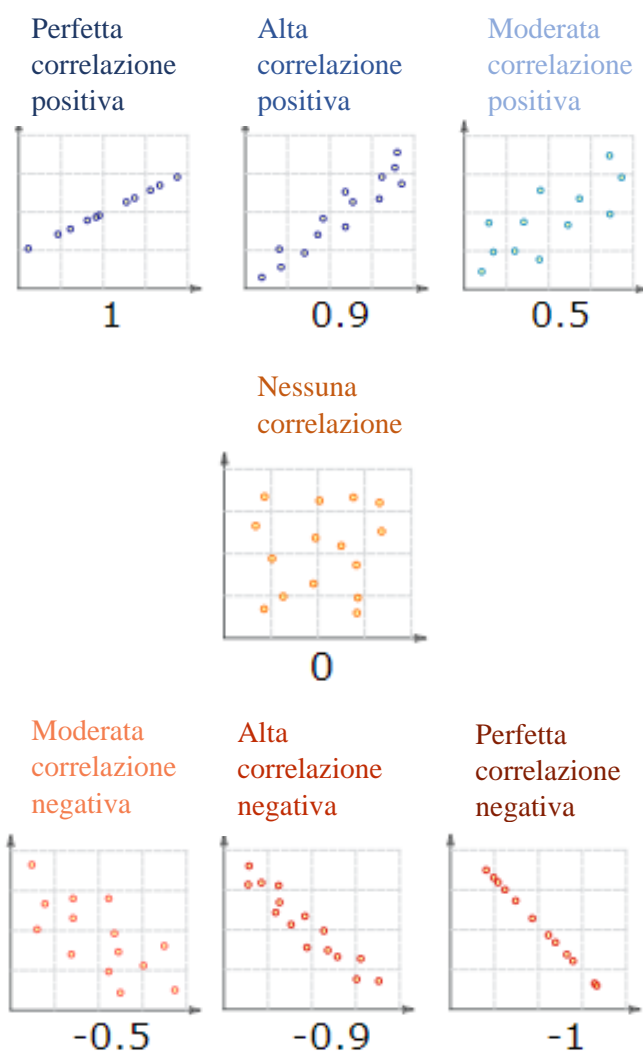


Fig. 4.1 Esempi di coppie di punti e relativi coefficienti di correlazione.

4.3 Analisi statistica multivariata

La statistica multivariata ha come peculiarità una vasta gamma di tecniche per la sintesi dei dati. L'esigenza di condensare le informazioni è molto forte. Ci si trova di fronte a una grande quantità di osservazioni e un numero molto elevato di variabili.

I dati raccolti in generale possono non essere omogenei e non avere le stesse dimensioni fisiche (JOHNSON & WICHERN, 2002). Per rendere comparabile la dispersione intorno alla media di una distribuzione rispetto ad un'altra, si ricorre alle *variabili standardizzate*. I dati sono ottenuti sottraendo da ciascuno la media della distribuzione e dividendo tale differenza per la deviazione standard:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (4.7)$$

I valori così ottenuti sono detti *punti zeta* e presentano una distribuzione normale standardizzata. Le caratteristiche sono:

- ❖ media aritmetica uguale a 0;
- ❖ varianza uguale a 1.

Con tale trasformazione si rende possibile il confronto tra distribuzioni diverse, riducendo gli errori sistematici di rilevazione all'interno di una stessa distribuzione.

La grande quantità di dati a disposizione rende difficile, molto spesso, la rappresentazione. Le tecniche grafiche usate per visualizzare i dati, nella statistica univariata, sono insufficienti e difficilmente interpretabili. Si può ricorrere a rappresentazioni con punti nel piano o nello spazio come i *grafici di dispersione* o *scatter-plot*:

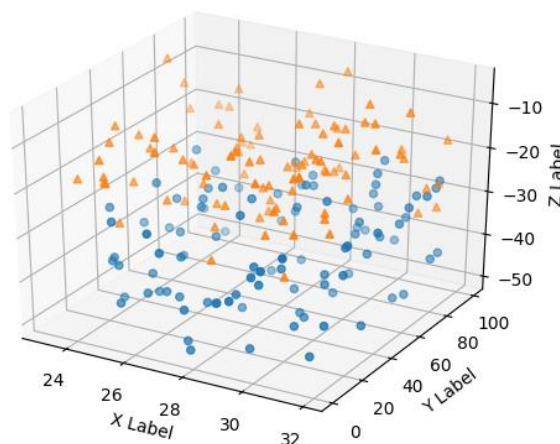


Fig. 4.2 Esempio di rappresentazione 3D scatter-plot.

Per fornire un'idea schematica di un insieme di dati, spesso si ricorre al *diagramma a scatola a baffi* (boxplot). La rappresentazione è basata sui quartili. La scatola è delimitata dal primo e dal terzo quartile, divisa all'interno dalla mediana. La lunghezza dei baffi è determinata dal minimo e dal massimo valore, purchè non siano distanti più di k volte lo scarto interquartile della scatola (ampiezza della scatola). La costante k è scelta pari a 1,5.

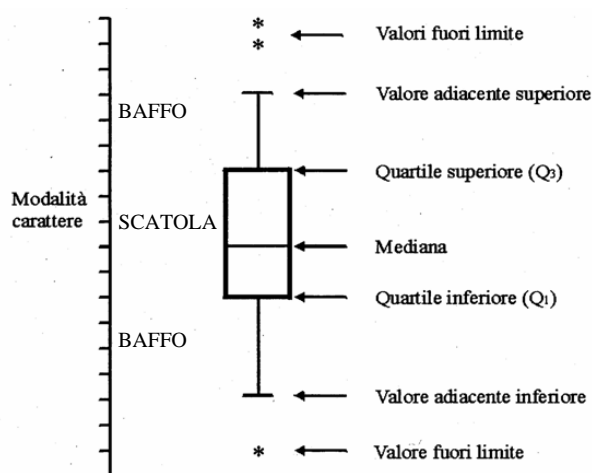


Fig. 4.3 Esempio di rappresentazione dei dati con diagramma a scatola a baffi.

Molto frequentemente la rappresentazione di dati su variabili multiple avviene con il *diagramma di Kiviat* o *grafico radar*. Ciascuna osservazione è graficata con una "ragnatela" la cui distanza dal centro è proporzionale al valore della variabile della stessa osservazione.

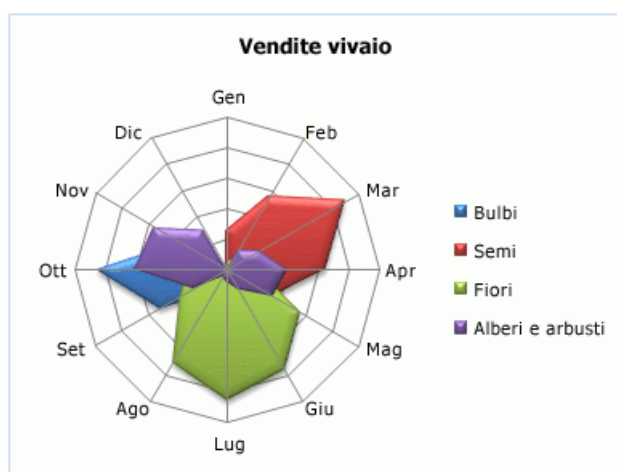


Fig. 4.4 Esempio di rappresentazione dei dati con diagramma di Kiviat.

Quando si ha a che fare con un numero molto elevato di variabili, occorre predisporre delle diverse tecniche di sintesi capaci di classificare i dati in gruppi, in qualche modo, omogenei. L'analisi delle componenti principali risponde alle esigenze della statistica multivariata.

4.4 Analisi delle Componenti Principali (PCA)

Una delle tecniche di sintesi e semplificazione dei dati multivariati è l'analisi delle componenti principali. Quando si lavora con un numero molto elevato di variabili, la rappresentazione grafica non è sfruttabile. In tali circostanze la PCA è uno strumento potente. L'obiettivo è duplice: ridurre il numero di variabili necessarie a spiegare il fenomeno e costruirne delle nuove combinando linearmente le originali. Lo studio delle componenti principali permette di mettere in luce delle relazioni tra i dati che non erano evidenti in precedenza e consente nuove interpretazioni (JOLIFFE, 2002). È una tecnica largamente utilizzata che consente di trovare il giusto compromesso tra la perdita di informazioni e la semplificazione del problema. Molte delle variabili che servono a spiegare un dato fenomeno spesso variano assieme. Per affrontare il problema della ridondanza delle informazioni occorre sostituire un gruppo di variabili con una nuova singola variabile. La trasformazione avviene proiettando le quantità originali in un nuovo sistema cartesiano, nel quale si effettua un ordinamento in senso decrescente di varianza. La variabile con maggiore varianza è proiettata sul primo asse, la seconda sul secondo asse, ecc. I nuovi parametri generati sono chiamati *componenti principali (CP)*. Ciascuno è ortogonale all'altro, a conferma che le informazioni non sono ridondanti. Nel loro complesso le CP formano una base ortogonale per lo spazio dei dati. Scegliendo opportunamente il numero di componenti da studiare, è possibile spiegare una porzione rilevante della varianza totale. Algebricamente le componenti principali rappresentano delle combinazioni lineari delle variabili originali in grado di massimizzare la varianza; geometricamente, considerando le variabili aleatorie $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_p$, come basi di un sistema di riferimento, il metodo permette di ruotare lo stesso sistema ottenendo delle nuove coordinate. L'analisi delle componenti principali con riferimento ad un vettore casuale multivariato ($\vec{X} = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_p]$), permette di individuare un vettore di variabili multivariato ($\vec{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_p]$). Le CP dipendono solo dalla matrice di covarianza Σ (o da quella di correlazione ρ).

Sia $a'_i = [a_{i1}, \dots, a_{ip}]$ il vettore caratteristico della trasformazione lineare, le generiche combinazioni sono date da:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a'_1 X' = a_{11}X_1 + \dots + a_{1p}X_p \\ Y_2 &= a'_2 X' = a_{21}X_1 + \dots + a_{2p}X_p \\ &\vdots \\ Y_p &= a'_p X' = a_{p1}X_1 + \dots + a_{pp}X_p \end{aligned} \tag{4.8}$$

In forma matriciale può essere espressa come:

$$\vec{Y} = \bar{A}\vec{X} \tag{4.9}$$

\bar{A} è la matrice caratteristica della trasformazione lineare. In sintesi, si ha che l'i-esima componente di \vec{Y} è data da:

$$Y_i = a_i' \vec{X} \quad (4.10)$$

Le Y_i sono le *componenti principali*, a cui corrisponde una varianza e una covarianza pari a:

$$Var(Y_i) = a_i' \Sigma a_i \quad (4.11)$$

$$Cov(Y_i, Y_j) = a_i' \Sigma a_j \quad (4.12)$$

Con $i, j = 1, \dots, p$.

Occorre imporre un vincolo sul vettore dei coefficienti. La varianza aumenta con il modulo a_i . Se la si volesse incrementare, basterebbe utilizzare, anziché il vettore a_i' , un nuovo vettore $c \cdot a_i'$, con $c > 1$. Procedendo con tale impostazione si otterrebbero un'infinità di valori al variare del fattore c . Per garantire l'unicità della soluzione è necessario che sia valutata la seguente condizione:

$$a_i' a_i = 1 \quad (4.13)$$

In altre parole il vettore a_i' deve avere norma unitaria.

Per individuare la prima componente principale, è necessario risolvere il problema di massimo vincolato:

$$Var(Y_i) = a_i' \Sigma a_i = \max \quad \text{con} \quad a_i' a_i = 1 \quad (4.14)$$

Si definisce come funzione obiettivo da massimizzare, la funzione di Lagrange:

$$P = a_i' \Sigma a_i - \lambda(a_i' a_i - 1) \quad (4.15)$$

Con λ , il moltiplicatore di Lagrange.

Massimizzando la funzione 4.15, si riesce a trovare il vettore dei pesi da assegnare a \vec{X} , in modo tale che la nuova variabile rappresenti la massima variabilità possibile. Essendo un problema di massimo vincolato, la soluzione si trova derivando la funzione di Lagrange e ponendola uguale a zero:

$$\frac{\partial P}{\partial a_i} = 2 \Sigma a_i - 2 \lambda a_i = 2(\Sigma - \lambda I) a_i = 0 \quad (4.16)$$

I è la matrice identità.

L'equazione 4.16, dal teorema di Rouchè- Capelli, ammette soluzioni solo se:

$$\det(\Sigma - \lambda I) = 0 \quad (4.17)$$

Le soluzioni di tale equazione sono gli autovalori della matrice Σ . Ordinandoli in senso decrescente si ottiene:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0 \quad (4.18)$$

Sostituendo il massimo valore λ_1 al seguente sistema, si determina il vettore a_1 :

$$(\Sigma - \lambda_1 I)a_1 = 0 \quad (4.19)$$

Quindi:

$$\Sigma a_1 = \lambda_1 a_1 \quad (4.20)$$

Il vettore a_1 di norma unitaria, rappresenta l'autovettore della matrice Σ associato all'autovalore λ_1 . Moltiplicando entrambi i membri della 4.20 per a_1' , si ha:

$$a_1' \Sigma a_1 = \lambda_1 a_1' a_1 \quad (4.21)$$

Essendo che il vettore a_1 ha norma unitaria, si ottiene:

$$a_1' \Sigma a_1 = \lambda_1 = \text{Var}(Y_1) \quad (4.22)$$

Avendo scelto il più grande tra gli autovalori di Σ , la varianza della prima componente principale è massimizzata. Il procedimento può essere ripetuto per ricavare le altre componenti, tenendo conto di quelle già valutate. La matrice Σ è simmetrica, quindi gli autovettori sono ortogonali a due a due e gli autovalori sono reali. Tale matrice è anche diagonale, quindi per $i \neq j$ si ha: $\text{Cov}(Y_i, Y_j) = 0$. Le componenti principali sono dipendenti dall'unità di misura adottata. Se si moltiplica la variabile per il coefficiente di conversione, la matrice di covarianza cambia e di conseguenza anche le CP. Inoltre se una variabile ha valori molto più grandi delle altre, influenza in maniera significativa le componenti principali. Per ovviare a tali difficoltà si sfruttano i dati standardizzati (*JOHNSON & WICHERN, 2002*). Dal procedimento adottato si ricava un numero di componenti principali pari al numero di variabili. L'obiettivo della PCA è sintetizzare i dati originari in un numero inferiore. La scelta del numero di componenti da adoperare può essere effettuata seguendo 3 procedimenti:

1. si prendono le componenti che rappresentano l'80/90% della variabilità complessiva;
2. si prendono le componenti la cui varianza (il corrispondente autovalore) è maggiore dell'unità;

-
3. si considera il grafico “Screen Plot” e si sceglie il numero di componenti corrispondenti al gomito della curva (come mostrato in figura).

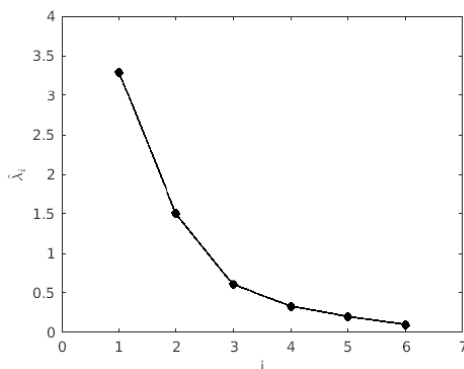


Fig. 4.5 Esempio di grafico “Screen Plot” per la determinazione del numero di componenti.

Sull’asse delle ascisse si rappresentano le componenti principali e sull’asse delle ordinate i relativi autovalori, in ordine crescente. Nel caso in figura sono sufficienti 3 CP.

Per effettuare l’Analisi delle Componenti Principali si ricorre al software MatLab (Matrix Laboratory). La function utilizzata è la *pca* e l’algoritmo implementato è il seguente:

$$[\text{std_coeff}, \text{std_score}, \text{std_latent}, \text{std_explained}] = \text{pca}(\text{std_data})$$

In ingresso è richiesta la matrice dei dati standardizzati (*std_data*) delle p osservazioni in n variabili. In uscita sono restituiti:

- ✓ *std_coeff*, è la matrice dei coefficienti delle variabili nello spazio delle componenti principali. Ogni colonna è disposta in ordine decrescente di varianza e contiene i coefficienti per assegnata componente principale. Le righe corrispondono alle variabili. La matrice ottenuta è una $n \times n$. Il numero delle componenti principali determinate è pari al numero di variabili;
- ✓ *std_score* è la matrice dei dati osservati nello spazio delle componenti principali. Le colonne corrispondono alle CP disposte in ordine decrescente di varianza. Le righe si riferiscono alle p osservazioni. La matrice ha dimensione $p \times n$;
- ✓ *std_latent* è il vettore colonna contenente la varianza delle componenti principali, ovvero gli autovalori della matrice di covarianza. La dimensione è $n \times 1$;
- ✓ *std_explained* è il vettore colonna in cui sono presenti le percentuali della varianza totale spiegata da ciascuna componente principale.

Graficamente è possibile visualizzare i coefficienti delle componenti principali ortonormali per ciascuna variabile e i valori delle osservazioni rispetto alle stesse CP:

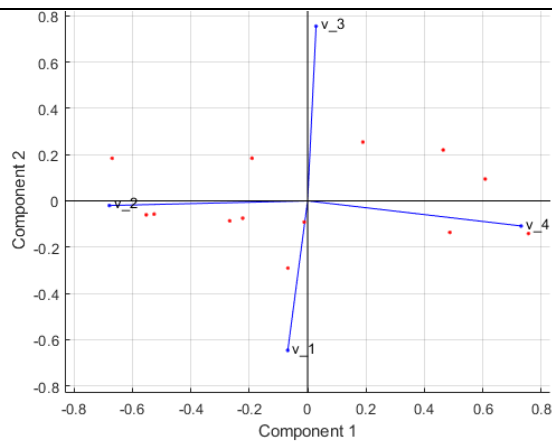


Fig. 4.6 *Rappresentazione delle componenti principali per 4 variabili di riferimento.*

Le variabili sono rappresentate dai 4 vettori. La lunghezza e la direzione definiscono il contributo di ciascuna variabile nelle componenti principali. La prima CP ha coefficienti negativi per la prima e la seconda variabile e coefficienti positivi per la terza e quarta. Dalla lunghezza del vettore, si osserva che il contributo maggiore è fornito dalla quarta variabile. La seconda CP è sull'asse verticale. Presenta coefficienti negativi per la prima, seconda e quarta variabile e coefficiente positivo solo per la terza che apporta anche il contributo maggiore. Ogni osservazione è rappresentata poi da un punto rosso. Per ciascuna è possibile individuare il valore della componente principale. Per decidere il numero di CP da scegliere, MatLab fornisce il grafico della distribuzione della varianza:

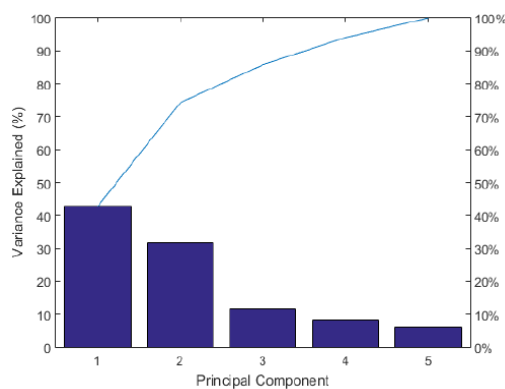


Fig. 4.7 *Rappresentazione della distribuzione della varianza.*

Graficamente si osserva che le prime due componenti principali coprono l'80% di varianza totale. Ciò è ancor più evidente dallo *screen plot* rappresentato. Il contributo delle restanti componenti è da trascurare. La matrice di correlazione delle variabili originarie è uguale alla matrice delle componenti principali. Il modello fornisce il passaggio ad analisi più complesse, come la regressione multivariata.

4.5 Regressione lineare multivariata (RLM)

La regressione lineare multipla è un metodo statistico che consente, attraverso la costruzione di un modello, di prevedere i valori di una variabile dipendente a partire da più variabili indipendenti (predittori). La relazione supposta lineare tra le suddette variabili è del tipo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (4.23)$$

In particolare:

- ❖ β_0 è l'intercetta;
- ❖ β_n rappresenta il parametro di regressione. Nello specifico è l'inclinazione di y rispetto alla variabile x_n , tenendo costanti le altre variabili;
- ❖ ε rappresenta l'errore aleatorio che non può essere trascurato. Nella determinazione di y si commettono inevitabilmente delle imprecisioni dovute alle misurazioni e alle valutazioni nel modello di regressione.

Considerando le p osservazioni indipendenti, il modello completo risulta essere:

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \dots + \beta_n x_{1n} + \varepsilon_1 \\ y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \dots + \beta_n x_{2n} + \varepsilon_2 \\ &\vdots \\ y_p &= \beta_0 + \beta_1 x_{p1} + \dots + \beta_n x_{pn} + \varepsilon_p \end{aligned} \quad (4.24)$$

In forma matriciale si esprime nel modo seguente:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Oppure, in forma compatta:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (4.26)$$

Le assunzioni teoriche per lo sviluppo del modello sono:

- ❖ gli errori devono avere una distribuzione normale con media pari a 0 e varianza pari a σ^2 ;
- ❖ la varianza degli errori deve essere costante per ogni valore delle variabili indipendenti;
- ❖ gli errori devono essere indipendenti tra loro ($\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$).

Lo scopo della regressione è di ricavare un'espressione che possa predire una risposta, date le variabili indipendenti. Si vuole far in modo che la differenza tra l'effettivo valore di y_i e il valore atteso ($\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \dots + b_n x_{ni}$) sia la più piccola possibile. Si sfrutta dunque il *metodo dei*

minimi quadrati (KRZANOWSKI, 1988). Tale procedura consiste nello scegliere le stime b_i dei parametri β_i , rendendo minima la somma dei quadrati degli scarti:

$$S(b) = (y - Xb)'(y - Xb) \quad (4.27)$$

Derivando la 4.27 rispetto a b e uguagliando a 0, si ottiene:

$$b = (X'X)^{-1}X'y \quad (4.28)$$

Una volta determinati i coefficienti di regressione, si può esprimere il modello di regressione stimato come segue:

$$\hat{y} = Xb \quad (4.29)$$

La qualità del modello può essere valutata attraverso due grandezze: il *coefficiente di determinazione* e l'*errore standard residuo*. Il primo coefficiente si esprime come:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.30)$$

In cui:

- ✓ y_i sono i valori registrati per la variabile y ;
- ✓ \bar{y} è la media campionaria di y ;
- ✓ \hat{y}_i sono i valori previsti dalla regressione.

R^2 rappresenta il rapporto tra la varianza spiegata dalla regressione e la varianza totale di y . È un indice che varia da 0 a 1. Per valori prossimi a 0 la previsione restituisce quantità in disaccordo con le osservazioni e le variabili considerate non hanno alcuna influenza nella risposta; se $R^2 = 1$ il modello spiega completamente la varianza delle y e l'equazione interpola perfettamente i dati. In presenza di molte variabili si predilige R^2 corretto:

$$\widetilde{R}^2 = R^2 - \frac{n(1-R^2)}{p-n-1} \quad (4.31)$$

Quando p è piccolo e il numero di variabili esplicative è relativamente alto, R^2 tende a sopravvalutare l'andamento del modello. Si preferisce \widetilde{R}^2 , nella forma corretta. Tale valore aumenta al crescere del numero di variabili, ma ciò non dà conferma circa la significatività statistica. L'*errore standard residuo* è una misura della variabilità degli scostamenti dei valori osservati da quelli previsti. Consente di valutare la mancanza di adattamento del modello dei dati. Si calcola a partire dalla somma dei quadrati degli errori. L'espressione è la seguente:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (4.32)$$

Essendo misurata in unità di y , non è facile stabilire quale sia il valore adatto per i dati in esame. Si preferisce sfruttare l' \widetilde{R}^2 , come misura di adattamento alternativa.

Per verificare se la relazione tra la variabile dipendente e le variabili esplicative sia effettivamente significativa, si procede con la Verifica d'Ipotesi. Il procedimento può essere adottato per il modello nel suo insieme (Test F), per l'inserimento di un nuovo predittore che migliori la varianza spiegata (Test F) e per i singoli predittori del modello stesso (Test t). Il parametro fissato per discriminare il test di ipotesi è il p-value; consente di accertare se la differenza tra il risultato osservato e quello ipotizzato dal modello è dovuta alla casualità del campionamento o se è effettivamente significativa. Il metodo consiste nel fissare un'ipotesi nulla (H_0) e un valore di soglia α (p-value teorico), funzione del livello di significatività scelto (solitamente pari a 0.05). Calcolato il p-value dei dati osservati si confronta il valore con la soglia, se:

- ❖ p-value $> \alpha$ l'ipotesi nulla (H_0) non può essere rifiutata;
- ❖ p-value $\leq \alpha$ i dati osservati sono statisticamente significativi e l'evidenza empirica è fortemente contraria all'ipotesi nulla.

TEST F

Per valutare la significatività del modello si utilizza il test statistico F basato sul rapporto tra la varianza spiegata dal modello stesso e la varianza residua. Dal momento che siamo in presenza di più variabili esplicative, l'ipotesi nulla e l'alternativa per il test F sul modello globale sono di seguito presentate.

- ❖ $H_0: \beta_i = 0$ (Non c'è relazione lineare tra la variabile dipendente e le variabili esplicative);
- ❖ H_1 : almeno un $\beta_i \neq 0$ (esiste una relazione lineare tra la variabile dipendente e almeno una delle variabili esplicative).

Se $F > F_u$ (valore critico sulla coda di destra di una distribuzione di F) o p-value $\leq \alpha$, si può rifiutare l'ipotesi nulla. Si può concludere che il modello spiega una quota significativa di varianza del fenomeno ed esiste una relazione lineare tra almeno una variabile esplicativa e la variabile dipendente. Per valutare la significatività statistica dell'inserimento di un nuovo predittore nel modello, si procede analogamente. Il test F sarà basato sul rapporto tra l'incremento di varianza dovuto alla nuova variabile e la varianza residua. Vale quanto affermato in precedenza.

TEST t

Il test t di Student è utilizzato per valutare la significatività di un predittore all'interno di un modello. L'ipotesi nulla e l'alternativa sono:

- ❖ $H_0: \beta_i = 0$;
-

❖ $H_1: \beta_i \neq 0$.

Il valore di t è dato dal rapporto di b_i (inclinazione di y rispetto alla variabile i , tenendo costanti gli altri predittori) con l'errore standard dello stesso coefficiente b_i . L'ipotesi nulla è rigettata se t è maggiore del valore critico (ottenuto per il livello di significatività assegnato) o il p -value è minore della soglia. Per verificare se il modello ipotizzato è adeguato, si ricorre all'analisi grafica dei residui. Gli errori sono assunti normali e dovrebbero distribuirsi in modo indipendente.

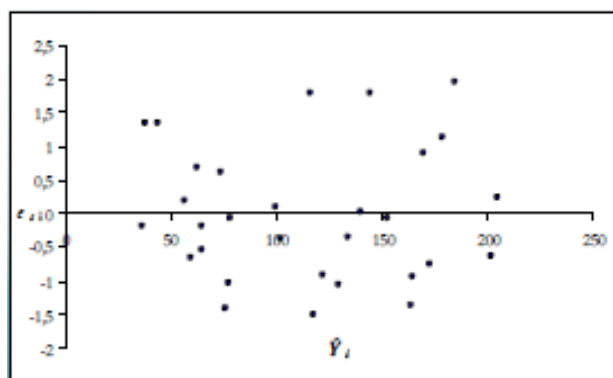


Fig. 4.8 Distribuzione dei residui rispetto a y_i .

In figura 4.8, si osserva che in ordinata sono presenti i residui e in ascissa i valori delle y_i . Se l'assunzione sugli errori è verificata, la distribuzione dovrà risultare simile ad una nuvola di punti disposti attorno allo 0 e non presentare strutture particolari. Un'altra ipotesi riguarda la linearità del modello. La presenza di un andamento strutturato dei residui rispetto a una delle variabili indipendenti, può rivelare l'esistenza di un legame non lineare tra la variabile esplicativa e la y .

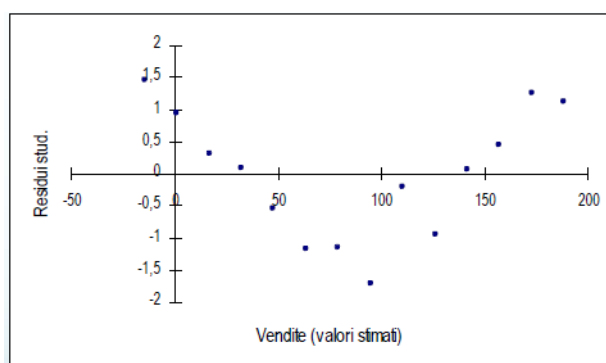


Fig. 4.9 Violazione dell'ipotesi di linearità del modello. Diagramma di dispersione dei residui rispetto la variabile esplicativa

Dal diagramma di dispersione di figura si osserva che la distribuzione dei residui non avviene in modo casuale attorno allo zero ma presenta una struttura curvilinea. In tale condizione viene meno l'assunzione dell'ipotesi di linearità del modello.

4.6 L'uso delle componenti principali nell'ambito della regressione lineare multivariata

Lo scopo della regressione lineare è trovare un modello che consenta di relazionare le variabili e la risposta attraverso un metodo statistico. Al fine di avere risultati attendibili, è necessario che il numero di osservazioni sia alto. In tali condizioni però, il costo computazionale può essere elevato. Introducendo la PCA nell'ambito della regressione, i vantaggi sono notevoli: si riduce la dimensione del problema senza perdere significative informazioni.

A differenza di quanto visto con l'analisi delle componenti principali, la varianza spiegata da una CP può non essere un parametro da considerare nell'ambito della regressione. Può accadere che una variabile che spiega una varianza minima, abbia una correlazione stretta con la risposta e non possa essere esclusa. Si parlerà di "regressione delle componenti principali".

Il vantaggio maggiore dell'uso delle CP sta nell'interpretazione. È stato evidenziato che le componenti principali esaltano legami tra i dati che non potevano in alcun modo essere valutati con i valori originali. L'analisi che ne scaturisce consente di spiegare al meglio quali sono gli aspetti che condizionano la risposta, dandone un'interpretazione più esaustiva.

Inoltre, applicando il metodo della regressione lineare multivariata, si ipotizza che gli errori possibili siano solo quelli delle risposte. Ma non è sempre così. Spesso si trascurano le incertezze delle variabili, affette ad esempio, da errori di misurazioni. Applicando la PCA si dà peso a tale considerazione. Le eventuali inesattezze nei valori comportano un aumento della varianza più che del valore atteso delle componenti. La regressione con le CP risulta essere perciò più attendibile.

L'utilizzo delle componenti principali nella regressione presenta dei vantaggi anche in assenza di collinearità tra i regressori. Riducendo la dimensione del problema si ottiene una migliore interpretazione e una più soddisfacente focalizzazione sulle variabili effettivamente importanti per l'analisi della risposta.

Nel capitolo successivo verranno presentati i risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia esposta.

CAPITOLO V
Caso studio: la Calabria

CAPITOLO V

Caso studio: la Calabria

5.1 Individuazione degli eventi alluvionali

Come riportato nel capitolo III, il primo passo della procedura di analisi è stato compiuto individuando le alluvioni verificatisi in tutti i comuni costieri calabresi. A tale scopo si è proceduto con la valutazione del database AsiCal contenente tutti gli eventi di dissesto che hanno colpito la Calabria dal 1979 al 2018. Sono stati analizzati 6379 records per i 113 comuni costieri e da questi sono stati estrapolati i soli eventi alluvionali. Lo studio è stato organizzato seguendo il frazionamento territoriale amministrativo. Le province e la città metropolitana che presentano un'esposizione su entrambi i litorali (ionico e tirrenico), sono state ulteriormente suddivise per aree costiere. Tale procedimento ha permesso di mettere in risalto più facilmente le peculiarità climatiche delle diverse fasce.

Il numero totale di eventi alluvioni individuati è ripartito come segue:

<i>PROVINCE - CITTA' METROPOLITANA</i>	<i>N. EVENTI ALLUVIONALI</i>
<i>COSENZA</i>	<i>213</i>
<i>CROTONE</i>	<i>75</i>
<i>CATANZARO</i>	<i>247</i>
<i>REGGIO CALABRIA</i>	<i>253</i>
<i>VIBO VALENTIA</i>	<i>53</i>
<i>TOTALI</i>	<i>841</i>

Tab. 5.1 Eventi alluvionali ripartiti per province e per città metropolitana

In particolare, dall'analisi di ciascun comune costiero ne è risultato:

COSENZA			COSENZA		
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI		COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	
<i>Rocca Imperiale</i>	6	IONICA	<i>Amantea</i>	13	TIRENICA
<i>Montegiordano</i>	1		<i>Belmonte</i>	0	
<i>Roseto Capo Spulico</i>	3		<i>Longobardi</i>	2	
<i>Amendolara</i>	4		<i>Fiumefreddo Bruzio</i>	0	
<i>Trebisacce</i>	8		<i>Falconara Albanese</i>	2	
<i>Villapiana</i>	5		<i>San Lucido</i>	3	
<i>Cassano allo Ionio</i>	31		<i>Paola</i>	8	
<i>Corigliano Calabro</i>	34		<i>Fuscaldo</i>	5	
<i>Rossano</i>	22		<i>Guardia Piemontese</i>	0	
<i>Crosia</i>	5		<i>Acquappesa</i>	2	
<i>Calopezzati</i>	3		<i>Cetraro</i>	7	
<i>Pietrapaola</i>	4		<i>Bonifati</i>	1	
<i>Mandatoriccio</i>	7		<i>Sanginetto</i>	3	
<i>Scala Coeli</i>	4		<i>Belvedere Marittimo</i>	0	
<i>Cariati</i>	9		<i>Diamante</i>	1	
			<i>Grisolia</i>	2	
		<i>Santa Maria del Cedro</i>	5		
		<i>Scalea</i>	9		
		<i>San Nicola Arcella</i>	1		
		<i>Tortora</i>	3		

Tab. 5.2 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della provincia di Cosenza

A Belmonte, Fiumefreddo Bruzio, Guardia Piemontese e Belvedere Marittimo non sono stati registrati eventi alluvionali nei decenni di osservazione. Dall'analisi è risultato però, che le coste sono state attaccate più volte da violente mareggiate. Tale situazione conferma la validità di attuazione della metodologia che impone prima l'accertamento dell'alluvione.

Da un attento studio dei dati in tabella si osserva che la fascia ionica è la più colpita. Cassano allo Ionio, Corigliano Calabro e Rossano contano il maggior numero di eventi di piena.

La provincia di Crotone si affaccia sul Mar Ionio. Gli eventi analizzati sono di seguito presentati:

CROTONE	
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI
<i>Crucoli</i>	11
<i>Cirò</i>	1
<i>Cirò Marina</i>	9
<i>Melissa</i>	3
<i>Strongoli</i>	11
<i>Crotone</i>	21
<i>Isola Capo Rizzuto</i>	5
<i>Cutro</i>	14

Tab. 5.3 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri di Crotone.

La città maggiormente colpita da eventi alluvionali è Crotone. Incide l'esposizione delle coste alle perturbazioni provenienti da Nord-Est e da Sud-Est ma anche l'estensione dei litorali, particolarmente importante. Per la provincia di Catanzaro, l'analisi del database ha fornito i seguenti risultati:

CATANZARO			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI
<i>Botricello</i>	14	<i>Montepaone</i>	10
<i>Cropani</i>	11	<i>Soverato</i>	13
<i>Belcastro</i>	7	<i>Satriano</i>	9
<i>Sellia Marina</i>	14	<i>Davoli</i>	10
<i>Simeri Crichi</i>	4	<i>San Sostene</i>	2
<i>Catanzaro</i>	30	<i>Sant'Andrea</i>	11
<i>Borgia</i>	8	<i>Isca</i>	5
<i>Squillace</i>	6	<i>Badolato</i>	14
<i>Staletti</i>	3	<i>S. Caterina dello Ionio</i>	5
<i>Montauro</i>	5	<i>Guardavalle</i>	3

Tab. 5.4 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia ionica di Catanzaro.

CATANZARO		
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	
<i>Curinga</i>	3	TIRENICA
<i>Lamezia Terme</i>	36	
<i>Gizzeria</i>	6	
<i>Falerna</i>	7	
<i>Nocera</i>	11	

Tab. 5.5 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia tirrenica di Catanzaro.

In questo caso i comuni interessati maggiormente da eventi alluvionali sono Catanzaro e Lamezia Terme. Le due città sono collocate a 40 km di distanza e l'esposizione delle loro coste è diametralmente opposta. Catanzaro si affaccia sul Mar Ionio e Lamezia Terme sul Mar Tirreno. Pur essendo geograficamente vicine, sono governate da fenomeni meteorologici di natura diversa. Per quanto riguarda la città metropolitana di Reggio Calabria gli eventi alluvionali registrati sono:

REGGIO CALABRIA		
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	
<i>Villa S. Giovanni</i>	3	TIRENICA
<i>Scilla</i>	10	
<i>Bagnara Calabria</i>	17	
<i>Seminara</i>	0	
<i>Palmi</i>	4	
<i>Gioia Tauro</i>	18	
<i>San Ferdinando</i>	7	

Tab. 5.6 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia tirrenica di Reggio Calabria.

REGGIO CALABRIA			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI
<i>Monasterace</i>	8	<i>Casignana</i>	2
<i>Stilo</i>	4	<i>Bianco</i>	12
<i>Camini</i>	2	<i>Africo</i>	5
<i>Riace</i>	1	<i>Ferruzzano</i>	8
<i>Stignano</i>	3	<i>Bruzzano Zeffirio</i>	7
<i>Caulonia</i>	15	<i>Brancaleone</i>	6
<i>Roccella Ionica</i>	5	<i>Palizzi</i>	5
<i>Marina di Gioiosa</i>	5	<i>Bova Marina</i>	13
<i>Grotteria</i>	4	<i>Condofuri</i>	17
<i>Siderno</i>	6	<i>San Lorenzo</i>	2
<i>Locri</i>	6	<i>Melito</i>	8
<i>Portigliola</i>	4	<i>Montebello Ionico</i>	10
<i>Sant'Ilario dello Ionio</i>	2	<i>Motta S. Giovanni</i>	8
<i>Ardore</i>	10	<i>Reggio Calabria</i>	5
<i>Bovalino</i>	11		

IONICA

Tab. 5.7 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della fascia ionica di Reggio Calabria.

L'estensione territoriale della città metropolitana di Reggio Calabria è molto più ampia lungo la fascia ionica, ma una particolare attenzione va posta anche alla zona tirrenica. Ad esclusione di Seminara, in cui non si sono verificate alluvioni, i comuni che si affacciano sul Tirreno sono stati più volte colpiti da inondazioni fluviali e da impetuose piene.

L'ultima provincia della Calabria da analizzare è Vibo Valentia. La fascia costiera è interamente bagnata dal Mar Tirreno. Gli eventi alluvionali registrati sono i seguenti:

VIBO VALENTIA	
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI
<i>Nicotera</i>	2
<i>Joppolo</i>	8
<i>Ricadi</i>	2
<i>Tropea</i>	9
<i>Parghelia</i>	4
<i>Zambrone</i>	1
<i>Briatico</i>	7
<i>Vibo Valentia</i>	15
<i>Pizzo</i>	5

Tab. 5.8 Eventi alluvionali registrati nei comuni costieri della provincia di Vibo Valentia.

Tra tutti i comuni in tabella, la città che conta il maggior numero di alluvioni è Vibo Valentia.

Per tutti gli eventi estrapolati dal database AsiCal sono stati individuati i torrenti in piena o esondati. Sui corsi d'acqua è stata effettuata un'indagine circa i parametri geometrici più importanti: lunghezza dell'asta principale, area e perimetro del bacino idrografico, pendenza media e quota media. Ciò ha consentito di avere una maggiore informazione sull'entità dell'evento. In alcuni casi i fenomeni meteorologici hanno interessato aree vaste a tal punto da causare lo straripamento di più fiumare vicine e devastare più comuni limitrofi.

Mettendo insieme tutti gli eventi si osserva che la fascia ionica è sicuramente quella più colpita. Su 841 alluvioni, ben 599 hanno interessato i comuni costieri che si affacciano sul Mar Ionio. Tale condizione è in perfetta sintonia con le peculiarità climatiche della zona.

Conclusa l'analisi del database si è passati all'accertamento della mareggiata contemporanea. Nota la data precisa dell'evento si è proceduto con l'extrapolazione delle altezze significative utili ai fini dello studio.

Nel paragrafo successivo saranno presentati i risultati e le percentuali di eventi concomitanti per l'intero territorio calabrese.

5.2 Individuazione delle mareggiate e accertamento della contemporaneità degli eventi

Il secondo step della metodologia di analisi ha riguardato lo studio dei dati meteomarini forniti dal centro MeteOcean del DICCA. Dall'analisi delle mareggiate sono stati esclusi i comuni costieri calabresi che non hanno registrato eventi alluvionali (Belmonte, Fiumefreddo Bruzio, Guardia Piemontese, Belvedere Marittimo e Seminara). Per alcuni territori è stato necessario associare la linea di costa di competenza di uno specifico torrente ad un punto preciso della maglia. Ad esempio Isola Capo Rizzuto, per la particolare conformazione costiera, è stata suddivisa in più tratti a cui sono stati fatti corrispondere 3 nodi. Tra questi è stato studiato solo il 6528 in quanto le fiumare interessate dagli eventi alluvionali sfociano nella fascia di litorale coperta da tale punto. Per tutte le serie temporali considerate (tante quanti sono i nodi della maglia scelti), sono state calcolate le altezze significative medie. Con la 3.2 è stata definita l'altezza critica, indispensabile per procedere all'individuazione della mareggiata. I valori ottenuti dipendono dalla località in esame e variano da punto a punto, come mostrato nelle tabelle 5.9 e 5.10. In particolare si osserva che, le altezze critiche più elevate si riscontrano per la provincia di Crotona. Ciò è dovuto all'esposizione ai venti di Scirocco responsabili di mareggiate e agitazioni ondose frequenti. Nonostante tutto, i valori mediamente ottenuti per le due aree sono pressoché uguali. Per le zone tirreniche, l'altezza critica media è 1,01 m; per le zone ioniche risulta 1,04 m.

<i>COMUNI COSTIERI</i>	<i>h_{crit} [m]</i>	<i>COMUNI COSTIERI</i>	<i>h_{crit} [m]</i>	
<i>Villa San Giovanni, Scilla, Bagnara</i>	0,72	<i>Amantea</i>	1,10	TIRENICA
<i>Palmi, Gioia Tauro, S. Ferdinando</i>	0,95	<i>Longobardi</i>	1,09	
<i>Nicotera, Joppolo</i>	0,78	<i>Falconara Albanese, San Lucido</i>	1,07	
<i>Ricadi</i>	1,11	<i>Paola, Fuscaldo</i>	1,00	
<i>Tropea, Parghelia, Zambrone</i>	1,03	<i>Acquappesa, Cetraro</i>	1,19	
<i>Briatico</i>	0,99	<i>Bonifati, Sangineto</i>	1,20	
<i>Vibo Valentia, Pizzo Calabro, Curinga</i>	0,87	<i>Diamante, Grisolia, Santa Maria del Cedro</i>	1,09	
<i>Lamezia Terme, Gizzeria</i>	0,88	<i>Scalea</i>	1,04	
<i>Falerna, Nocera Terinese</i>	1,13	<i>San Nicola Arcella, Tortora</i>	0,94	

Tab. 5.9 Valori di h_{crit} per le località tirreniche.

COMUNI COSTIERI	h_{crit} [m]	COMUNI COSTIERI	h_{crit} [m]	
<i>Rocca Imperiale, Montegiordano</i>	0,82	<i>Borgia, Squillace, Stalettì, Montauro, Montepaone, Soverato</i>	1,01	IONICA
<i>Roseto Capo Spulico</i>	0,86	<i>Satriano, Davoli, San Sostene, Sant'Andrea, Isca</i>	1,03	
<i>Amendolara, Trebisacce</i>	0,90	<i>Badolato, Santa Caterina dello Ionio</i>	1,07	
<i>Villapiana, Cassano allo Ionio</i>	0,74	<i>Guardavalle, Monasterace</i>	1,09	
<i>Corigliano Calabro, Rossano</i>	0,64	<i>Stilo, Camini, Riace</i>	1,17	
<i>Crosia, Calopezzati, Pietrapaola</i>	0,80	<i>Stignano, Caulonia</i>	1,15	
<i>Mandatoriccio, Scala Coeli, Cariatì</i>	0,84	<i>Roccella Ionica, Marina di Gioiosa, Grotteria, Siderno</i>	1,03	
<i>Crucoli, Cirò</i>	1,06	<i>Locri, Portigliola, Sant'Ilario dello Ionio, Ardore</i>	1,01	
<i>Cirò Marina</i>	1,19	<i>Bovalino, Casignana, Bianco, Africo</i>	1,08	
<i>Melissa, Strongoli</i>	1,18	<i>Ferruzzano, Bruzzano Zeffirio</i>	1,14	
<i>Crotone</i>	1,20	<i>Brancaleone</i>	1,04	
<i>Isola Capo Rizzuto</i>	1,26	<i>Palizzi, Bova Marina</i>	1,16	
<i>Cutro</i>	1,24	<i>Condofuri, San Lorenzo</i>	1,16	
<i>Botricello, Cropani, Belcastro</i>	1,14	<i>Melito Porto Salvo</i>	1,16	
<i>Sellia Marina, Simeri Crichi, Catanzaro</i>	1,01	<i>Montebello, Motta San Giovanni, Reggio Calabria</i>	1,02	

Tab. 5.10 Valori di h_{crit} per le località ioniche.

Nota l' h_{crit} è stato possibile accertare la presenza della mareggiata durante l'evento di piena. Si è proceduto con l'estrapolazione delle altezze significative dal database, centrando il giorno dell'alluvione ed estendendo l'analisi a tutto l'intervallo temporale in cui l' H_s ha superato la soglia e non vi è scesa al di sotto, per più di 12 ore. Per gli eventi in cui il valore critico non è stato oltrepassato, l'esame dei dati meteomarini è stato effettuato per un intervallo temporale di 72 ore, corrispondenti al giorno precedente, effettivo e successivo dell'alluvione. Al fine di avere contezza immediata circa la problematica della concorrenza degli eventi per le coste calabresi, è stata considerata la percentuale di casi simultanei (intesa come il rapporto tra il numero degli eventi alluvionali e il numero di mareggiate accertate durante gli stessi, moltiplicato per 100). I risultati sono stati raccolti in tabelle e suddivise per competenze territoriali come effettuato nel paragrafo 5.1.

COSENZA				IONICA
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]	
<i>Rocca Imperiale</i>	6	6	100	
<i>Montegiordano</i>	1	1	100	
<i>Roseto Capo Spulico</i>	3	3	100	
<i>Amendolara</i>	4	3	75	
<i>Trebisacce</i>	8	8	100	
<i>Villapiana</i>	5	5	100	
<i>Cassano allo Ionio</i>	31	29	94	
<i>Corigliano Calabro</i>	34	31	91	
<i>Rossano</i>	22	18	82	
<i>Crosia</i>	5	4	80	
<i>Calopezzati</i>	3	3	100	
<i>Pietrapaola</i>	4	4	100	
<i>Mandatoriccio</i>	7	6	86	
<i>Scala Coeli</i>	4	3	75	
<i>Cariati</i>	9	6	67	

Tab. 5.11 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia ionica della provincia di Cosenza.

COSENZA				
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]	
<i>Amantea</i>	13	11	85	TIRRENICA
<i>Longobardi</i>	2	2	100	
<i>Falconara Albanese</i>	2	2	100	
<i>San Lucido</i>	3	3	100	
<i>Paola</i>	8	6	75	
<i>Fuscaldo</i>	5	3	60	
<i>Acquappesa</i>	2	1	50	
<i>Cetraro</i>	7	4	57	
<i>Bonifati</i>	1	1	100	
<i>Sanginetto</i>	3	2	67	
<i>Diamante</i>	1	0	0	
<i>Grisolia</i>	2	2	100	
<i>Santa Maria del Cedro</i>	5	5	100	
<i>Scalea</i>	9	8	89	
<i>San Nicola Arcella</i>	1	1	100	
<i>Tortora</i>	3	2	67	

Tab. 5.12 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia tirrenica della provincia di Cosenza.

Buona parte dei comuni cosentini presentano una contemporaneità perfetta (100%). Le percentuali sono più alte lungo la fascia ionica ma rilevanti anche lungo quella tirrenica. In un unico caso la concomitanza è assente. La città di Diamante ha registrato un solo evento alluvionale al quale non ha corrisposto la mareggiata.

L'analisi effettuata sulla città di Crotone ha restituito i seguenti risultati:

CROTONE			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
<i>Crucoli</i>	11	10	91
<i>Cirò</i>	1	1	100
<i>Cirò Marina</i>	9	8	89
<i>Melissa</i>	3	2	67
<i>Strongoli</i>	11	10	91
<i>Crotone</i>	21	21	100
<i>Isola Capo Rizzuto</i>	5	3	60
<i>Cutro</i>	14	13	93

Tab. 5.13 Eventi concomitanti registrati nella provincia di Crotone.

Il comune di Crotone presenta il maggior numero di eventi con perfetta concomitanza. Ciò è dovuto principalmente all'esposizione delle coste e alle tipologie di perturbazioni che colpiscono il territorio.

Per la provincia di Catanzaro l'89% di eventi alluvionali sono accompagnati da una mareggiata. I risultati, scorporati per comune, sono i seguenti:

CATANZARO			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
<i>Curinga</i>	3	3	100
<i>Lamezia Terme</i>	36	25	69
<i>Gizzeria</i>	6	5	83
<i>Falerna</i>	7	7	100
<i>Nocera</i>	11	10	91

TIRRENICA

Tab. 5.14 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia tirrenica della provincia di Catanzaro.

Per la fascia ionica le percentuali di eventi concomitanti sono decisamente significative:

CATANZARO			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
<i>Botricello</i>	14	14	100
<i>Cropani</i>	11	9	82
<i>Belcastro</i>	7	6	86
<i>Sellia Marina</i>	14	13	93
<i>Simeri Crichi</i>	4	3	75
<i>Catanzaro</i>	30	25	83
<i>Borgia</i>	8	8	100
<i>Squillace</i>	6	6	100
<i>Staletti</i>	3	2	67
<i>Montauro</i>	5	5	100
<i>Montepaone</i>	10	10	100
<i>Soverato</i>	13	12	92
<i>Satriano</i>	9	8	89
<i>Davoli</i>	10	9	90
<i>San Sostene</i>	2	2	100
<i>Sant'Andrea</i>	11	11	100
<i>Isca</i>	5	4	80
<i>Badolato</i>	14	14	100
<i>S. Caterina dello Ionio</i>	5	5	100
<i>Guardavalle</i>	3	3	100

IONICA

Tab. 5.15 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia ionica della provincia di Catanzaro.

Il 50% dei comuni catanzaresi della fascia ionica presentano una contemporaneità perfetta tra alluvioni e mareggiate. La percentuale di eventi è generalmente molto alta. Il valore più basso si ha a Stalettì. Le città sono esposte ai venti caldo-umidi di Scirocco, causa delle perturbazioni meteorologiche più intense.

Ancor più rilevante è lo scenario riguardante la città metropolitana di Reggio Calabria:

REGGIO CALABRIA			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
<i>Monasterace</i>	8	8	100
<i>Stilo</i>	4	4	100
<i>Camini</i>	2	2	100
<i>Riace</i>	1	1	100
<i>Stignano</i>	3	3	100
<i>Caulonia</i>	15	15	100
<i>Roccella Ionica</i>	5	5	100
<i>Marina di Gioiosa</i>	5	5	100
<i>Grotteria</i>	4	4	100
<i>Siderno</i>	6	6	100
<i>Locri</i>	6	6	100
<i>Portigliola</i>	4	4	100
<i>Sant'Ilario dello Ionio</i>	2	2	100
<i>Ardore</i>	10	10	100
<i>Bovalino</i>	11	11	100
<i>Casignana</i>	2	2	100
<i>Bianco</i>	12	12	100
<i>Africo</i>	5	4	80
<i>Ferruzzano</i>	8	7	88
<i>Bruzzano Zeffirio</i>	7	6	86
<i>Brancaleone</i>	6	6	100
<i>Palizzi</i>	5	5	100
<i>Bova Marina</i>	13	13	100
<i>Condofuri</i>	17	16	94
<i>San Lorenzo</i>	2	2	100
<i>Melito</i>	8	7	88
<i>Montebello Ionico</i>	10	8	80
<i>Motta S. Giovanni</i>	8	8	100
<i>Reggio Calabria</i>	5	5	100

IONICA

Tab. 5.16 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia ionica della città metropolitana di Reggio Calabria.

REGGIO CALABRIA			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
<i>Villa S. Giovanni</i>	3	2	67
<i>Scilla</i>	10	8	80
<i>Bagnara Calabria</i>	17	9	53
<i>Palmi</i>	4	3	75
<i>Gioia Tauro</i>	18	13	72
<i>San Ferdinando</i>	7	5	71

TIRRENICA

Tab. 5.17 Eventi concomitanti registrati lungo la fascia tirrenica della città metropolitana di Reggio Calabria.

La città metropolitana conta numerosi eventi concomitanti. La percentuale tocca il 100% per moltissimi comuni ionici, segno di una preoccupante condizione di vulnerabilità. Meno allarmante ma pur sempre rischiosa è la condizione del tratto tirrenico. Bagnara Calabria detiene il minor numero di eventi contemporanei ma comunque superiore al 50% del totale.

L'ultima provincia analizzata è Vibo Valentia:

VIBO VALENTIA			
COMUNI COSTIERI	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
<i>Nicotera</i>	2	1	50
<i>Joppolo</i>	8	4	50
<i>Ricadi</i>	2	2	100
<i>Tropea</i>	9	6	67
<i>Parghelia</i>	4	3	75
<i>Zambrone</i>	1	1	100
<i>Briatico</i>	7	3	43
<i>Vibo Valentia</i>	15	8	53
<i>Pizzo</i>	5	5	100

Tab. 5.18 Eventi concomitanti registrati in provincia di Vibo Valentia.

La provincia di Vibo Valentia presenta il minor numero di eventi simultanei di tutta la Calabria. Fra tutti i comuni analizzati Briatico detiene la percentuale più bassa.

I dati raccolti per province e per città metropolitana sono i seguenti:

PROVINCE - CITTA' METROPOLITANA	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
COSENZA	213	183	86
CROTONE	75	68	91
CATANZARO	247	219	89
REGGIO CALABRIA	253	227	90
VIBO VALENTIA	53	33	62
TOTALI	841	730	87

Tab. 5.19 Eventi concomitanti complessivi registrati in Calabria.

La provincia con il più alto numero di eventi contemporanei è Crotone, mentre quella con il minor numero è Vibo Valentia. Entrambe hanno la peculiarità di essere esposte totalmente su un unico versante. In particolare, Crotone è bagnata solo dal Mar Ionio e Vibo Valentia solo dal Mar Tirreno, motivo per il quale le perturbazioni caratterizzano la risposta locale. Le percentuali si attestano su valori molto alti, segno di una grande predisposizione territoriale agli eventi simultanei.

I dati organizzati per autorità amministrative forniscono un quadro generale della condizione calabrese. Una migliore visione della problematica può essere garantita raccogliendo i risultati per fasce costiere. Cosenza, Catanzaro e Reggio Calabria presentano competenze territoriali in entrambi i versanti:

FASCE COSTIERE	N. EVENTI ALLUVIONALI	N. MAREGGIATE ACCERTATE	EVENTI CONCOMITANTI [%]
IONICA	599	554	92
TIRRENICA	242	176	73
TOTALI	841	730	87

Tab. 5.20 Eventi concomitanti complessivi registrati in Calabria, suddivisi per fasce costiere.

Dalla tabella si evince che il 92% degli eventi alluvionali avvenuti lungo la fascia ionica, sono stati accompagnati da agitazione ondata. Tale risultato è in linea con le peculiarità climatiche

della zona. Nella maggior parte dei casi sono le correnti di Scirocco a governare le perturbazioni dello Ionio. I venti provenienti da Sud- Est spirano con grande intensità e generano nel contempo violente mareggiate. Molti degli eventi analizzati sono infatti concentrati in autunno, ad evidenza del condizionamento climatico stagionale. I mesi più esposti sono Ottobre e Novembre. I maggiori effetti si risentono a causa delle condizioni di aridità del terreno, dovute alle alte temperature estive e alla scarsità di piogge che precedono tali mesi. La parte ionica settentrionale è spesso investita dai venti di Grecale che spostano la problematica della contemporaneità perlopiù in inverno. Le correnti fredde si scontrano con le masse d'aria calda provenienti da Sud e scatenano fenomeni meteorologici intensi. Quando le due masse si incontrano, tra la linea di costa e la catena montuosa, si creano delle celle di convergenza alla sommità dei rilievi. L'aumento della pressione sulle fasce alte inasprisce il gradiente barico tra la costa e l'altura e favorisce ulteriormente l'attività convettiva, causando perturbazioni e mareggiate. Il versante tirrenico presenta una percentuale di eventi concomitanti più bassa ma sicuramente considerevole. La fascia occidentale della Calabria è caratterizzata da una piovosità copiosa e frequente. In molti casi le perturbazioni che colpiscono il litorale tirrenico, sono concentrati sulle aree dell'entroterra e non coinvolgono le zone costiere. Per tale ragione, si possono registrare fenomeni alluvionali importanti ma agitazioni ondose irrilevanti. Allo stesso tempo, le coste sono spesso colpite da mareggiate violente a cui non è associata precipitazione. Nei casi in cui è stata accertata la contemporaneità degli eventi è stato possibile constatare che le correnti responsabili provengono da Sud-Ovest e soffiano principalmente in autunno. Il vento di Libeccio accompagna le perturbazioni ed è spesso seguito dal Maestrale. Lo scontro delle due masse d'aria provoca fenomeni molto intensi su tutto il litorale tirrenico. Tali condizioni si manifestano principalmente in autunno per la discesa di correnti dall'Atlantico. I fronti di bassa pressione creano moti convettivi e instabilità. I mesi di maggiore esposizione sono Ottobre e Novembre. In inverno prevalgono le correnti fredde e solo nei casi in cui spira il vento sporadico da Sud - Ovest, si verificano eventi contemporanei. Per quanto concerne l'intero territorio calabrese, il dato complessivo è significativo. L'87% di alluvioni è accompagnato da una mareggiata. La vulnerabilità delle coste è ancor più provata dall'azione combinata di eventi che risultano distruttivi anche solo considerandoli separatamente. Confermata e accertata la contemporaneità in Calabria è necessario porre l'attenzione sulle condizioni che influenzano i fenomeni. Per lo studio quantitativo sono stati scelti 18 comuni costieri, rappresentativi dell'intera regione. L'esame scorporato del territorio ha consentito di particolareggiare l'indagine per la fascia ionica e per la fascia tirrenica. Nel paragrafo successivo saranno presentati i risultati ottenuti applicando l'analisi delle componenti principali alla regressione multipla.

5.3 Analisi quantitativa degli eventi concomitanti

L'indagine sulle condizioni che generano la contemporaneità degli eventi è stata eseguita per un numero limitato di comuni. Sono stati scelti i più rappresentativi geograficamente per le diverse province e per la città metropolitana. Le città studiate sono 18: Villapiana, Cassano allo Ionio, Crotona, Sellia Marina, Simeri Crichi, Catanzaro, Bovalino, Casignana, Africo, Montebello e Motta S. Giovanni per la fascia ionica e Palmi, Gioia Tauro, S. Ferdinando, Lamezia Terme, Gizzeria, Scalea e S. Nicola Arcella per la fascia tirrenica.

L'analisi condotta sull'accertamento della contemporaneità ha permesso di valutare le mareggiate in termini di persistenza e di altezza significativa massima. Dal punto di vista dell'evento pluviometrico le informazioni ricavate dal database sono ridotte. Per avere contezza dell'entità della precipitazione che ha provocato l'alluvione, sono state ricavate le altezze cumulate di pioggia di ciascun evento. In un primo step sono stati individuati i pluviometri prossimi al mare e più vicini ai torrenti esondati, come mostrato in figura 3.9. In particolare per ogni comune analizzato sono state associate le seguenti stazioni di monitoraggio:

COMUNI COSTIERI	PLUVIOMETRI
<i>Villapiana</i>	Cerchiara di Calabria, Cassano allo Ionio
<i>Cassano allo Ionio</i>	Sibari, Cassano allo Ionio, Villapiana Scalo, Castrovillari Camerata
<i>Crotona</i>	Crotona, San Mauro Marchesato, Crotona- Papanice
<i>Sellia Marina</i>	Cropani, Soveria Simeri
<i>Simeri Crichi</i>	Soveria Simeri
<i>Catanzaro</i>	Catanzaro, Soveria Simeri
<i>Bovalino</i>	Bovalino
<i>Casignana, Bianco, Africo</i>	Sant'Agata del Bianco
<i>Montebello Ionico, Motta S. Giovanni</i>	Montebello Ionico
<i>Palmi</i>	Rizziconi Ponte Vecchio
<i>Gioia Tauro</i>	Gioia Tauro- Budello, Rosarno, Rizziconi Ponte Vecchio, Rizziconi
<i>S. Ferdinando</i>	Rosarno
<i>Lamezia Terme</i>	Lamezia Terme- Palazzo, Maida- Liccardi, Nicastro- Bella
<i>Gizzeria</i>	Nicastro- Bella
<i>Scalea, S. Nicola Arcella</i>	Papasidero

Tab. 5.21 Stazioni di monitoraggio scelte per l'analisi pluviometrica degli eventi.

Le registrazioni dei pluviometri forniti dal Centro Multifunzionale dell'Arpacal non coprono tutto l'intervallo temporale di osservazione. Di conseguenza, non si è potuto procedere all'analisi quantitativa di tutti gli eventi alluvionali estrapolati dal database AsiCal per i comuni scelti. Sono state studiate le serie storiche delle piogge cumulate per la durata di 1 ora.

Confrontando l'evento pluviometrico con l'evoluzione della mareggiata è stato possibile dedurre un risultato importante. Il valore massimo di altezza significativa si registra durante la precipitazione, a conferma ulteriore della contemporaneità.

Note le altezze cumulate, è stato possibile determinare le intensità di pioggia.

Il passaggio successivo ha visto l'analisi dei parametri meteorologici, responsabili della natura delle perturbazioni. Dal database del MeteOcean, sono stati estrapolati i valori della pressione atmosferica, dell'umidità relativa, della temperatura e delle componenti della velocità del vento per tutto l'intervallo di osservazione considerato. In particolare le componenti di velocità sono state opportunamente sviluppate per ottenere l'intensità e la direzione del vento. Per la durata dell'evento i dati sono stati elaborati al fine di ottenere i seguenti valori medi:

- ❖ pressione media (P_m [Pa]);
- ❖ umidità relativa media (U_m [%]);
- ❖ temperatura media (T_m [°C]);
- ❖ velocità del vento media (v_m [m/s]).

Per quanto riguarda la pressione atmosferica, è stato accertato che la correlazione con l'altezza cumulata di pioggia è negativa. Il coefficiente di Pearson valutato per ogni evento ha restituito valori prossimi a -1, segno di una relazione inversa.

Si è deciso dunque di aggiungere un altro parametro allo studio: l'abbassamento di pressione atmosferica. Per tutte le serie storiche analizzate e per l'intera durata dell'evento pluviometrico, sono stati individuati i valori massimi e minimi di P , al fine di accertarne la differenza durante il fenomeno (ΔP [Pa]).

Ogni evento è stato caratterizzato da un'intensità di pioggia e un'altezza significativa massima, rappresentazione di un effetto, a cui sono stati associati i parametri meteorologici medi e il ΔP , espressione di più cause.

I dati ottenuti sono stati tabellati e suddivisi per fasce costiere.

<i>N. Eventi</i>	<i>i</i> [mm/h]	<i>H_{smax}</i> [m]	<i>P_m</i> [Pa]	<i>U_m</i> [%]	<i>T_m</i> [°C]	<i>v_m</i> [m/s]	<i>ΔP</i> [Pa]
1	5,116	3,232	100895,74	91,80	12,19	10,50	394,00
2	0,790	2,126	100074,46	85,43	15,28	7,60	537,80
3	2,052	3,095	99089,28	80,82	10,27	13,70	1162,60
4	1,854	2,656	101603,50	92,36	14,52	7,66	409,00
5	0,521	4,949	100588,69	88,23	12,48	10,07	2020,70
6	1,333	3,854	101388,94	93,43	11,53	9,99	1663,00
7	1,333	2,247	100183,97	84,27	10,45	7,32	362,90
8	2,621	1,882	101375,95	89,83	20,23	7,14	1027,00
9	0,909	1,646	99912,33	83,33	9,95	8,96	1303,40
10	0,828	2,119	98958,27	87,80	10,59	10,06	1087,30
11	1,153	1,636	99827,08	91,39	10,80	6,61	752,60
12	1,496	2,746	100204,81	91,90	10,55	7,38	590,20
13	1,980	3,97	101858,41	90,21	12,01	9,61	1046,00
14	1,143	2,768	99180,46	85,94	14,32	11,38	1622,50
15	1,093	1,493	100142,45	85,36	11,21	8,20	1885,10
16	1,005	1,831	99566,93	85,94	10,95	8,22	773,40
17	2,150	2,901	101052,58	91,92	16,98	6,61	219,00
18	1,600	4,724	100381,12	91,20	15,12	10,44	1138,40
19	2,400	3,474	101043,59	92,58	13,49	9,77	773,00
20	1,771	3,298	98911,29	84,80	11,69	10,59	1842,30
21	1,341	2,226	100532,90	83,71	12,01	7,79	1185,90
22	2,148	2,464	101798,23	88,05	17,99	7,59	1127,00
23	1,867	1,823	100085,25	86,24	14,48	9,84	321,50
24	3,273	4,595	101439,43	93,54	15,61	9,03	1685,00
25	3,977	6,833	100450,55	91,56	11,01	12,38	2052,60
26	3,054	3,067	98978,11	91,86	11,20	9,20	852,50
27	3,014	3,27	101068,45	90,19	19,23	6,96	1470,00
28	5,125	2,707	100869,18	89,82	20,20	8,48	377,00
29	16,057	2,511	101864,12	91,70	19,39	8,94	100,00
30	4,169	2,038	101523,61	89,84	21,82	7,06	583,00
31	2,230	5,829	100860,92	88,58	10,16	15,08	1443,00
32	3,182	3,905	101294,11	86,73	21,86	9,82	1143,00
33	3,295	2,28	101504,69	86,51	18,35	7,54	827,00

34	1,662	2,293	101272,77	93,39	17,57	8,61	536,00
35	6,478	6,28	101527,30	93,95	11,91	10,68	543,00
36	1,137	2,607	101180,74	92,48	11,99	7,97	696,00
37	4,533	4,178	100363,13	94,30	11,61	12,36	638,80
38	5,411	5,03	101718,89	90,00	10,70	13,22	684,00
39	2,694	3,271	101068,64	92,82	18,69	6,56	1561,00
40	2,296	2,387	101331,85	92,91	20,43	5,77	316,00
41	4,363	2,127	101222,63	92,90	16,52	6,63	554,00
42	1,304	3,024	100480,00	90,22	18,02	5,29	2501,80
43	3,224	1,387	101468,78	93,20	18,00	3,64	730,00
44	8,771	1,538	101756,00	87,71	16,44	7,42	153,00
45	2,494	5,573	100999,23	89,78	15,22	11,68	1542,00
46	4,248	5,517	101402,62	95,69	12,26	10,79	1466,00
47	0,700	2,032	99370,76	87,53	12,32	10,18	839,00
48	1,594	2,131	100322,64	90,04	9,39	5,19	1458,20
49	1,114	3,323	100537,03	84,40	9,36	9,97	1553,00
50	5,780	2,734	101768,95	91,65	16,67	6,48	903,00
51	3,020	5,401	101724,67	92,25	12,26	10,61	1420,00
52	6,771	3,695	101264,32	89,20	18,38	7,98	1179,00
53	1,293	5,55	100414,62	91,39	15,48	10,17	1705,00
54	2,575	5,56	100988,51	93,69	13,23	11,28	972,00
55	1,185	4,196	100297,27	94,52	12,93	13,16	1412,00
56	1,921	4,813	102015,96	92,92	17,57	14,82	1171,00
57	3,503	4,63	101373,77	88,63	12,10	9,72	1325,00
58	1,549	2,582	100523,37	82,07	21,54	5,06	1045,00
59	10,588	5,074	100110,36	92,88	11,76	12,41	1588,80
60	1,652	3,618	101522,28	89,51	10,91	5,85	1800,00
61	2,876	2,157	100658,48	94,57	12,16	5,81	621,00
62	0,385	3,139	100913,43	91,96	19,26	6,20	1568,00
63	3,006	2,394	101173,61	91,23	21,36	5,71	1054,00
64	3,435	6,02	101225,96	95,34	13,74	11,61	1677,00
65	0,780	5,553	100861,01	88,77	19,46	8,95	1598,80
66	6,138	5,646	101871,16	92,73	18,62	12,05	1559,00
67	7,206	1,816	101471,19	93,10	18,12	5,46	464,00
68	2,976	4,773	101522,31	89,95	13,16	9,36	1449,00

Tab. 5.22 Intensità di pioggia, altezze significative massime e parametri meteorologici degli eventi concomitanti nella fascia ionica.

Per la fascia tirrenica risulta:

<i>N. Eventi</i>	<i>i</i> [mm/h]	<i>H_{smax}</i> [m]	<i>P_m</i> [Pa]	<i>U_m</i> [%]	<i>T_m</i> [°C]	<i>v_m</i> [m/s]	<i>ΔP</i> [Pa]
1	2,670	3,439	100320,23	83,86	14,68	12,22	1331,30
2	0,586	3,931	100277,11	82,60	10,79	8,43	2300,80
3	3,961	3,672	99738,48	87,66	18,62	10,48	1155,30
4	17,350	2,101	100877,38	91,25	18,78	8,69	93,00
5	0,559	2,702	100744,36	80,48	15,33	9,32	1078,00
6	6,080	1,497	101060,53	88,25	13,21	5,56	264,00
7	0,953	5,256	100237,37	85,03	12,69	11,13	1643,50
8	2,414	1,487	100491,93	85,73	12,82	7,32	338,00
9	1,087	2,979	100837,37	87,62	13,57	7,52	1706,70
10	2,834	2,606	101844,06	85,67	19,01	11,96	1285,00
11	3,381	1,93	101161,43	88,35	14,06	8,37	642,00
12	2,091	5,434	100478,84	90,39	10,46	9,77	2652,60
13	1,825	1,838	101011,76	88,21	18,78	8,34	1559,00
14	3,259	2,089	100910,44	91,21	15,88	8,40	449,00
15	5,743	1,068	101264,50	77,83	19,66	10,62	466,00
16	10,475	1,232	101391,75	91,65	15,03	9,73	227,00
17	2,960	2,574	101134,80	86,65	12,83	14,25	1340,00
18	1,660	4,338	99485,01	93,56	12,07	11,93	1076,60
19	3,353	3,049	100174,85	90,68	11,71	10,04	774,40
20	1,765	1,880	101003,48	89,52	11,27	9,93	893,00
21	1,548	4,721	99837,49	86,80	9,24	9,49	2306,00
22	1,245	3,187	99212,81	89,62	10,45	7,54	1200,20
23	3,104	2,374	99847,74	89,43	12,27	5,42	2428,20
24	10,967	1,386	101702,75	85,42	20,83	11,52	263,00
25	1,800	1,303	101443,52	82,67	19,23	10,48	684,00
26	0,981	2,924	101073,74	85,86	13,96	9,28	1416,00
27	1,413	4,758	99889,37	89,36	13,30	7,33	1619,80
28	1,126	5,541	100479,88	85,48	13,46	12,99	1549,20
29	2,266	4,405	100193,97	86,66	10,64	8,17	2193,80
30	1,642	4,041	100330,93	86,17	14,58	6,99	977,20
31	1,976	3,342	100542,93	92,66	13,55	8,24	1934,70

Tab. 5.23 Intensità di pioggia, altezze significative massime e parametri meteorologici degli eventi concomitanti nella fascia tirrenica.

5.4 Determinazione delle componenti principali

È stato visto che i parametri meteorologici sono dipendenti l'uno dall'altro. L'influenza che questi hanno sulle perturbazioni è tale da non permettere l'esclusione di nessuna grandezza. Allo stesso tempo le informazioni che si ricavano dall'esame delle variabili possono risultare ridondanti. Per tale ragione si ricorre all'analisi delle componenti principali.

In particolare per ogni fascia costiera lo studio è stato condotto sfruttando due gruppi di parametri. Una prima indagine è stata eseguita applicando la PCA alle variabili: U_m , ΔP , v_m e T_m ; la seconda indagine ha tenuto conto di: U_m , P_m , v_m e T_m . La differenza è circoscritta alla valutazione della pressione atmosferica (parametro fondamentale per la stima delle perturbazioni). I parametri considerati presentano unità di misura differenti. È stata perciò effettuata la standardizzazione dei dati applicando la 4.7. Le variabili così ottenute sono state organizzate in una matrice e hanno rappresentato i dati di input della function *pca* di MatLab. Le componenti principali sono state ottenute dall'implementazione dell'algoritmo:

$$[std_coeff, std_score, std_latent, std_explained] = pca(std_data)$$

La dimensione del problema non varia: le 4 variabili di origine sono state sostituite dalle 4 CP. Gli outputs restituiti dal software sono stati organizzati per fascia costiera e per tipologia di indagine eseguita.

FASCIA IONICA

1^a ANALISI: U_m , ΔP , v_m e T_m

La prima matrice ottenuta implementando la function *pca* è la *std_coeff* di dimensioni 4x4. Sono contenuti tutti i coefficienti necessari per la combinazione lineare delle variabili e la determinazione delle CP. Tali elementi consentono di conoscere il peso che ciascuna variabile ha su ogni componente principale.

std_coeff				
	1 ^a CP	2 ^a CP	3 ^a CP	4 ^a CP
U_m	-0,1594	0,9458	0,1342	-0,2492
ΔP	0,4642	-0,0948	0,8590	-0,1943
v_m	0,6226	0,3107	-0,1430	0,7038
T_m	-0,6095	-0,0022	0,4730	0,6362

Tab. 5.24 Matrice dei coefficienti- Fascia ionica, 1^a analisi.

I dati nello spazio delle componenti principali sono ottenuti dalla composizione delle variabili di origine, tenuto conto dei coefficienti presentati in tabella 5.24. La prima CP ad esempio è data dalla combinazione lineare dei 4 parametri atmosferici con i valori della prima colonna:

$$1^a CP = -0.1594 \cdot U_m + 0.4642 \cdot \Delta P + 0.6226 \cdot v_m - 0.6095 \cdot T_m \quad (5.1)$$

Si osserva che il peso maggiore nella prima componente principale è fornito dalla velocità media del vento e trascurabile è il contributo dell'umidità relativa media. Al contrario, tale parametro caratterizza quasi totalmente la 2^a CP.

La matrice nello spazio delle componenti principali è dunque data da:

std_score				
<i>N. Eventi</i>	1 ^a CP	2 ^a CP	3 ^a CP	4 ^a CP
1	0,1058	0,7970	-1,4558	0,1250
2	-0,7074	-1,3620	-0,9104	0,2620
3	2,4074	-1,9945	-1,0847	1,2216
4	-1,0030	0,5945	-0,9458	-0,3148
5	1,5322	-0,5381	1,0810	-0,2733
6	1,1145	0,9615	0,5931	-0,7134
7	-0,0693	-1,6862	-1,8467	-0,5099
8	-1,4268	-0,2865	0,7152	0,4918
9	1,2830	-1,9103	-0,5293	-0,4070
10	1,0543	-0,4919	-0,6809	-0,2336
11	-0,2990	0,1353	-0,8535	-1,3113
12	-0,2315	0,4021	-1,1702	-1,1161
13	0,5554	0,1272	-0,4427	-0,2768
14	1,3146	-0,9423	0,5123	0,7267
15	1,2941	-1,5446	0,6921	-0,7639
16	0,3485	-1,1820	-1,1065	-0,4404
17	-1,8181	0,3736	-0,8915	-0,0837
18	0,2807	0,4893	0,0986	0,3930
19	-0,0005	0,8544	-0,6054	-0,0490
20	1,7987	-1,3946	0,5269	0,0508
21	0,5295	-1,9290	-0,3704	-0,3632
22	-0,7709	-0,7416	0,4900	0,3215
23	-0,2404	-0,8211	-1,4591	0,7716
24	0,2115	0,8667	1,2143	-0,2903
25	2,2260	0,6712	0,9407	-0,1334
26	0,3447	0,5709	-0,7706	-0,5820
27	-0,9374	-0,2872	1,3224	0,0776
28	-1,6511	-0,0059	-0,4114	1,1007

29	-1,7310	0,6230	-0,9133	1,0531
30	-2,0985	-0,2157	0,2117	0,9043
31	2,6493	0,2851	-0,4214	0,9180
32	-0,7848	-0,8360	0,8368	1,7136
33	-1,0333	-1,1244	-0,0032	0,5918
34	-1,2121	0,9753	-0,3615	0,3595
35	0,2253	1,3899	-1,1774	-0,0837
36	-0,2595	0,6169	-0,8248	-0,7800
37	0,7621	1,6799	-1,1454	0,2757
38	1,3685	0,5831	-1,4088	0,6600
39	-0,9923	0,3793	1,5263	-0,3540
40	-2,5627	0,5255	-0,2028	0,1733
41	-1,4899	0,5896	-0,3753	-0,3505
42	-0,2576	-0,6671	2,9226	-0,9797
43	-2,3450	0,2696	0,2833	-1,0215
44	-1,3877	-0,6835	-1,2788	0,3841
45	0,9892	0,1754	0,6335	0,7155
46	0,9181	1,7249	0,4127	-0,4548
47	0,5939	-0,5102	-0,8748	0,2104
48	0,2565	-0,5407	0,1277	-2,1150
49	1,7993	-1,5301	-0,2197	-0,3953
50	-1,1904	0,1626	0,1649	-0,4010
51	0,9927	0,7533	0,2140	-0,2380
52	-0,7477	-0,3830	0,6475	0,3973
53	0,6358	0,4072	1,0791	0,1575
54	0,5429	1,3176	-0,3629	0,1782
55	1,4039	1,7044	0,2318	0,4362
56	0,9108	1,5055	0,2850	1,9125
57	0,8849	-0,3476	-0,0512	-0,2151
58	-1,7836	-2,7058	0,7265	0,6965
59	1,6433	1,1223	0,3423	0,0774
60	0,4911	-0,6678	0,8148	-1,7479
61	-0,9891	0,9422	-0,7179	-1,4868
62	-1,1289	0,0951	1,5973	-0,2956
63	-2,0126	-0,0800	1,0410	0,1717
64	1,0739	1,6911	0,8831	-0,0196
65	-0,3011	-0,4571	1,3900	0,7387
66	0,3919	1,0376	1,1959	1,1900
67	-2,1367	0,5151	-0,2378	-0,3845
68	0,6652	-0,0477	0,3579	-0,2724

Tab. 5.25 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia ionica, 1ª analisi.

Le righe corrispondono agli eventi considerati e le colonne sono relative alle componenti principali. La dimensione è 68x4. Ogni elemento è ottenuto dalla combinazione lineare delle variabili, come indicato nella 5.1.

Gli ultimi outputs restituiti dalla funzione sono il vettore della varianza delle componenti principali (std_latent) e il vettore delle percentuali della varianza totale (std_explained).

std_latent		std_explained	
1 ^a CP	1.5658	1 ^a CP	39.15
2 ^a CP	1.0174	2 ^a CP	25.43
3 ^a CP	0.8571	3 ^a CP	21.43
4 ^a CP	0.5597	4 ^a CP	13.99

Tab. 5.26 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia ionica, 1^a analisi.

Il vettore std_latent ordina le componenti al decrescere del valore di varianza, affidando alla 1^a componente il massimo. Analizzando il vettore std_explained, si evince che le prime 3 componenti principali rappresentano l'86% dell'intera varianza. Sono sufficienti a spiegare la variabilità dell'intero sistema dei dati.

2^a ANALISI: U_m , P_m , v_m e T_m

La seconda analisi è stata eseguita considerando i valori medi di tutte le variabili osservate durante gli eventi. Il procedimento è analogo al primo studio e i risultati sono i seguenti:

std_coeff				
	1 ^a CP	2 ^a CP	3 ^a CP	4 ^a CP
U_m	0,4090	0,6285	-0,5220	-0,4065
P_m	0,6082	0,2808	0,2785	0,6883
v_m	-0,3678	0,6442	0,6410	-0,1972
T_m	0,5724	-0,3334	0,4889	-0,5676

Tab. 5.27 Matrice dei coefficienti- Fascia ionica, 2^a analisi.

In questa analisi, la pressione atmosferica media ha il peso maggiore nella formulazione della prima componente principale e fa risentire il suo contributo anche nella 4^a CP. Rispetto al primo studio si registrano differenze significative tra i coefficienti ma nessuna variabile si impone in maniera evidente sulle altre. Per la seconda componente, ad esempio, il contributo della U_m e

della P_m è significativo alla pari. Per quanto concerne la 3^a CP il peso più importante è rappresentato dalla velocità media. Le 4 CP sono date da:

$$\begin{aligned}
 1^a CP &= 0.4090 \cdot U_m + 0.6082 \cdot P_m - 0.3678 \cdot v_m - 0.5724 \cdot T_m \\
 2^a CP &= 0.6285 \cdot U_m + 0.2808 \cdot P_m + 0.6442 \cdot v_m - 0.3334 \cdot T_m \\
 3^a CP &= -0.5220 \cdot U_m + 0.2785 \cdot P_m + 0.6410 \cdot v_m + 0.4889 \cdot T_m \\
 4^a CP &= -0.4065 \cdot U_m + 0.6883 \cdot P_m - 0.1972 \cdot v_m - 0.5676 \cdot T_m
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

I dati nello spazio delle componenti principali sono:

std_score				
<i>N. Eventi</i>	1 ^a CP	2 ^a CP	3 ^a CP	4 ^a CP
1	-0,3496	0,9629	-0,1819	0,1150
2	-0,8320	-1,5320	0,1798	-0,0840
3	-3,8207	-0,7016	1,4408	-0,0875
4	1,0399	0,3704	-0,4360	0,5216
5	-0,9051	0,0586	0,1896	0,2649
6	0,1947	1,3659	-0,4778	0,4882
7	-1,6034	-1,3399	-0,3224	0,9221
8	1,5307	-0,8305	0,5022	-0,2165
9	-2,2425	-1,1414	0,0817	0,7472
10	-2,4952	-0,4249	-0,5690	-0,7971
11	-0,8610	-0,3650	-1,6738	-0,2351
12	-0,6630	0,0831	-1,4562	0,0074
13	0,2958	0,7942	0,1473	1,2347
14	-2,1608	-0,6897	0,6297	-1,0648
15	-1,5142	-0,9962	-0,1775	0,5687
16	-1,9259	-1,0622	-0,4965	0,0397
17	1,1051	-0,3996	-0,5034	-0,1986
18	-0,3493	0,3906	0,1089	-0,7073
19	0,1682	0,8516	-0,2628	0,0051
20	-2,7968	-0,9599	0,1565	-0,6916
21	-1,2294	-1,3402	0,2153	1,0100
22	1,2218	-0,6903	0,7375	0,6735
23	-1,1832	-0,7287	0,5263	-0,2219
24	1,0246	0,7860	-0,1778	-0,0379
25	-1,1811	1,3564	0,0267	-0,2064
26	-1,7705	0,0550	-1,3241	-1,2914
27	1,2095	-0,8282	0,1577	-0,3546
28	0,9404	-0,6610	0,6657	-0,7538

29	1,7314	0,2283	0,7353	-0,0304
30	1,9054	-0,9426	0,7420	-0,3299
31	-1,7566	1,7217	1,2056	0,4238
32	0,9564	-0,8894	1,8530	-0,3809
33	0,8772	-1,1259	0,9066	0,5524
34	1,2486	0,4119	-0,0603	-0,4344
35	0,3208	1,6533	-0,2813	0,4322
36	0,2895	0,5549	-0,8600	0,5106
37	-0,8205	1,7697	-0,3520	-0,6998
38	-0,5720	1,7567	0,8823	1,0572
39	1,5014	-0,3961	-0,4202	-0,5546
40	2,0995	-0,6480	-0,3107	-0,5450
41	1,2767	-0,1104	-0,6496	-0,0992
42	0,8220	-1,3492	-0,6422	-0,5484
43	2,1743	-0,8751	-1,1794	0,0826
44	0,9332	-0,6719	0,5246	0,9302
45	-0,2151	0,6546	0,8732	-0,1163
46	0,4712	1,9306	-0,5167	0,0543
47	-1,9612	-0,4566	-0,1216	-0,6854
48	-0,6552	-0,6784	-1,8474	0,6841
49	-1,8777	-0,4090	0,3147	1,1702
50	1,5891	-0,2003	-0,2847	0,5094
51	0,3309	1,3601	0,0764	0,7578
52	0,9567	-0,6011	0,5278	-0,0168
53	-0,2043	0,3339	0,0684	-0,7348
54	-0,0051	1,4536	-0,0993	-0,2538
55	-0,7553	1,8752	-0,0249	-1,0528
56	0,8439	2,1899	1,8645	-0,2267
57	-0,2663	0,3525	0,2614	0,9822
58	0,4585	-3,2192	1,0372	-0,0649
59	-1,1692	1,4186	-0,1864	-0,7760
60	0,3357	-0,3215	-0,9721	1,4950
61	0,4866	0,1844	-1,8963	-0,0448
62	1,4208	-0,7524	-0,3586	-0,6458
63	1,9312	-1,1139	-0,0005	-0,6201
64	0,4064	1,8790	-0,1187	-0,3505
65	0,6238	-0,6709	0,8474	-0,5584
66	1,2823	1,2933	1,2754	-2,7376
67	1,9139	-0,4339	-0,6806	-0,0647
68	0,2242	0,4600	0,1615	0,8161

Tab. 5.28 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia ionica, 2^a analisi.

La matrice dei dati è nuovamente una 68x4.

Il vettore della varianza delle componenti principali (std_latent) e il vettore delle percentuali della varianza totale (std_explained), sono di seguito presentati:

std_latent		std_explained	
1 ^a CP	1.8253	1 ^a CP	45.63
2 ^a CP	1.1754	2 ^a CP	29.38
3 ^a CP	0.6088	3 ^a CP	15.22
4 ^a CP	0.3905	4 ^a CP	9.76

Tab. 5.29 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia ionica, 2^a analisi.

Dalla tabella std_explained si denota che le prime 3 componenti principali riescono a rappresentare più del 90% dell'intera varianza. Concentrandosi solo sulla 1^a CP e sulla 2^a CP, il 75% della variabilità dei dati è ben espressa.

Le due analisi hanno consentito di mettere in risalto l'importanza concettuale di alcune grandezze, semplicemente elaborandole in maniera diversa. Le matrici dei dati nel campo delle componenti principali sono state sfruttate per l'applicazione del modello di regressione lineare multipla, fornendo risultati diversi e significativi. Le differenze sostanziali hanno riguardato la scelta di operare con l'abbassamento della pressione atmosferica o con il valor medio.

Analogo procedimento di analisi è stato seguito per la fascia tirrenica.

FASCIA TIRRENICA

1^a ANALISI: U_m , ΔP , v_m e T_m

Gli eventi analizzati per la fascia tirrenica sono 31. La dimensione del problema è inferiore rispetto al caso ionico. Implementando nuovamente l'algoritmo di analisi, sono stati ricavati i seguenti risultati:

std_coeff				
	1 ^a CP	2 ^a CP	3 ^a CP	4 ^a CP
U_m	-0,3923	0,5836	0,6422	0,3052
ΔP	-0,5245	-0,5817	-0,0846	0,6159
v_m	0,3684	-0,5360	0,7544	-0,0889
T_m	0,6597	0,1839	-0,1066	0,7208

Tab. 5.30 Matrice dei coefficienti- Fascia tirrenica, 1^a analisi.

Rispetto al caso ionico, nella prima componente principale il peso maggiore è dato dalla temperatura media. Il contributo più grande dell'umidità relativa media e della velocità media si ha nella 3^a componente, mentre l'abbassamento ΔP si fa sentire notevolmente nella 4^a CP.

Per quanto riguarda i dati nello spazio delle componenti si ha:

std_score				
N. Eventi	1^a CP	2^a CP	3^a CP	4^a CP
1	0,8849	-1,3640	0,3708	-0,2322
2	-1,1752	-1,6117	-1,2170	-0,2305
3	1,1075	0,0871	0,3170	0,9196
4	1,2070	2,0176	0,4418	0,4253
5	1,0667	-0,9289	-1,2890	-0,4713
6	-0,3076	1,8668	-1,0739	-0,8257
7	-0,0867	-1,2590	0,2196	-0,2702
8	0,1474	0,9144	-0,8902	-1,1440
9	-0,8771	0,1019	-0,6616	0,3649
10	1,5771	-0,7075	0,4656	0,8849
11	0,0786	0,9001	-0,1087	-0,4164
12	-2,1311	-0,9759	0,6546	0,6142
13	0,4036	0,4107	-0,1189	1,4452
14	0,2912	1,6280	0,3845	0,0803
15	2,9501	-0,9495	-1,3724	-0,2921
16	0,4628	1,4874	1,0046	-0,3268
17	0,5419	-1,5429	1,6816	-0,4935
18	-0,6026	0,3697	2,1510	-0,1972
19	-0,4718	0,6082	0,9871	-0,7087
20	-0,5430	0,3229	0,7352	-0,8033
21	-1,7833	-1,2853	-0,0173	-0,2635
22	-1,3753	0,6569	-0,1238	-0,6149
23	-2,2530	0,2792	-1,1370	0,9386
24	2,6605	0,3062	0,3200	0,4173
25	2,1370	-0,3165	-0,5557	0,2219
26	-0,0734	-0,3832	-0,3186	-0,0237
27	-1,0950	0,4920	-0,3934	0,3866
28	0,4259	-1,5441	0,9627	-0,2157
29	-1,6256	-0,7939	-0,5571	0,0052
30	-0,0615	0,6530	-1,0638	-0,1367
31	-1,4801	0,5603	0,4952	0,9624

Tab. 5.31 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia tirrenica, 1^a analisi.

La matrice dei dati nello spazio delle componenti principali ha dimensione 31x4.

I vettori relativi alla varianza sono:

std_latent		std_explained	
1 ^a CP	1.7423	1 ^a CP	43.56
2 ^a CP	1.1001	2 ^a CP	27.50
3 ^a CP	0.7811	3 ^a CP	19.53
4 ^a CP	0.3765	4 ^a CP	9.41

Tab. 5.32 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia tirrenica, 1^a analisi.

Con le prime 3 componenti si copre più del 90% della varianza totale.

L'ultima analisi delle componenti principali ha riguardato l'elaborazione dei parametri meteorologici medi.

2^a ANALISI: U_m , P_m , v_m e T_m

Analogamente a quanto visto in precedenza, per la seconda analisi, l'implementazione dell'algoritmo ha restituito i seguenti risultati:

std_coeff				
	1 ^a CP	2 ^a CP	3 ^a CP	4 ^a CP
U_m	-0,4341	-0,3264	0,8388	0,0368
P_m	0,5769	-0,3791	0,1817	-0,7003
v_m	0,3740	0,7826	0,4975	0,0135
T_m	0,5821	-0,3705	0,1258	0,7128

Tab. 5.33 Matrice dei coefficienti- Fascia tirrenica, 2^a analisi.

Il contributo più importante in termini di umidità relativa media si ha nella 3^a componente principale. Nella 2^a CP il peso maggiore è fornito dalla velocità media. Si potrebbe considerare tale componente come rappresentativa dell'azione del vento. L'ultima CP risente in maniera positiva della temperatura media ma negativamente della pressione atmosferica media. Le 4 nuove variabili sono perciò date dalla seguente combinazione lineare:

$$\begin{aligned}
 1^a CP &= -0.4341 \cdot U_m + 0.5769 \cdot P_m + 0.3740 \cdot v_m + 0.5821 \cdot T_m \\
 2^a CP &= -0.3264 \cdot U_m - 0.3791 \cdot P_m + 0.7826 \cdot v_m - 0.3705 \cdot T_m \\
 3^a CP &= 0.8388 \cdot U_m + 0.1817 \cdot P_m + 0.4975 \cdot v_m + 0.1258 \cdot T_m
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

$$4^a CP = 0.0368 \cdot U_m - 0.7003 \cdot P_m - 0.0135 \cdot v_m - 0.7128 \cdot T_m$$

Sostituendo i dati standardizzati alla 5.3, si ottiene la seguente matrice 31x4:

std_score				
N. Eventi	1^a CP	2^a CP	3^a CP	4^a CP
1	0,7430	1,5061	-0,2098	0,3899
2	-0,5417	0,6772	-1,5829	-0,4807
3	0,1695	0,3771	0,2694	1,9401
4	0,4542	-1,3158	1,0215	0,7666
5	1,1338	0,3999	-1,5619	0,0215
6	-0,6067	-1,6728	-0,6123	-0,7434
7	-0,0406	1,2696	-0,2939	0,0338
8	-0,5613	-0,3987	-0,9662	-0,2296
9	-0,3103	-0,7890	-0,3421	-0,4139
10	2,6347	-0,1626	0,7605	-0,2679
11	0,1333	-0,7830	0,1471	-0,6417
12	-1,1389	0,3811	0,6313	-0,6842
13	0,8845	-1,2469	0,2542	0,5873
14	-0,0992	-1,1020	0,8365	0,0737
15	2,9598	0,3191	-1,5597	0,4194
16	0,3588	-0,8217	1,3619	-0,6292
17	1,1526	1,7548	1,0985	-0,8701
18	-1,7298	1,2982	1,6887	0,8058
19	-1,1668	0,4877	0,7305	-0,0666
20	-0,3858	0,1176	0,6426	-1,0788
21	-1,5476	1,1281	-0,5177	-0,3045
22	-2,5800	0,3568	-0,4437	0,6639
23	-2,0351	-1,0145	-0,7452	0,3722
24	2,7965	-0,4379	0,6295	0,2931
25	2,4201	-0,3618	-0,4116	0,1773
26	0,5067	-0,1470	-0,2540	-0,5884
27	-1,4540	-0,4308	-0,2512	0,5710
28	0,6000	1,6971	0,3577	-0,0373
29	-1,1903	0,2685	-0,7113	-0,3836
30	-0,4934	-0,6751	-0,9142	0,3457
31	-1,0660	-0,8050	0,9482	-0,0414

Tab. 5.34 Matrice dei dati nello spazio delle componenti principali- Fascia tirrenica, 2^a analisi.

Il vettore della varianza delle componenti principali (std_latent) e il vettore delle percentuali della varianza totale (std_explained) sono:

std_latent		std_explained	
1 ^a CP	1.9771	1 ^a CP	49.43
2 ^a CP	0.8746	2 ^a CP	21.87
3 ^a CP	0.7585	3 ^a CP	18.96
4 ^a CP	0.3898	4 ^a CP	9.74

Tab. 5.35 Vettore della varianza delle componenti (sinistra); vettore delle percentuali di varianza (destra)- Fascia tirrenica, 2^a analisi.

La varianza totale delle prime 3 componenti è superiore al 90%.

Il numero di CP da analizzare deve essere opportunamente considerato. La scelta sulla base della percentuale di varianza rappresentata può essere effettuata anche graficamente:

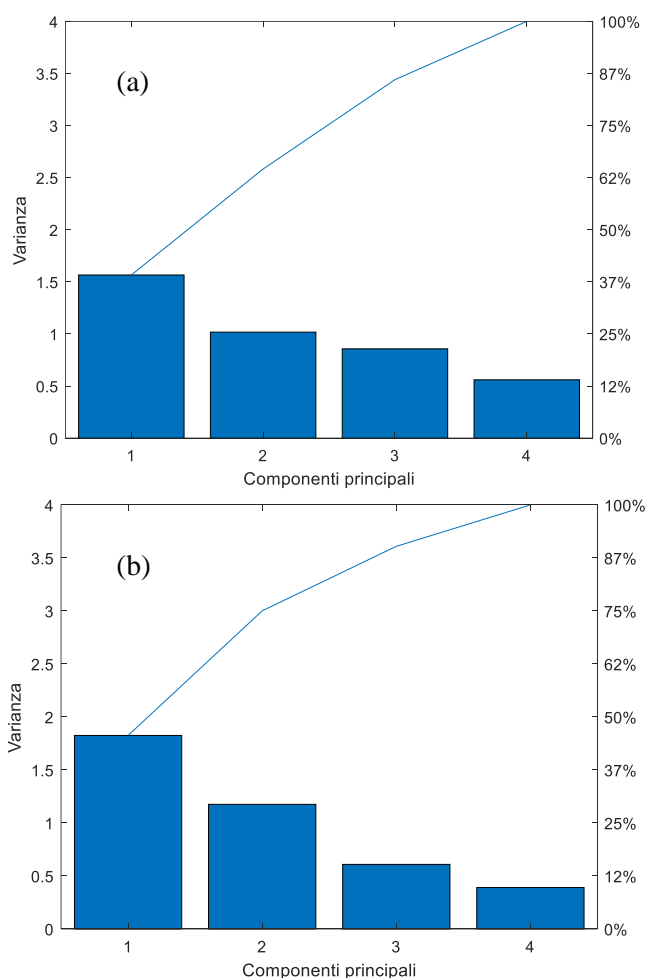


Fig. 5.1 Varianza delle componenti principali e "Screen Plot" – (a)Fascia ionica, 1^a analisi; (b)Fascia ionica, 2^a analisi

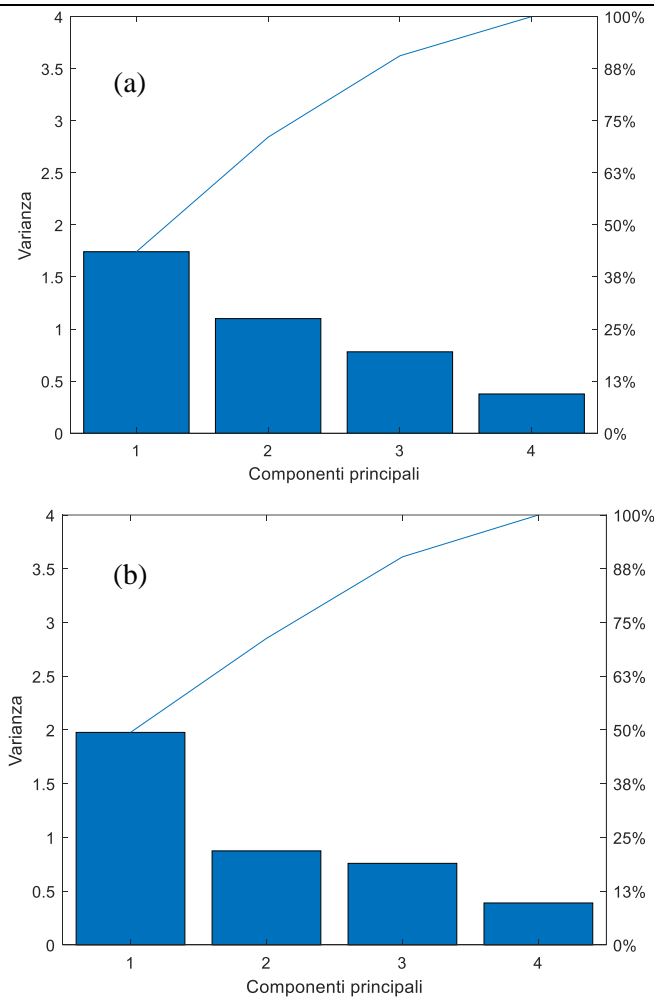


Fig. 5.2 *Varianza delle componenti principali e “Screen Plot” – (a)Fascia tirrenica, 1ª analisi; (b)Fascia tirrenica, 2ª analisi*

Le due analisi forniscono la base per l'applicazione del modello di regressione lineare multipla. Sono state ottenute 4 matrici di dati nello spazio delle componenti principali (2 per ogni fascia costiera) che verranno opportunamente elaborate per ottenere le relazioni desiderate.

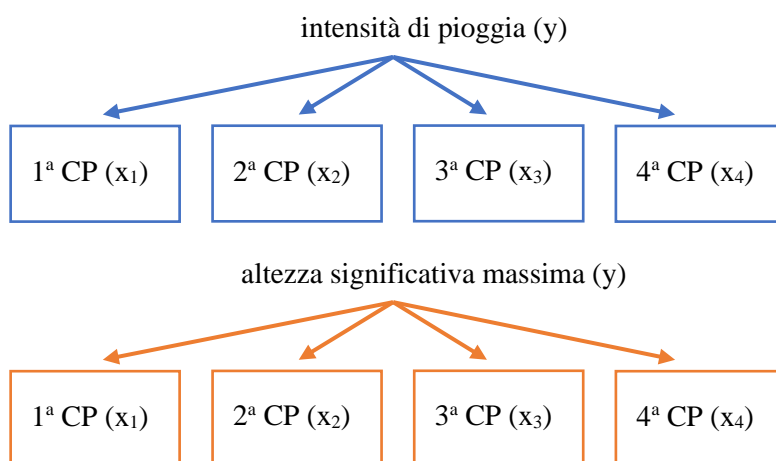
Se da un lato bisogna soddisfare la varianza dei dati, dall'altro è necessario garantire una buona significatività del modello. L'obiettivo è ricavare delle relazioni in grado di interpretare gli eventi concomitanti. Per tale ragione entrano in gioco le variabili caratterizzanti: le intensità di pioggia e le altezze significative massime.

Le due analisi consentiranno di mettere in luce le differenze tra le due fasce costiere.

Nel prossimo paragrafo verranno esaminate le migliori soluzioni per le tipologie di studio presentate.

5.5 Il modello della regressione lineare multipla applicato alle componenti principali

Il modello di regressione lineare multipla consente di spiegare l'effetto di più variabili indipendenti (predittori) sulla variabile dipendente. Gli obiettivi dello studio sono molteplici. Si applica tale modello per conoscere la relazione esistente tra le suddette variabili o per predire il comportamento del fenomeno sulla base di informazioni quantificabili e note. Per quanto concerne l'analisi oggetto della tesi, si intende valutare il legame tra le intensità di pioggia e le altezze significative massime con le variabili esplicative rappresentate dalle componenti principali. Il legame che intercorre tra l'intensità di pioggia e le variabili meteorologiche è comprensibile. Pressione atmosferica, umidità, vento e temperatura sono i parametri principali nella valutazione di un evento pluviometrico. Anche l'agitazione ondosa ne è influenzata. In maniera diretta, attraverso l'azione del vento e in maniera indiretta, attraverso la combinazione dei restanti parametri.



Le due variabili dipendenti sono state relazionate con le componenti principali ottenute nei due scenari presentati nel paragrafo precedente. Ciò ha permesso di valutare l'influenza dei parametri meteorologici sotto forme diverse. Nell'applicazione del modello, non tutte le 4 CP sono state considerate. La motivazione riguarda la volontà di semplificare il processo di analisi senza perdere informazioni importanti ma anche la necessità di ottenere delle relazioni statisticamente significative. Per tale ragione il procedimento di scelta delle variabili esplicative ha consentito di non approssimare impropriamente i legami ottenuti. Sono stati effettuati i test di significatività e l'analisi dei residui al fine di ottenere delle espressioni soddisfacenti. Per ciascuna fascia costiera sono state ottenute 4 relazioni (2 per ogni tipo di analisi e variabile dipendente). Tra queste, sono state scelte le 2 più significative in termini di modello e di rappresentatività della varianza dei dati.

ANALISI DELL'INTENSITA' DI PIOGGIA

Il modello di regressione lineare multipla è stato applicato alle matrici dei dati nello spazio delle componenti principali per i due scenari di analisi. Le variabili esplicative considerate sono state valutate sulla base dei valori di significatività ottenuti dal test di Student. Tra le possibili relazioni considerate la più significativa prevede la scelta delle prime 2 CP ottenute nell'analisi di U_m , P_m , v_m e T_m . La variabile dipendente y è rappresentata da $\ln(i)$:

$\ln(i)$ y	1^a CP x₁	2^a CP x₂
1,6323	-0,3496	0,9629
-0,2357	-0,8320	-1,5320
0,7187	-3,8207	-0,7016
0,6173	1,0399	0,3704
-0,6529	-0,9051	0,0586
0,2877	0,1947	1,3659
0,2877	-1,6034	-1,3399
0,9636	1,5307	-0,8305
-0,0953	-2,2425	-1,1414
-0,1892	-2,4952	-0,4249
0,1423	-0,8610	-0,3650
0,4026	-0,6630	0,0831
0,6829	0,2958	0,7942
0,1335	-2,1608	-0,6897
0,0892	-1,5142	-0,9962
0,0051	-1,9259	-1,0622
0,7655	1,1051	-0,3996
0,4700	-0,3493	0,3906
0,8755	0,1682	0,8516
0,5718	-2,7968	-0,9599
0,2938	-1,2294	-1,3402
0,7648	1,2218	-0,6903
0,6242	-1,1832	-0,7287
1,1857	1,0246	0,7860
1,3806	-1,1811	1,3564
1,1164	-1,7705	0,0550
1,1034	1,2095	-0,8282
1,6341	0,9404	-0,6610
2,7762	1,7314	0,2283
1,4277	1,9054	-0,9426

0,8018	-1,7566	1,7217
1,1576	0,9564	-0,8894
1,1924	0,8772	-1,1259
0,5077	1,2486	0,4119
1,8684	0,3208	1,6533
0,1285	0,2895	0,5549
1,5115	-0,8205	1,7697
1,6883	-0,5720	1,7567
0,9909	1,5014	-0,3961
0,8313	2,0995	-0,6480
1,4732	1,2767	-0,1104
0,2651	0,8220	-1,3492
1,1707	2,1743	-0,8751
2,1715	0,9332	-0,6719
0,9139	-0,2151	0,6546
1,4464	0,4712	1,9306
-0,3567	-1,9612	-0,4566
0,4662	-0,6552	-0,6784
0,1075	-1,8777	-0,4090
1,7544	1,5891	-0,2003
1,1051	0,3309	1,3601
1,9127	0,9567	-0,6011
0,2570	-0,2043	0,3339
0,9458	-0,0051	1,4536
0,1699	-0,7553	1,8752
0,6528	0,8439	2,1899
1,2536	-0,2663	0,3525
0,4373	0,4585	-3,2192
2,3597	-1,1692	1,4186
0,5020	0,3357	-0,3215
1,0565	0,4866	0,1844
-0,9537	1,4208	-0,7524
1,1006	1,9312	-1,1139
1,2340	0,4064	1,8790
-0,2487	0,6238	-0,6709
1,8145	1,2823	1,2933
1,9750	1,9139	-0,4339
1,0906	0,2242	0,4600

Tab. 5.36 Studio delle intensità di pioggia: variabili dipendente (y) e indipendenti (x₁, x₂) per la stima del modello di regressione.

Applicando il modello di regressione lineare multipla, si ottengono i seguenti coefficienti di regressione e i relativi valori di significatività:

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,523686417
R ²	0,274247463
\check{R}^2	0,251916616
Errore standard	0,63184529
Osservazioni	68
Significatività del modello (p-value)	2,9897·10 ⁻⁵

Tab. 5.37 Studio delle intensità di pioggia: statistica della regressione e significatività del modello.

Si denota che il valore di \check{R}^2 è abbastanza basso e l'errore standard è considerevole. Ciò porterebbe a pensare che la varianza delle y non è spiegata dal modello e l'equazione non interpola bene i dati. In realtà tali valori vanno associati alla significatività espressa dal test F. Il p-value è di molto inferiore al valore soglia (0.05) a conferma dell'esistenza di una relazione lineare tra almeno una variabile esplicativa e la variabile dipendente. Inoltre, dai residui calcolati per ogni punto, si evince che i valori ottenuti da modello sono molto spesso sovrastimati, a vantaggio di sicurezza per la definizione del problema. Per quanto riguarda i regressori, si ha:

	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>
Intercetta	0,831391	0,076622496	10,8505	3,13609·10 ⁻⁶
1^a CP	0,223348	0,057135534	3,90909	0,000223649
2^a CP	0,216914	0,071200997	3,04651	0,003343497

Tab. 5.38 Studio delle intensità di pioggia: stima dei coefficienti regressori

Il test relativo alla significatività dei predittori ha restituito ottimi risultati. L'intercetta e i coefficienti relativi alle componenti principali consentono di rigettare l'ipotesi nulla.

In una prima analisi le componenti principali considerate come variabili dipendenti erano 3. L'ultima è stata esclusa in quanto il test t non era soddisfatto.

Per quanto riguarda la conferma circa l'assunzione di linearità del modello, si fa ricorso all'andamento dei residui. Il tracciato ottenuto in funzione delle due variabili esplicative potrebbe rivelare l'esistenza di un legame non lineare tra la y e le relative x. Il diagramma di dispersione non presenta significative strutture e i valori sono perlopiù concentrati attorno allo 0:

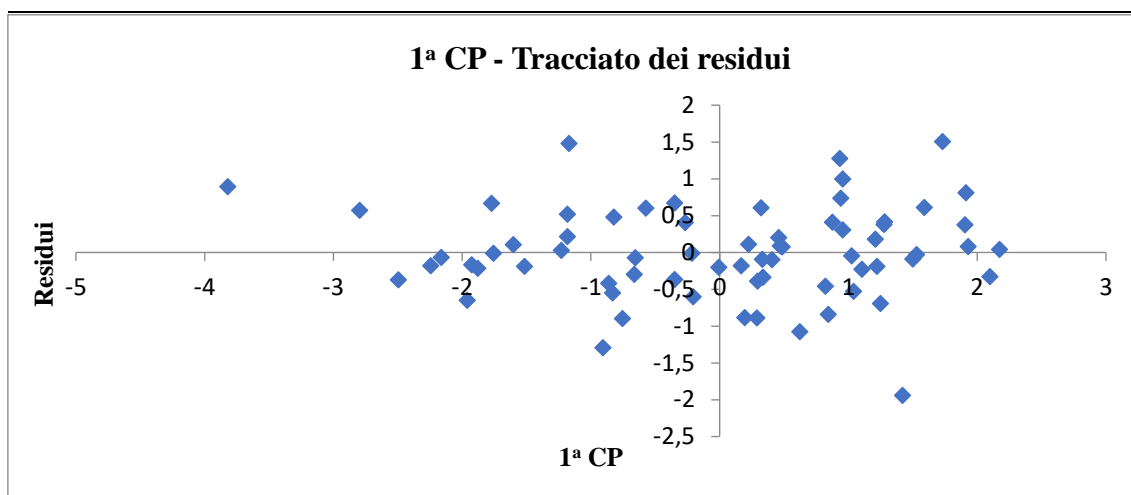


Fig. 5.3 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 1ª CP

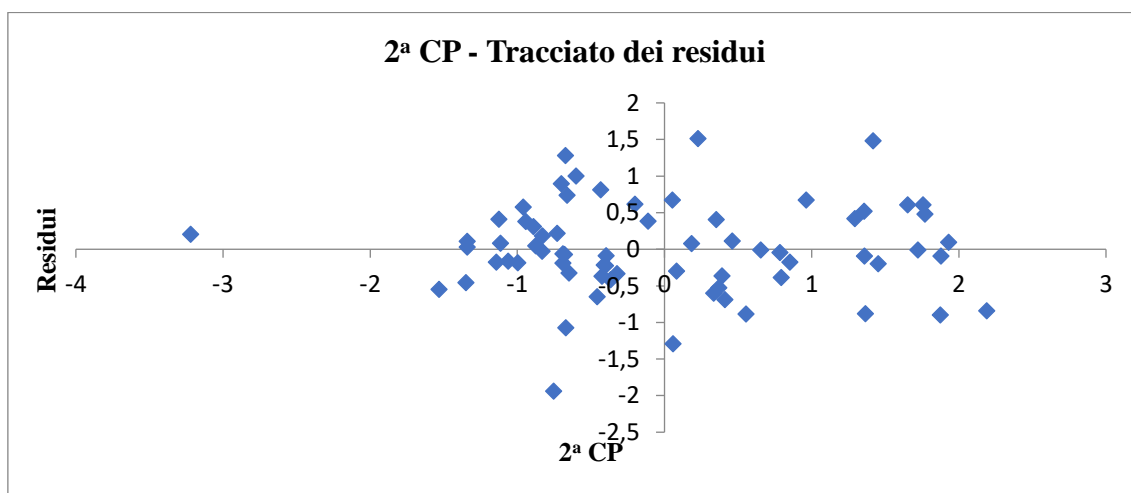


Fig. 5.4 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 2ª CP

Il modello di regressione lineare multipla consente di ricavare una relazione tra l'intensità di pioggia espressa in forma logaritmica e le variabili esplicative:

$$\ln(i) = 0.8314 + 0.2233 \cdot x_1 + 0.2169 \cdot x_2 \quad (5.4)$$

Le due variabili indipendenti corrispondono rispettivamente alla prima e alla seconda componente principale dell'analisi effettuata considerando i parametri meteorologici U_m , P_m , T_m e v_m . La dimensione del problema è stata ridotta, garantendo comunque la significatività del modello. La relazione 5.4 fornisce un utile strumento di indagine per la valutazione dell'intensità di pioggia lungo la fascia ionica.

Lo stesso procedimento di analisi è stato adottato per le altezze significative massime delle mareggiate.

ANALISI DELL'ALTEZZA SIGNIFICATIVA MASSIMA

Il modello di regressione delle componenti principali ha consentito di studiare la relazione che intercorre tra le altezze significative massime e le componenti principali. Anche in questo caso l'indagine è stata condotta per entrambe le categorie di variabili. Tra le diverse soluzioni ricavate, la più significativa è stata ottenuta sfruttando le prime 3 CP della matrice dei dati nello spazio delle componenti principali per le variabili U_m , ΔP , T_m e v_m .

La variabile dipendente è $\ln(H_{smax})$:

$\ln(H_{smax})$ y	1^a CP x₁	2^a CP x₂	3^a CP x₃
1,1731	0,1058	0,7970	-1,4558
0,7542	-0,7074	-1,3620	-0,9104
1,1298	2,4074	-1,9945	-1,0847
0,9768	-1,0030	0,5945	-0,9458
1,5992	1,5322	-0,5381	1,0810
1,3491	1,1145	0,9615	0,5931
0,8096	-0,0693	-1,6862	-1,8467
0,6323	-1,4268	-0,2865	0,7152
0,4983	1,2830	-1,9103	-0,5293
0,7509	1,0543	-0,4919	-0,6809
0,4923	-0,2990	0,1353	-0,8535
1,0101	-0,2315	0,4021	-1,1702
1,3788	0,5554	0,1272	-0,4427
1,0181	1,3146	-0,9423	0,5123
0,4008	1,2941	-1,5446	0,6921
0,6049	0,3485	-1,1820	-1,1065
1,0651	-1,8181	0,3736	-0,8915
1,5527	0,2807	0,4893	0,0986
1,2453	-0,0005	0,8544	-0,6054
1,1933	1,7987	-1,3946	0,5269
0,8002	0,5295	-1,9290	-0,3704
0,9018	-0,7709	-0,7416	0,4900
0,6005	-0,2404	-0,8211	-1,4591
1,5250	0,2115	0,8667	1,2143
1,9218	2,2260	0,6712	0,9407
1,1207	0,3447	0,5709	-0,7706
1,1848	-0,9374	-0,2872	1,3224
0,9958	-1,6511	-0,0059	-0,4114
0,9207	-1,7310	0,6230	-0,9133
0,7120	-2,0985	-0,2157	0,2117

1,7628	2,6493	0,2851	-0,4214
1,3623	-0,7848	-0,8360	0,8368
0,8242	-1,0333	-1,1244	-0,0032
0,8299	-1,2121	0,9753	-0,3615
1,8374	0,2253	1,3899	-1,1774
0,9582	-0,2595	0,6169	-0,8248
1,4298	0,7621	1,6799	-1,1454
1,6154	1,3685	0,5831	-1,4088
1,1851	-0,9923	0,3793	1,5263
0,8700	-2,5627	0,5255	-0,2028
0,7547	-1,4899	0,5896	-0,3753
1,1066	-0,2576	-0,6671	2,9226
0,3271	-2,3450	0,2696	0,2833
0,4305	-1,3877	-0,6835	-1,2788
1,7179	0,9892	0,1754	0,6335
1,7078	0,9181	1,7249	0,4127
0,7090	0,5939	-0,5102	-0,8748
0,7566	0,2565	-0,5407	0,1277
1,2009	1,7993	-1,5301	-0,2197
1,0058	-1,1904	0,1626	0,1649
1,6866	0,9927	0,7533	0,2140
1,3070	-0,7477	-0,3830	0,6475
1,7138	0,6358	0,4072	1,0791
1,7156	0,5429	1,3176	-0,3629
1,4341	1,4039	1,7044	0,2318
1,5713	0,9108	1,5055	0,2850
1,5326	0,8849	-0,3476	-0,0512
0,9486	-1,7836	-2,7058	0,7265
1,6241	1,6433	1,1223	0,3423
1,2859	0,4911	-0,6678	0,8148
0,7687	-0,9891	0,9422	-0,7179
1,1439	-1,1289	0,0951	1,5973
0,8730	-2,0126	-0,0800	1,0410
1,7951	1,0739	1,6911	0,8831
1,7143	-0,3011	-0,4571	1,3900
1,7309	0,3919	1,0376	1,1959
0,5966	-2,1367	0,5151	-0,2378
1,5630	0,6652	-0,0477	0,3579

Tab. 5.39 Studio delle altezze significative massime: variabili dipendente (y) e indipendenti (x1, x2, x3) per la stima del modello di regressione.

Combinando opportunamente i dati e applicando il metodo dei minimi quadrati si perviene ai seguenti coefficienti caratteristici del modello:

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,787294164
R ²	0,6198321
\bar{R}^2	0,60201173
Errore standard	0,263949528
Osservazioni	68
Significatività del modello (p-value)	1,8595·10 ⁻¹³

Tab. 5.40 Studio delle altezze significative massime: statistica della regressione e significatività del modello.

Il valore di R² corretto è molto soddisfacente. Più del 60% dei dati è interpolato dall'equazione di regressione. L'errore percentuale calcolato sulla media dei valori osservati è del 23%, tenuto conto dell'errore standard pari a 0,2639. In aggiunta a tale risultato, si considera la significatività del modello. Il p-value ottenuto è inferiore al valore soglia.

Per quanto riguarda la significatività statistica dei predittori, il test t di Student ha restituito i seguenti risultati:

	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>
Intercetta	1,142869	0,032009	35,705095	5,62029·10 ⁻⁴⁴
1^a CP	0,177608	0,025770	6,892096	2,87618·10 ⁻⁹
2^a CP	0,201386	0,031970	6,299210	3,0987·10 ⁻⁸
3^a CP	0,144312	0,034832	4,143143	0,000102452

Tab. 5.41 Studio delle altezze significative massime: stima dei coefficienti regressori

Il p-value è molto al di sotto della soglia. I tre predittori concorrono alla stima del modello di regressione.

Per la verifica della sussistenza dell'ipotesi di linearità si analizzano i tracciati dei residui per le tre variabili esplicative. Anche in questo caso la nuvola di punti non assume connotati riconducibili a particolari andamenti strutturati. Si può ritenere lineare il legame tra la y e le tre x. I diagrammi dei residui sono di seguito presentati:

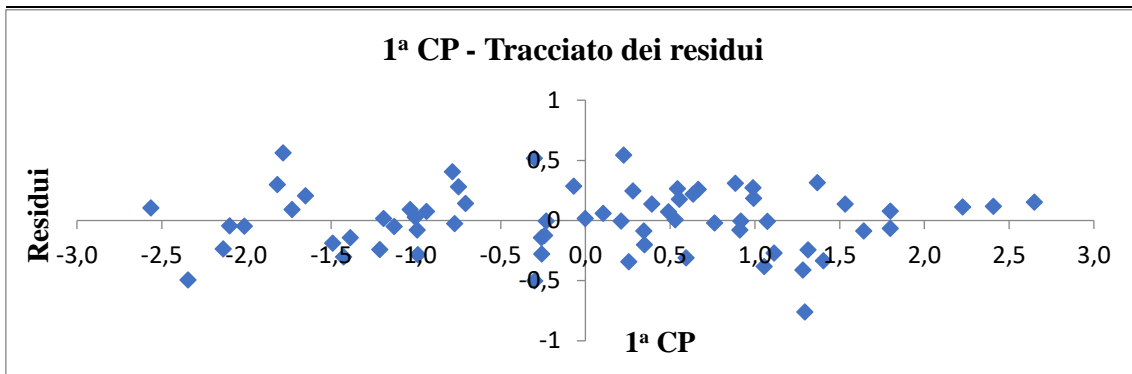


Fig. 5.5 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 1ª CP

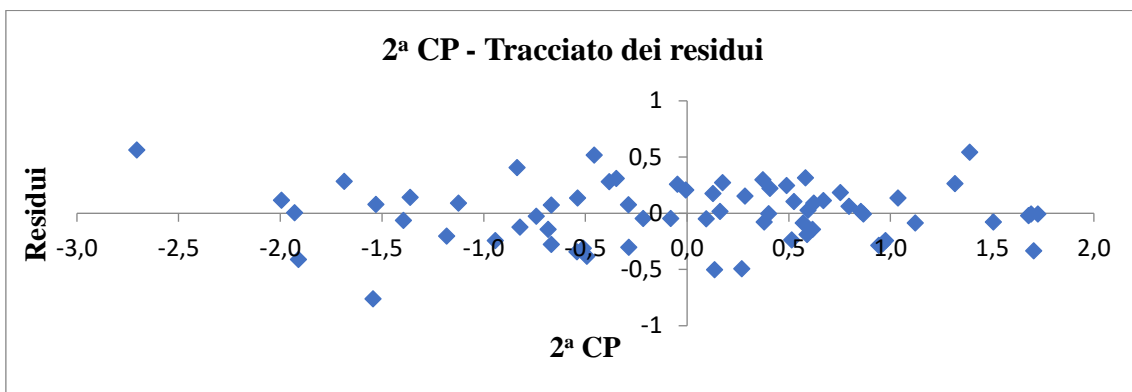


Fig. 5.6 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 2ª CP

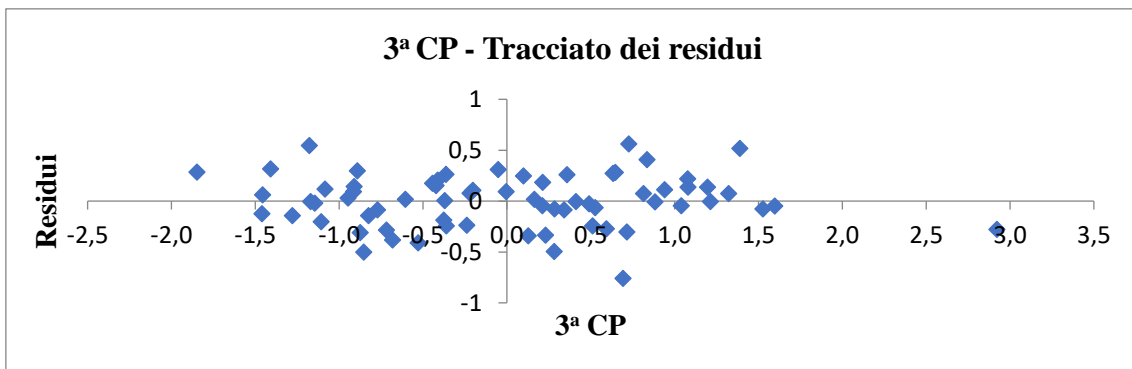


Fig. 5.7 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 3ª CP

La relazione esistente tra l'altezza significativa massima e le variabili esplicative è:

$$\ln(H_{smax}) = 1.1428 + 0.1776 \cdot x_1 + 0.2014 \cdot x_2 + 0.1443 \cdot x_3 \quad (5.5)$$

Le 3 variabili dipendenti sono rappresentate dalle prime 3 componenti principali. Tale relazione, associata alla 5.4, consente di stimare l'entità dell'evento concomitante per la fascia ionica.

Il procedimento di analisi presentato è stato analogamente applicato per la fascia tirrenica, ottenendo 2 relazioni significative.

ANALISI DELL'INTENSITA' DI PIOGGIA

Le analisi effettuate elaborando le due matrici di dati nello spazio delle componenti, hanno permesso di ottenere dei risultati soddisfacenti. Tra le possibili soluzioni, la più apprezzabile ha riguardato la regressione ottenuta mediante le prime 2 CP ottenute per lo scenario: U_m , ΔP , T_m e v_m . Anche per questo studio si è scelto di adottare le variabili dipendenti in forma logaritmica:

ln (i) y	1^a CP x₁	2^a CP x₂
0,9821	0,8849	-1,3640
-0,5347	-1,1752	-1,6117
1,3765	1,1075	0,0871
2,8536	1,2070	2,0176
-0,5820	1,0667	-0,9289
1,8050	-0,3076	1,8668
-0,0485	-0,0867	-1,2590
0,8814	0,1474	0,9144
0,0837	-0,8771	0,1019
1,0417	1,5771	-0,7075
1,2182	0,0786	0,9001
0,7378	-2,1311	-0,9759
0,6018	0,4036	0,4107
1,1815	0,2912	1,6280
1,7480	2,9501	-0,9495
2,3490	0,4628	1,4874
1,0852	0,5419	-1,5429
0,5068	-0,6026	0,3697
1,2100	-0,4718	0,6082
0,5683	-0,5430	0,3229
0,4367	-1,7833	-1,2853
0,2191	-1,3753	0,6569
1,1327	-2,2530	0,2792
2,3949	2,6605	0,3062
0,5878	2,1370	-0,3165
-0,0187	-0,0734	-0,3832
0,3460	-1,0950	0,4920
0,1186	0,4259	-1,5441
0,8180	-1,6256	-0,7939
0,4962	-0,0615	0,6530
0,6810	-1,4801	0,5603

Tab.5.42 Studio delle intensità di pioggia: variabili dipendente (y) e indipendenti (x₁, x₂) per la stima del modello di regressione.

Applicando il modello di regressione lineare multipla, si ottiene:

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,684843374
R ²	0,469010447
\tilde{R}^2	0,431082622
Errore standard	0,603075932
Osservazioni	31
Significatività del modello (p-value)	0,000142

Tab. 5.43 Studio delle intensità di pioggia: statistica della regressione e significatività del modello.

Si evince che il valore di \tilde{R}^2 è molto più alto e l'errore standard è inferiore rispetto allo studio della fascia ionica. La significatività statistica del modello è garantita, essendo il p-value inferiore al valore soglia (0.05). Si conferma nuovamente l'esistenza di una relazione lineare tra almeno una variabile esplicativa e la variabile dipendente. I coefficienti di regressione e i risultati dei relativi test sono:

	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>
Intercetta	0,847661488	0,108316	7,825846	$1,59205 \cdot 10^{-8}$
1^a CP	0,249705451	0,083417	2,993452	0,005709098
2^a CP	0,416895955	0,104978	3,971269	0,000453833

Tab. 5.44 Studio delle intensità di pioggia: stima dei coefficienti regressori

Il test di t di Student ha consentito di valutare la significatività dei predittori. Entrambe le variabili considerate hanno un effetto importante sulla variazione del logaritmo delle intensità di pioggia. L'ipotesi nulla può essere rigettata. Si può ritenere che l'inclinazione della retta vari significativamente al variare dei coefficienti regressori.

Come per il caso della fascia ionica, sono state considerate solo due variabili esplicative. Il test applicato alla 3^a CP non ha permesso di rifiutare l'ipotesi H_0 .

L'analisi dei residui ha consentito di accertare la veridicità dell'assunzione di un legame lineare tra la variabile dipendente e le singole variabili esplicative. Dai tracciati presentati di seguito, sviluppati in funzione delle due componenti principali, si osserva che i punti si dispongono in maniera irregolare e non seguono una struttura precisa. Ciò a conferma dell'assunzione fatta:

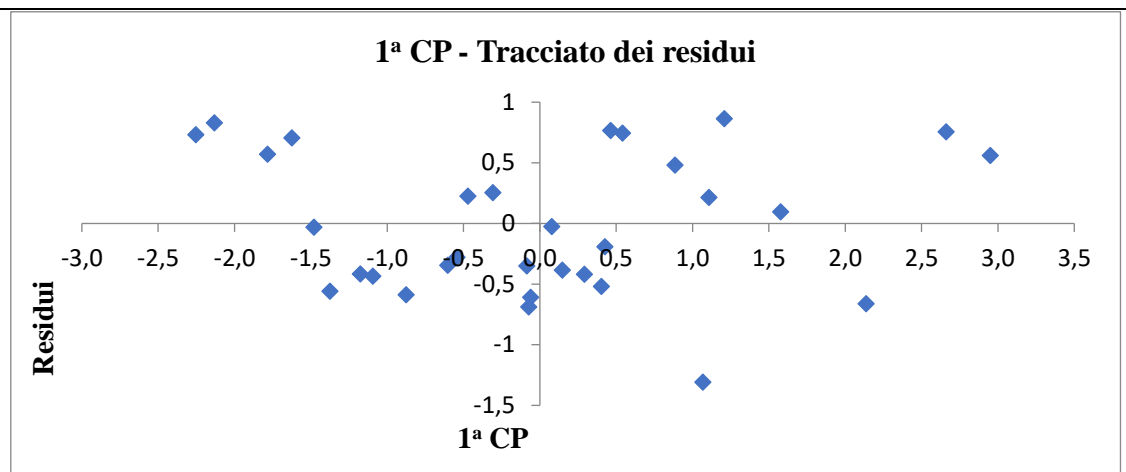


Fig. 5.8 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 1ª CP

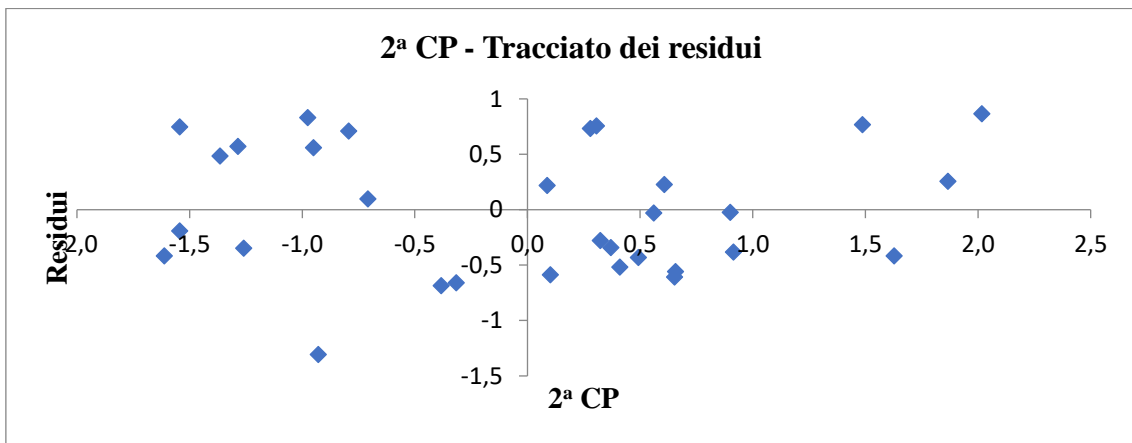


Fig. 5.9 Studio delle intensità di pioggia: tracciato dei residui rispetto la 2ª CP

Si può affermare che il modello della regressione multipla è adeguato alla previsione delle intensità di pioggia.

La relazione che interpola bene i dati ha la forma seguente:

$$\ln(i) = 0.8477 + 0.2497 \cdot x_1 + 0.4169 \cdot x_2 \quad (5.6)$$

Le due variabili indipendenti rappresentano le prime due componenti principali valutate dall'elaborazione dei parametri meteorologici U_m , ΔP , T_m e v_m . Rispetto all'analisi effettuata per la fascia ionica, la seconda CP ha una rilevanza maggiore rispetto la prima.

L'ultima relazione necessaria per lo studio degli eventi concomitanti per la fascia tirrenica, riguarda l'altezza significativa massima.

ANALISI DELL'ALTEZZA SIGNIFICATIVA MASSIMA

L'analisi scorporata per le due categorie di variabili ha fornito degli utili spunti di considerazioni circa le caratteristiche climatiche della fascia tirrenica. Il risultato più soddisfacente è stato ottenuto dall'applicazione del metodo dei minimi quadrati alla serie dei dati in componenti principali, relativi alle variabili: U_m , P_m , T_m e v_m . Il procedimento di analisi è perfettamente speculare al caso ionico:

ln (H_{smax}) y	1^a CP x₁	2^a CP x₂
1,2352	0,7430	1,5061
1,3689	-0,5417	0,6772
1,3007	0,1695	0,3771
0,7424	0,4542	-1,3158
0,9940	1,1338	0,3999
0,4035	-0,6067	-1,6728
1,6594	-0,0406	1,2696
0,3968	-0,5613	-0,3987
1,0916	-0,3103	-0,7890
0,9578	2,6347	-0,1626
0,6575	0,1333	-0,7830
1,6927	-1,1389	0,3811
0,6087	0,8845	-1,2469
0,7367	-0,0992	-1,1020
0,0658	2,9598	0,3191
0,2086	0,3588	-0,8217
0,9455	1,1526	1,7548
1,4674	-1,7298	1,2982
1,1148	-1,1668	0,4877
0,6313	-0,3858	0,1176
1,5520	-1,5476	1,1281
1,1591	-2,5800	0,3568
0,8646	-2,0351	-1,0145
0,3264	2,7965	-0,4379
0,2647	2,4201	-0,3618
1,0730	0,5067	-0,1470
1,5598	-1,4540	-0,4308
1,7122	0,6000	1,6971
1,4827	-1,1903	0,2685
1,3965	-0,4934	-0,6751
1,2066	-1,0660	-0,8050

Tab.5.45 Studio delle altezze di pioggia: variabili dipendente (y) e indipendenti (x₁, x₂) per la stima del modello di regressione.

Applicando il modello di regressione lineare multipla, si ottiene:

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,755847061
R ²	0,57130478
\tilde{R}^2	0,540683693
Errore standard	0,322739539
Osservazioni	31
Significatività del modello (p-value)	$7,081 \cdot 10^{-6}$

Tab.5.46 Studio delle altezze significative massime: statistica della regressione e significatività del modello.

Il valore di \tilde{R}^2 è inferiore al caso ionico ma comunque tale da spiegare la maggior parte dei dati. In perfetta corrispondenza, l'errore standard è aumentato. I valori esprimono un buon adattamento del modello ai dati. Il test F ha consentito di rigettare l'ipotesi nulla essendo: $7,081 \cdot 10^{-6} < 0.05$.

Per quanto riguarda i coefficienti di regressione i risultati ottenuti sono:

	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>
Intercetta	0,997134551	0,057966293	17,20197	$2,028 \cdot 10^{-16}$
1^a CP	-0,177688714	0,041906968	-4,24008	0,000220069
2^a CP	0,274609203	0,062918122	4,364549	0,000157046

Tab.5.47 Studio delle intensità di pioggia: stima dei coefficienti regressori

Le variabili incidono notevolmente sull'inclinazione della retta di regressione. La terza componente, inizialmente considerata, non consentiva di rifiutare l'ipotesi nulla ed è stata esclusa dall'applicazione. Rispetto al caso ionico sono sufficienti 2 CP per definire una funzione significativa.

Anche l'analisi dei residui ha confermato la linearità del legame tra variabile dipendente e le singole variabili esplicative. La dispersione dei dati non assume andamenti strutturati. Anche per quest'analisi il modello di regressione è in grado di spiegare la variabilità dell'altezza significativa massima rispetto le prime due componenti principali:

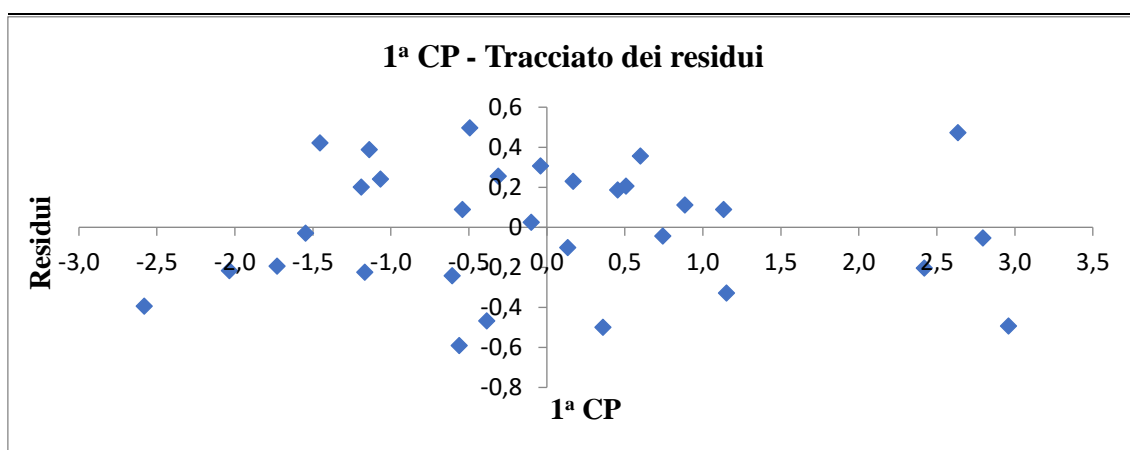


Fig. 5.10 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 1ª CP

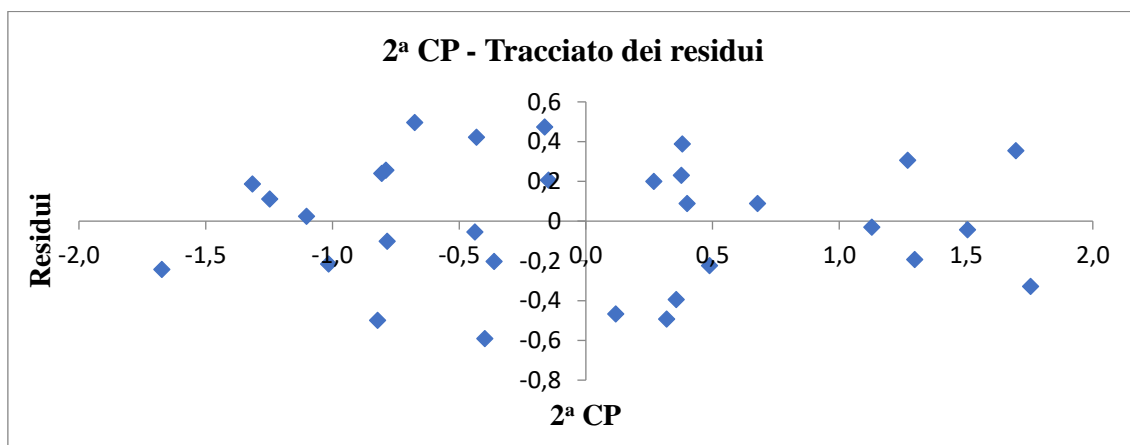


Fig. 5.11 Studio delle altezze significative massime: tracciato dei residui rispetto la 2ª CP

L'interpretazione dell'andamento delle altezze significative in funzione delle componenti principali è fornita dalla seguente relazione:

$$\ln(H_{smax}) = 0.9971 - 0.1776 \cdot x_1 + 0.2746 \cdot x_2 \quad (5.7)$$

La 5.7 e la 5.6 permettono di spiegare e prevedere il possibile scenario in cui si collocano gli eventi concomitanti per la fascia tirrenica. Il problema è dimensionalmente ridotto, avendo considerato un numero di variabili dipendenti inferiore al numero di parametri meteorologici disponibili e necessari.

Mettendo insieme i risultati ottenuti si riesce a caratterizzare il comportamento di ciascuna fascia costiera. Gli eventi concomitanti sono determinati da particolari condizioni climatiche, governate da elementi variabili. Le relazioni ricavate mettono in luce i legami caratterizzanti le intensità di pioggia e le altezze significative massime con le grandezze meteorologiche. Di seguito la sintesi delle espressioni ricavate:

FASCIA IONICA

$$\ln(i) = 0.8314 + 0.2233 \cdot x_1 + 0.2169 \cdot x_2$$

$$\ln(H_{smax}) = 1.1428 + 0.1776 \cdot x_1 + 0.2014 \cdot x_2 + 0.1443 \cdot x_3$$

Le componenti principali rappresentate dalle variabili indipendenti presentano coefficienti positivi. Al crescere del loro valore si registra un aumento significativo delle grandezze osservate. Più dettagliatamente, si evince che le intensità di pioggia sono maggiormente influenzate dalla pressione atmosferica e dall'umidità. Le altezze significative massime, oltre che dai suddetti parametri, risultano fortemente dipendenti dalla velocità del vento. In tale contesto si collocano perfettamente le perturbazioni provenienti da Sud-Est che fanno sentire la loro azione lungo tutto il litorale ionico. I venti di Scirocco sono carichi di umidità e soffiano con imponenza, generando mareggiate e intense precipitazioni.

Diversa è la condizione della fascia tirrenica.

FASCIA TIRRENICA

$$\ln(i) = 0.8477 + 0.2497 \cdot x_1 + 0.4169 \cdot x_2$$

$$\ln(H_{smax}) = 0.9971 - 0.1776 \cdot x_1 + 0.2746 \cdot x_2$$

Le relazioni che interpolano i dati delle intensità di pioggia e delle altezze significative massime sono dipendenti dalle prime due componenti principali, determinate nelle due diverse configurazioni. In entrambi i casi, i parametri maggiormente influenti sono la temperatura e la velocità del vento. Le condizioni di contemporaneità lungo la costa tirrenica assumono un carattere differente. Il vento di Libeccio, proveniente da Sud-Ovest, è portatore di maltempo ma non soffia con continuità (come accade con le correnti di Scirocco). Le peggiori condizioni meteorologiche si manifestano quando tale vento si incontra con il Maestrale. Le masse d'aria generano perturbazioni importanti a causa della diversa natura e diverso gradiente termico che le caratterizza.

Le peculiarità di ciascuna area hanno imposto la necessità di scorporare le analisi. Se da un lato gli eventi sono accomunati dall'influenza dei parametri meteorologici, dall'altro è possibile particolarizzare la risposta del territorio. Per entrambe le fasce è risultato che il vento ha una importante influenza sulle mareggiate. Ben diversa è la condizione pluviometrica. La natura delle correnti influisce sulle precipitazioni, fornendo un'impronta impulsiva e alluvionale sulla fascia ionica e un carattere meno intenso ma più frequente sulla fascia tirrenica. Tale condizione è confermata dai risultati raggiunti con il presente lavoro.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

La Calabria è una delle regioni del Sud Italia particolarmente soggetta a fenomeni di dissesto idrogeologico. La stabilità del territorio è messa a dura prova dalla frequenza con la quale si manifestano gli eventi. L'esposizione geografica, le peculiarità climatiche e la particolare geomorfologia costiera e fluviale la rendono vulnerabile, in particolare lungo i litorali. In presenza di eventi isolati l'attenzione è molto alta ma durante la manifestazione concomitante di alluvioni e di mareggiate il sistema di allerta registra il grado massimo. Il presente studio ha messo in luce gli aspetti che favoriscono le inondazioni costiere per tutta la Calabria.

Non si può prescindere dall'analisi delle caratteristiche geomorfologiche e pedologiche del territorio, per studiare le condizioni che influenzano la risposta alle perturbazioni. La regione è caratterizzata da particolari corsi d'acqua: le "fiumare". La ridotta estensione superficiale dei bacini e l'elevata pendenza delle aste principali riducono i tempi di risposta. In poche ore si passa da una situazione di secca alla piena. Il carattere torrentizio dell'acqua e il grande trasporto di materiale solido ne conferiscono una natura distruttiva. La zona valliva è la più soggetta alle esondazioni e l'area prossima alle foci risulta essere particolarmente indifesa. Le caratteristiche meccaniche dei suoli che caratterizzano le fasce costiere e l'accentuata erodibilità degli strati superficiali predispongono il territorio a fenomeni di degrado. La fragilità dei litorali è aggravata dall'azione del moto ondoso che acuisce il problema dell'erosione costiera. L'azione combinata di alluvioni e mareggiate influisce negativamente sullo stato di fatto e impone una particolare attenzione da parte degli studiosi.

La tesi ha consentito di mettere in luce la problematica per l'intera Calabria, fornendo delle relazioni che spieghino il verificarsi degli eventi. L'accertamento della contemporaneità è avvenuto per tutti i comuni costieri esaminando due databases. La metodologia di analisi seguita è stata caratterizzata da un preciso ordine: sono state prima individuate le alluvioni e solo dopo è stata analizzata la mareggiata. Invertendo il procedimento si sarebbero ottenuti risultati diversi con percentuali estremamente più basse. Infatti il numero di mareggiate registrate in Calabria supera di gran lunga il numero di alluvioni, a conferma dell'ipotesi sostenuta circa l'influenza delle perturbazioni sugli eventi. Le mareggiate sono dovute all'azione del vento che può agire in prossimità delle coste o in mare aperto. La condizione imprescindibile perché si verifichi la

simultanea manifestazione degli eventi è la combinazione di fattori meteorologici che coinvolgono la costa e l'adiacente fascia territoriale. La convergenza delle masse d'aria a temperatura e umidità diverse e la formazione di sistemi di bassa pressione, scatenano fenomeni importanti quali piogge intense e agitazioni ondose. Per tale ragione, affinché si possa parlare di concomitanza di alluvioni e mareggiate, non è sufficiente che si registri uno solo dei parametri considerati (ad esempio il vento) ma è necessaria la coesistenza di variazioni importanti di più parametri.

La Regione è esposta alle correnti di Scirocco e Grecale lungo il litorale orientale e alle correnti di Libeccio e Maestrale lungo il litorale occidentale. La movimentazione delle masse d'aria di caratteristiche diverse (in termini di umidità e di temperatura) governa la formazione delle perturbazioni. Per tale ragione lo studio è stato condotto separando le due fasce costiere. Il 92% degli eventi alluvionali è stato accompagnato da una mareggiata lungo il litorale ionica. Il risultato fornisce una misura quantitativa della problematica. I venti di Scirocco, carichi di umidità, soffiano con insistenza, impattano con le catene montuose e generano precipitazioni abbondanti. Anche il moto ondoso ne risente e fa sentire la sua forza con violente e durature mareggiate. La fascia costiera tirrenica presenta una percentuale più bassa (73%) ma pur sempre considerevole di eventi concorrenti. La maggiore piovosità rispetto alla fascia ionica, incide sulla risposta del territorio. Questa prima analisi ha consentito di mettere in risalto l'importanza delle peculiarità meteorologiche.

Lo studio è stato quindi incentrato sull'analisi quantitativa dei fenomeni. Scelti 18 comuni costieri, si è proceduto alla caratterizzazione di ciascun evento concomitante attraverso l'individuazione dell'intensità di pioggia (estrapolando le altezze cumulate dal terzo database), dell'altezza significativa massima e dei parametri meteorologici. In particolare l'analisi ha riguardato l'umidità relativa, la pressione atmosferica, la temperatura e la velocità del vento. Nonostante tali grandezze siano dipendenti l'una dall'altra, nessuna può essere esclusa dalla valutazione. Risulta necessario studiarne la combinazione per meglio comprendere la formazione e la caratterizzazione delle perturbazioni. Per non perdere informazioni utili ma ridurre le dimensioni del problema, è stata adottata l'analisi delle componenti principali. I nuovi dati sono stati ottenuti elaborando due diverse matrici di parametri meteorologici. Con tale procedura si è cercato di identificare le variabili più idonee a spiegare la manifestazione degli eventi. Applicando infine l'analisi di regressione lineare multipla alle CP sono state ricavate 4 relazioni, 2 per ogni fascia costiera, ottenendo i legami tra le variabili dipendenti (intensità di pioggia e altezza significativa massima della mareggiata) e le componenti principali, espressioni delle grandezze

meteoclimatiche. Il modello ha la peculiarità di essere statisticamente significativo con le variabili esplicative che spiegano la maggior parte della varianza dei dati.

I risultati ottenuti sono in linea con quanto stimato circa la variabilità climatica delle due fasce costiere. Gli eventi concomitanti dell'area ionica sono legati principalmente a due parametri meteorologici: umidità e vento. Il primo, insieme alla pressione atmosferica, influisce sulle precipitazioni. Le correnti umide impattano sull'orografia e causano piogge intense e impulsive. Le stesse correnti umide, soffiando con grande intensità, mettono in agitazione il mare e generano mareggiate. I venti di Scirocco rispondono perfettamente a tali caratteristiche. In molti casi i sistemi di bassa pressione che si formano, danno vita ai cicloni mediterranei. La fascia tirrenica è condizionata dall'esposizione alle correnti di Libeccio e di Maestrale. La relazione ha consentito di mettere in risalto il legame nascosto con la temperatura. Anche in questo caso i venti influenzano la generazione delle mareggiate ma al parametro anemometrico si associa l'agitazione termica delle masse d'aria. Tale grandezza è il principale parametro meteoclimatico che influisce sugli eventi contemporanei lungo il litorale tirrenico. I venti di Libeccio provengono da Sud-Ovest e risultano essere caldi ma, a differenza dello Scirocco, spirano sporadicamente. L'intrusione delle correnti fredde di Maestrale determina le depressioni locali nel Tirreno. Per lo scontro delle due masse d'aria a temperatura e umidità differenti, si verificano perturbazioni importanti.

La contemporaneità degli eventi è dunque condizionata dalla combinazione di più fattori coesistenti. Le alluvioni e le mareggiate sono eventi indipendenti ma influenzate dagli stessi parametri. Le grandezze meteoclimatiche sono responsabili della generazione delle perturbazioni ma vanno associate ad altri condizionamenti. È necessario contestualizzarne la manifestazione. L'entità dei fenomeni va rapportata alle caratteristiche geomorfologiche e alla capacità di risposta del territorio. La struttura morfologica, orografica e fisica della Calabria condiziona i sistemi perturbativi. La fragilità delle coste da un lato e le caratteristiche idraulico-idrologiche dei corsi d'acqua dall'altro accelerano il processo di dissesto. È per tale motivo che piogge di intensità modesta possono provocare danni di notevole entità. Non potendo intervenire preventivamente sul controllo dei livelli idrici di tutte le fiumare, essendo perlopiù in secca, si è reso necessario procedere con l'analisi delle cause scatenanti la problematica, vale a dire la combinazione dei parametri meteoclimatici. Le relazioni ricavate consentono di prevedere la condizione di contemporaneità per lo scenario calabrese. L'indagine particolareggiata può rappresentare un utile strumento di pianificazione territoriale. Lo studio presentato getta le basi per la realizzazione di un sistema di allerta combinato in grado di soddisfare le esigenze delle amministrazioni locali.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Addo, K. A. *Shoreline morphological changes and the human factor. Case study of Accra Ghana*. In *Journal of Coastal Conservation*, vol.17(1), pp. 85-91, 2013;
2. Phillips, M.R., Jones, A. L. *Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management*. In *Tourism Management*, vol.27 (3), pp. 517-524, 2006;
3. Breil M., Catenacci M., Travisi C. *Impatti del cambiamento climatico sulle zone costiere: Quantificazione economica di impatti e di misure di adattamento – sintesi di risultati e indicazioni metodologiche per la ricerca future*. Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici (APAT), 2007;
4. Lionello P., Baldi M., Brunetti M., Cacciamani C. *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti*. Editors: Bononia University Press, pp.81-106, 2010;
5. Huong H. T. L., Pathirana A. *Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 379–394, 2013;
6. Stocker TF, Qin D., Plattner GK, Tignor M., Allen SK, Boschung J., Midgley PM. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, 2013;
7. Cantasano N. *La gestione integrata delle zone costiere (GIZC) un nuovo modello di assetto territoriale*. *Rivista Biologi Italiani – Anno XLIII n.5*, 2013;
8. Sanders B. *Hydrodynamic modeling of urban flood flows and disaster risk reduction*. Oxford research encyclopedia of natural hazard science. 2020;
9. Prestininzi P., Fiori A. *A two-dimensional parabolic model for flood assessment*. In *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1, 2006;
10. Mascarenhas F.C.B., Miguez M.G. *Urban Flood Control through a Mathematical Cell Model*. In *Water International*, vol. 27(2), pp. 208–218, 2002;
11. Scionti F., Miguez M. G., Barbaro G., Martins de Sousa M., Foti G., Canale C. *Integrated Methodology for Urban Flood Risk Mitigation in Cittanova, Italy*. In *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 144 Issue 10, 2018;

-
12. De Franco M., Minniti M., Versaci R., Foti G., Canale C., Puntorieri P. *Flash floods in urban areas: case studies in Reggio Calabria (Italy)*. Green Energy and Technology, pp. 441-446, 2019;
 13. Barbaro G., Fiamma V., Barrile V., Foti G., Ielo G. *Analysis of the shoreline changes of Reggio Calabria (Italy)*. International Journal of Civil Engineering and Technology vol 8(10) pp 1777-1791, 2017;
 14. Borrello M. M., Foti G., Puntorieri P. *Shoreline evolution near the mouth of the Petrace River (Reggio Calabria, Italy)*. Proceedings of 9th International Conference on River Basin Management (Prague, Czech Republic) WIT Transactions on Ecology and the Environment vol 221 pp 59-67, 2017;
 15. Natesan U., Parthasarathy A., Vishnunath R., Kumar G. E. J., Ferrer V. A. *Monitoring longterm shoreline changes along Tamil Nadu, India using geospatial techniques*. Aquatic Procedia vol 4 pp 325-332, 2015;
 16. Prumm M., Iglesias G. *Impacts of port development on estuarine morphodynamics: Ribadeo (Spain)*. Ocean & Coastal management vol 130 pp 58-72, 2016;
 17. Walling D. E. *Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers*. Geomorphology vol 79(3-4) pp 192-216, 2006;
 18. Zema D. A., Bombino G., Boix-Fayos C., Tamburino V., Zimbone S. M., Fortugno D. *Evaluation and modeling of scouring and sedimentation around check dams in a Mediterranean torrent in Calabria, Italy*. Journal of Soil and Water Conservation vol 69(4) pp 316-329, 2014;
 19. Yang Z., Wang T., Voisin N., Copping A. *Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development Estuarine*. Coastal and Shelf Science vol 156 pp 19-30, 2015;
 20. Fortugno D., Boix-Fayos C., Bombino G., Denisi P., Quinonero Rubio J. M., Tamburino V., Zema D. A. *Adjustments in channel morphology due o land-use changes and check dam installation in mountain torrents of Calabria (southern Italy)*. Earth Surface Processes and Landforms vol 42(14) pp 2469-2483, 2017;
 21. Maiti S., Bhattacharya A. K. *Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics-based approach*. Marine Geology vol 257(1-4) pp 11-23, 2009;
 22. Tomasicchio G. R., D'Alessandro F., Barbaro G., Musci E., De Giosa T. M. *Longshore transport at shingle beaches: an independent verification of the general model*. Coastal Engineering vol 104 pp 69-75, 2015;
-

-
23. Sicilia C. L., Foti G., Campolo A. *Protection and management of the Annunziata river mouth area (Italy)*. Air, Soil and Water Research, 6(1), 2020;
 24. Barbaro G, Foti G., Sicilia C. L. *Coastal erosion in the South of Italy*. Disaster Advances vol 7 pp 37–42, 2014;
 25. Komar P. D. *Coastal erosion—underlying factors and human impacts*. Shore & Beach, vol.68 (1), pp. 3-16, 2000;
 26. Arena F., Malara G., Barbaro G., Romolo A., Ghiretti S. *Long-term modelling of wave run-up and overtopping during sea storms*. Journal of Coastal Research, vol.29, pp. 419-429, 2013;
 27. Williams A. T., Rangel-Buitrago N., Pranzini E., Anfuso G. *The management of coastal erosion*. Ocean & Coastal Management vol 156 pp 4–20, 2018;
 28. Boccotti P., Arena F., Fiamma V., Romolo A., Barbaro G. *Estimation of mean spectral directions in random seas*. Ocean Engineering, vol.38, pp. 509-518, 2011;
 29. Paprotny D., Morales-Nápoles O., Jonkman S.N. *HANZE: a pan-European database of exposure to natural hazards and damaging historical floods since 1870*. In Earth System Science Data, vol. 10(1), pp. 565-581, 2018;
 30. Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Zbigniew W., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J., Dettinger M.D., Krysanova V. *On Critiques of ‘Stationarity is Dead: Whither Water Management?’*. In Water Resources Research, vol.51, Issue 9, pp. 7785-7789, 2015;
 31. Bevacqua E., Maraun D., Vousdoukas M.I., Voukouvalas E., Vrac M., Mentaschi L., Widmann M. *Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change*. In Sciences Advances, vol.5, 2019;
 32. Leonard M., Westra S., Phatak A., Lambert M., Bart van den Hurk, McInnes K., Risbey J., Schuster S., Jakob D., Stafford-Smith M. *A compound event framework for understanding extreme impacts*. In WIREs Climate Change, vol.5, Issue 1, pp.113-128, 2014;
 33. Zscheischler J., Westra S., Bart J. J. M. van den Hurk, Seneviratne S.I., Ward P.J., Pitman A., AghaKouchak A., Bresch D.N., Leonard M., Wahl T., Zhang X. *Future climate risk from compound events*. In Nature climate change, vol.8, pp. 469-477, 2018;
 34. Zheng F., Westra S., Leonard M., Sisson S.A. *Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk*. In Water Resources Research, vol.50, Issue 3, pp. 2050-2071, 2014;
 35. Moftakhari H.R., Salvadori G., AghaKouchak A., Sanders B.F., Matthew R.A. *Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding*. In PNAS, vol. 114 (37), pp.9785-9790, 2019;
-

-
36. Zscheischler J., Seneviratne S.I. *Dependence of drivers affects risks associated with compound events*. In *Sciences Advances*, vol.3, 2017;
 37. Paprotny D., Voudoukas M.I., Morales-Nápoles O., Jonkman S.N., Feyen L. *Compound flood potential in Europe*. In *Hydrology and Earth System Sciences*, vol.132, 2018;
 38. Zellou B., Rahali H. *Assessment of the joint impact of extreme rainfall and storm surge on the risk of flooding in a coastal area*. In *Journal of Hydrology*, vol.569, pp. 647-665, 2019;
 39. De Angeli S., D'Andrea M., Cazzola G., Dolia D., Duo E., Rebora N. *Coastal Risk Assessment Framework: Comparison of modelled fluvial and marine inundation impacts, Bocca di Magra, Ligurian coast, Italy*. In *Coastal Engineering*, vol.134, pp.229–240, 2018;
 40. Sorriso-Valvo M., Terranova O. *The Calabrian fiumara streams*. In *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 143, pp. 109-125, 2006;
 41. Sabato L., Tropeano M. *Fiumara: a kind of high hazard river*. In *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 29, pp. 707-715, 2014;
 42. Boccotti P. *Wave mechanics and wave loads on marine structures*. Oxford (UK): Elsevier BH 2015;
 43. Mandaglio G. *Ricerche geologiche per la difesa del suolo e la pianificazione di bacino in provincia di Reggio Calabria*. Artemis, 2016;
 44. Aramini G., Colloca C., Corea A. M., Paone R., Caruso A., Bruno G., Marsico T. *I suoli della Calabria- Carta dei suoli in scala 1:250000 della Regione Calabria*. Programma Interregionale Agricoltura-Qualità - Misura 5, 2003;
 45. Sorriso-Valvo M. *Natural hazards and natural heritage – Common origins and interference with cultural heritage*. *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 31(2):231-237, 2008;
 46. Petrucci O., Aurora A., Polemio M. *L'influenza della piovosità e dell'antropizzazione sulla serie storica delle piene catastrofiche (Calabria sud-occidentale)*. *Geologia dell'ambiente Suppl. n. 2*, pp. 46–49, 2012
 47. Ferretti O., Barsanti M., Delbono I., Furia S. *Elementi di gestione costiera- Parte prima- Tipi morfosedimentologici dei litorali italiani*. ENEA, 2003;
 48. Fratiani S., Acquavota F. *The climate of Italy*. *Landscapes and Landforms of Italy*, pp 29-38, 2017;
 49. Terranova O., Bodini A., Brambilla C., Betrò B. *Allegato B - Analisi delle precipitazioni in Calabria*. POR Calabria 2000-2006;
 50. Versace P., Ferrari E., Gabriele S., Rossi F. *Valutazione delle piene in Calabria, CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche*. *Geodata, Publ. 30*, 1989;
-

-
51. Barbaro G., *Master Plan of solutions to mitigate the risk of coastal erosion in Calabria (Italy), a case study*. Ocean & Coastal Management, 132, pp. 24–35, 2016;
 52. Arcuri S., Marsico L., Rotundo R. *Rapporto di evento*. Regione Calabria ARPACAL, 2015;
 53. Petrucci O., Versace P. - *ASICal: a database of landslides and floods occurred in Calabria (Italy)* – In R. Gaudio (Ed.), Proc. 1st Italian-Russian Workshop “New Trends in Hydrology”, Rende (CS), Pubblicazione CNR-GNDCI n. 2823, Editoriale Bios, Cosenza, 49-55, 2004;
 54. Petrucci O., Polemio M., *The use of historical data for the characterisation of multiple damaging hydrogeological events*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3: 17-30, 2003;
 55. Arena F., Barbaro G. *Il rischio ondoso nei mari italiani*. CNR-GNDCI num. 1965, Editoriale BIOS, Cosenza, pp. 1-136, 1999;
 56. Brugnoli G., Doronzo B., De Sario G., Petralli S., Scartazza A., Taddei S., Gozzini B., Pellegrino L., Vaccari F.P. *Appunti di Meteorologia Marina*. Ricerca Trasferimento Innovazione, Regione Toscana, 2006;
 57. Giuffrida A., Sansosti G. *Manuale di Meteorologia*. Gremese Editore, 2006;
 58. Di Candia P. *Meteorologia Generale*, 2012;
 59. Ricci R. *Appunti di statistica*. Università di Firenze, 2003;
 60. Johnson R., Wichern D. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall, 2002.
 61. Joliffe I.T., *Principal Component Analysis*. Springer, 2002;
 62. Krzanowski WJ. *Principles of Multivariate Analysis*. Oxford University Press, 1988.

<http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html>

<http://www.cfd.calabria.it/index.php>

<http://93.51.147.138:900/intro/Catsuoli250k/Home.htm>