

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Specialistica in

Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio-Environmental and Land Planning Engineering



*CLIMATOLOGIA DINAMICA DELLE PRECIPITAZIONI  
SULLA LOCALITA' DI MILANO*

Relatore: Prof. Dott. Antonio GHEZZI

Tesi di Laurea di:  
Eleonora BETTINI  
Matr. N. 835613

Anno Accademico 2015-2016

# INDICE

**ABSTRACT pag. 7**

**PRESENTAZIONE DELL'ELABORATO pag.8**

**CAP.1 INTRODUZIONE ALLA CLIMATOLOGIA pag. 10**

1.1 RADIAZIONE SOLARE pag. 10

1.2 UMIDITA' E TEMPERATURA DELL'ARIA pag.13

1.3 PRESSIONE ATMOSFERICA pag.15

1.4 SOLLEVAMENTO DELLE MASSE D'ARIA pag.17

1.4.1 SOLLEVAMENTO OROGRAFICO pag.17

1.4.2 SOLLEVAMENTO FRONTALE pag.18

1.4.3 FRONTE CALDO pag.18

1.4.4 FRONTE FREDDO pag.19

1.4.5 SOLLEVAMENTO CONVETTIVO pag.19

1.4.6 SOLLEVAMENTO CICLONICO pag.19

1.5 CLASIFICAZIONE DEL VENTO pag.20

1.6 NUBI pag.21

1.6.1 CLASSIFICAZIONE DELLE NUBI pag.23

1.6.2 NUBI ALTE pag.23

1.6.3 NUBI MEDIE pag.23

1.6.4 NUBI BASSE pag.23

1.6.5 NUBI A MEDIO SVILUPPO VERTICALE pag.24

1.6.6 NUBI A GRANDE SVILUPPO VERTICALE pag.24

1.7 PRECIPITAZIONE pag.24

1.7.1 MECCANISMO DI FORMAZIONE pag.24

1.7.2 TIPOLOGIE DI PRECIPITAZIONE pag.25

1.7.3 NEBBIA pag.26

1.7.3.1 NEBBIA DA UMIDIFICAZIONE pag.26

1.7.3.2 NEBBIA DA RAFFREDDAMENTO pag.26

1.7.4 CLASSIFICAZIONE DELLE PIOGGE pag.27

1.7.5 CLASSIFICAZIONE PER GENESI pag.27

1.7.5.1 PIOGGE CONVETTIVE pag.27

1.7.5.2 PIOGGE CICLONICHE E FRONTALI pag.28

1.7.5.3 PIOGGE OROGRAFICHE pag.28

1.7.6 CLASSIFICAZIONE PER INTENSITA' pag.29

1.8 FATTORI CLIMATICI GEOGRAFICI pag.30

1.8.1 LATITUDINE E INCIDENZA DEI RAGGI SOLARI pag.30

1.8.2 DISTRIBUZIONE DELLE TERRE EMERSE – MARE pag.30

1.8.3 CORRENTI OCEANICHE pag.30

1.8.4 ORIENTAMENTO DELLE CATENE MONTUOSE pag.31

1.8.5 RILIEVI E LORO ESPOSIZIONE TOPOGRAFICA pag.31

1.8.6 ACQUE CONTINENTALI pag.32

1.8.7 USO E COPERTURA DEL SUOLO pag.32

## **CAP.2 CIRCOLAZIONI ATMOSFERICHE pag.33**

2.1 CIRCOLAZIONE GENERALE DELL'ATMOSFERA pag.33

2.2 PERTURBAZIONI E FRONTI pag.34

2.3 I CICLONI DELLE MEDIE LATITUDINI pag.35

2.4 MASSE D'ARIA CHE AGISCONO SUL MEDITERRANEO pag.36

2.5 I VENTI CHE INTERESSANO L'ITALIA pag.43

## **CAP. 3 CLIMATOLOGIA DELLA VAL PADANA pag.45**

3.1 INQUADRAMENTO DELLA VAL PADANA pag.45

3.2 CARATTERISTICHE CLIMATOLOGICHE DELLA VAL PADANA pag.45

3.2.1 MACROSCALA pag.46

3.2.2 MESOSCALA pag.47

3.2.2.1 SINTESI ALLA MESOSCALA DEL CLIMA DELLA VAL  
PADANA pag.49

3.2.3 FENOMENI RICORRENTI ALLA MESOSCALA pag.50

3.2.3.1 I VENTI NELLA VAL PADANA pag.50

3.2.3.2 FÖHN pag.52

3.2.3.3 LE NEBBIE pag.54

3.2.3.4 LE PRECIPITAZIONI IN VAL PADANA pag.54

3.2.3.5 LE PRECIPITAZIONI NEVOSE IN VAL PADANA pag.55

3.2.4 MICROSCALA pag.55

3.2.4.1 MILANO pag.55

## **CAP.4 DATI pag.57**

4.1 STAZIONE DI MISURA pag.57

**4.2 ANALISI DEI DATI I pag.58**

4.2.1 IDENTIFICAZIONE DELL'ANNO PLUVIOMETRICO MEDIO pag.58

4.2.2 ANALISI DELLA PRECIPITAZIONE ANNUALE NEL PERIODO 2000-2015

pag.60

4.2.2.1 ANNO: 2000 pag.60

4.2.2.2 ANNO: 2001 pag.61

4.2.2.3 ANNO: 2002 pag.62

4.2.2.4 ANNO: 2003 pag.63

4.2.2.5 ANNO: 2004 pag.64

4.2.2.6 ANNO: 2005 pag.65

4.2.2.7 ANNO: 2006 pag.66

4.2.2.8 ANNO: 2007 pag.67

4.2.2.9 ANNO: 2008 pag.68

4.2.2.10 ANNO: 2009 pag.69

4.2.2.11 ANNO: 2010 pag.70

4.2.2.12 ANNO: 2011 pag.71

4.2.2.13 ANNO: 2012 pag.72

4.2.2.14 ANNO: 2013 pag.73

4.2.2.15 ANNO: 2014 pag.74

4.2.2.16 ANNO: 2015 pag.75

4.2.2.17 COMMENTO pag.76

4.2.3 CONFRONTO TRA LE PRECIPITAZIONE MEDIA DEL PERIODO 2000-2015  
CON L'ANNO PLUVIOMETRICO MEDIO 1984-1999 pag.78

4.2.4 CLASSI PLUVIOEMETRICHE ANNUALI pag.84

4.2.4.1 PRECIPITAZIONE CUMULATA ANNUALE pag.84

4.2.5 CLASSI PLUVIOEMETRICHE STAGIONALI pag.86

4.2.5.1 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN INVERNO pag.86

4.2.5.2 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN PRIMAVERA pag.87

4.2.5.3 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN ESTATE pag.88

4.2.5.4 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN AUTUNNO pag.90

4.2.6 CLASSI PLUVIOMETRICHE MENSILI pag.91

4.2.7 L'INVERNO COME PREDITTORE DELLA PIOVOSITA' ANNUALE pag.98

4.2.8 CONFRONTO TRA TRIMESTRE INVERNALE ASTRONOMICICO E  
METEOROLOGICO pag.100

4.2.9 APPLICAZIONE DELLA STATISTICA DESCRITTIVA ALLA STAGIONE  
INVERNALE pag.102

**4.2.10 CONCLUSIONE PARTE DI ANALISI I pag.110**

**CAP.5 DATI pag.113**

**5.1 ANALISI DEI DATI II pag.114**

5.2 ANALISI CLIMATOLIGICA DEGLI ANNI 2014, 2008, 2003 pag.116

5.3 ANALISI CLIMATOLOGICA DELL'ANNO 2014 pag.118

5.3.1 INTRODUZIONE pag.118

5.3.2 ANALISI DEI DATI INVERNO 2014 – Precipitazione, Pressione,  
Temperatura pag.121

5.3.3 ANALISI DEI DATI INVERNO 2014 – Mappe del geo-potenziale pag.122

5.3.3.1 - 2 gennaio 2014 pag.122

5.3.3.2 - 5 gennaio 2014 pag.124

5.3.3.3 - 29 gennaio 2014 pag.126

5.3.3.4 - 6 febbraio 2014 pag.128

5.3.3.5 - 27 febbraio 2014 pag.130

5.3.3.6 - 3 marzo 2014 pag.132

5.3.3.7 - 15 marzo 2014 pag.134

5.3.3.8 - Evento anomalo: grandinata su Milano del 26/02/2014 pag.136

5.3.3.9 - COMMENTO pag.138

5.4 ANALISI CLIMATOLOGICA DELL'ANNO 2008 pag.140

5.4.1 INTRODUZIONE pag.140

5.4.2 ANALISI DEI DATI INVERNO 2008 – Precipitazione, Pressione, Temperatura  
pag.141

5.4.3 ANALISI DEI DATI INVERNO 2008 – Mappe del geo-potenziale pag.147

5.4.3.1 - 13 gennaio 2008 pag.148

5.4.3.2 - 16 gennaio 2008 pag.150

5.4.3.3 - 18 gennaio 2008 pag.152

5.4.3.4 - 2 febbraio 2008 pag.154

5.4.3.5 - 5 febbraio 2008 pag.156

5.4.3.6 - Evento di Föhn del 22 gennaio 2008 pag.158

5.4.3.7 - Cella temporalesca del 4 marzo 2008 pag.160

5.4.3.8 - COMMENTO pag.162

5.5 ANALISI CLIMATOLOGICA DELL'ANNO 2003 pag.164

5.5.1 INTRODUZIONE pag.164

5.5.2 ANALISI DEI DATI INVERNO 2003 – Precipitazione, Pressione, Temperatura  
pag.165

5.5.3 ANALISI DEI DATI INVERNO 2003 – Mappe del geo-potenziale pag.168

5.5.3.1 - 27 gennaio 2003 pag.169

5.5.3.2 - 10 febbraio 2003 pag.171

5.5.3.3 - 25 febbraio 2003 pag.173

5.5.3.4 - 10 marzo 2003 pag.175

5.5.3.5 - 31 marzo 2003 pag.177

5.5.3.6 - COMMENTO pag.179

**5.6 CONCLUSIONE PARTE DI ANALISI II pag.181**

**6 SINTESI, CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E SVILUPPI FUTURI pag.182**

6.1 SINTESI pag.182

6.2 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE pag.183

6.3 SVILUPPI FUTURI pag.185

**BIBLIOGRAFIA pag.186**

**SITOGRAFIA pag.186**

**RINGRAZIAMENTI pag.187**

## ABSTRACT

L'interesse sempre crescente per il tema della climatologia locale e della sua variabilità intrinseca è stata determinante nell'andare a chiedersi come si stia modificando la precipitazione a Milano.

Il presente elaborato è costituito da due parti di indagine scientifica: la prima consiste in un'analisi della precipitazione cumulata a livello annuale, stagionale e mensile, riferita a periodi temporali differenti, a seconda dei diversi oggetti di indagine e la seconda riguardante un'analisi climatologica sulle circolazioni atmosferiche che possono aver provocato le anomalie pluviometriche individuate nella prima parte.

In particolare l'analisi della precipitazione cumulata si rende indispensabile soprattutto oggi, dove è appurato che gli eventi meteorologici e climatici tendano a diventare sempre più estremi e frequenti.

A livello letterario è oramai indiscusso che il periodo 2000-2015 desti particolari attenzioni ed è dunque la serie temporale che è stata prevalentemente sviluppata ed approfondita.

Lo studio condotto ha confermato che il regime pluviometrico sulla città di Milano è variato negli ultimi sedici anni, mostrando un'anomalia pluviometrica particolarmente interessante sulla stagione invernale.

L'analisi della precipitazione è basata sull'ipotesi che le circolazioni atmosferiche non siano cambiate, sulla città di Milano, ma che abbiano eventualmente modificato la loro frequenza ed intensità.

La climatologia dinamica qui applicata integra gli effetti prodotti da tali circolazioni, effetti che mantengono anche una loro variabilità intrinseca propria del sistema climatico.

La stagione invernale è stata oggetto di approfondimento sia con strumenti di statistica descrittiva che tramite un'analisi circolatoria su tre anni, scelti come campione del periodo 2000-2015, che si sono distinti per le anomalie pluviometriche che hanno evidenziato. In quest'ultima parte l'analisi circolatoria si è resa interessante per andare a valutare su tre anni campione le possibili meta-cause delle anomalie pluviometriche invernali riscontrate.

La conoscenza di come stiano variando le precipitazioni nella nostra città è di fondamentale importanza per una serie di altre indagini scientifiche. Dalle misure cautelari nei confronti degli inquinanti, alle previsioni meteorologiche per gli eventi calamitosi, sia per la gestione delle emergenze che per implementare sempre meglio la modellistica meteo-ambientale di supporto.

Per tutte queste ragioni, lo studio e l'analisi delle variabili climatiche e meteorologiche risulta di primaria importanza, al fine di valutarne gli effetti sul territorio, sulle attività e sugli eventi.

I fenomeni di precipitazione rivestono dunque un ruolo primario, dal momento che rientrano tra i principali risultati di un sistema climatico e risultano fondamentali per la società umana nel suo complesso, poiché dalla precipitazione abbondante o assente possono dipendere eventi pericolosi, come alluvioni o crisi di siccità, che mettono a dura prova il contesto sociale, economico e ambientale in cui viviamo.

## **PRESENTAZIONE DELL'ELABORATO**

Il presente elaborato si propone di analizzare i dati di pioggia relativi alla città di Milano e riferiti a periodi temporali differenti, poiché diversi sono stati i casi studio su cui concentrarsi.

L'elaborato si compone principalmente di due parti di analisi.

La prima parte è basata sull'analisi della precipitazione in termini qualitativi, quantitativi e di statistica descrittiva sui due periodi temporali 1984-1999 e 2000-2016. La scelta dell'anno 1984 è legata sia alla disponibilità dei dati che alla loro attendibilità.

Lo scopo è stato quello di valutare e verificare se dal 2000 al 2015 i valori di precipitazione cumulata siano cambiati rispetto al valore teorico storico del regime pluviometrico della città, sia dal punto di vista quantitativo che dal punto di vista qualitativo.

La seconda parte di analisi consiste invece in un'analisi di climatologia dinamica sul trimestre invernale di tre anni scelti come campione e appartenenti agli ultimi sedici anni, il cui scopo è l'identificazione delle possibili circolazioni atmosferiche che hanno causato le anomalie individuate.

Le analisi svolte nella prima parte consistono in una statistica riassuntiva dei dati quantitativi di precipitazione a livello annuale, stagionale e mensile e comprendono il calcolo delle medie pluviometriche, dei valori massimi e minimi di precipitazione e del numero di giorni piovosi. Da questi dati sono stati ricavati i rispettivi grafici alle tre scale temporali annuale, stagionale e mensile. La prima parte dell'analisi consiste dunque nella valutazione della precipitazione cumulata a livello annuale e stagionale sulla serie storica 1984-1999.

Tale serie viene considerata sufficientemente omogenea per gli scopi dell'elaborato.

I risultati medi ottenuti da questa serie sono stati considerati come valori ben rappresentativi del regime pluviometrico teorico di Milano, poiché ne hanno rispettato le caratteristiche tipiche della letteratura in merito.

In una seconda fase sono state analizzate le distribuzioni della pioggia annuale, stagionale, mensile ed il numero di giorni piovosi per tutti gli anni del periodo 2000-2015, al fine di valutarne la distribuzione pluviometrica a livello quantitativo e qualitativo.

Sono state così individuate le analogie e le anomalie della precipitazione nel periodo 2000-2015 rispetto alla serie 1984-1999.



Tali anomalie pluviometriche sono state approfondite alle tre scale temporali (annuale, stagionale, mensile) attraverso l'introduzione delle "classi di piovosità", che hanno consentito di classificare gli anni dal 2000 al 2015 come "molto piovosi", "medi" o "poco piovosi".

Le anomalie pluviometriche principali sono state individuate nella stagione invernale, sia in termini quantitativi che qualitativi.

In aggiunta è stata svolta un'analisi di regressione lineare ed una valutazione sulla significatività della tendenza pluviometrica della stagione invernale sul periodo 1984-2015, tramite la statistica F.

L'analisi di regressione ed il test sulla statistica F sono state applicate anche al periodo duecentennale 1764-1983, al fine di evidenziare come fino all'inizio del nuovo millennio la distribuzione della precipitazione su Milano sia rimasta per lo più stazionaria.

In seguito a questa osservazione si è proceduto con l'analisi climatologica specifica sul trimestre invernale dei tre anni che sono risultati il più piovoso, il più vicino all'anno medio ed il più asciutto dal 1984 ad oggi. Questi tre anni sono stati dunque presi ad esempio di tutti quelli che hanno presentato la loro stessa classe di piovosità.

L'obiettivo ultimo di questa analisi climatologica è stato quello di valutare a livello circolatorio una possibile meta-causa di queste variazioni pluviometriche su Milano.

Di questi tre anni è stato analizzato in modo approfondito l'inverno, attraverso un'analisi delle temperature e delle pressioni atmosferiche che sono state registrate. In particolare, l'individuazione dei gruppi barici depressionari o di alta pressione ha permesso di identificare i giorni del trimestre che hanno presentato i valori più estremi delle anomalie.

Le circolazioni caratteristiche responsabili delle anomalie nei tre trimestri invernali sono state analizzate anche con il supporto delle carte dell'anomalia del geo-potenziale a 500-850 hPa, con la mappa della precipitazione cumulata al suolo (mm) e con le traiettorie circolatorie fornite dal programma meteorologico Hi-Split.

Il lavoro è preceduto da una prima parte in cui si forniscono gli elementi teorici a supporto dell'analisi. In particolare il primo capitolo sviluppa i fenomeni meteorologici e fornisce un inquadramento climatologico generale.

Il secondo capitolo è dedicato alla struttura dell'atmosfera ed alle circolazioni atmosferiche che interessano le nostre regioni.

Il terzo capitolo si concentra sulla descrizione climatologica della Val padana e dei suoi fenomeni meteorologici alla macroscale, mesoscale e microscale.

## **CAP. 1 INTRODUZIONE ALLA CLIMATOLOGIA**

Il clima è direttamente influenzato dalla radiazione solare e dalle sue interazioni con il suolo. Il valore di radiazione che raggiunge il terreno dipende principalmente dalla latitudine geografica, che influenza la misura con cui i diversi luoghi della terra sono esposti alla luce del sole.

La radiazione solare influisce direttamente sulla temperatura dell'aria e del terreno, nonché sul processo di evapotraspirazione e quindi indirettamente sull'umidità atmosferica, sul moto delle masse d'aria ed infine sulle precipitazioni.

Altrettanto importanti a livello climatico sono i fattori quali la latitudine, la distribuzione delle terre emerse, le correnti oceaniche, l'orientamento e l'altitudine dei rilievi e delle catene montuose, la presenza di acque continentali e la destinazione d'uso dei suoli.

### **1.1 RADIAZIONE SOLARE**

La radiazione solare è l'energia radiante emessa nello spazio interplanetario dal Sole, generata a partire dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e che producono radiazioni elettromagnetiche a varie frequenze o lunghezze d'onda, le quali si propagano poi nello spazio alle velocità tipiche di queste onde, trasportando con sé energia solare.

Ogni forma di vita sulla Terra viene mantenuta dal flusso energetico solare che penetra nella biosfera. La radiazione ha un'influenza diretta sulla temperatura dell'aria e del terreno e sul processo di evapotraspirazione (consiste nella quantità d'acqua che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione, attraverso le piante, e dell'evaporazione, direttamente dal terreno), ed indiretta sul valore dell'umidità atmosferica, sul movimento delle masse d'aria e sulle precipitazioni. La quantità totale di radiazione emessa dal Sole nell'unità di tempo, nell'unità di superficie e misurata alle soglie esterne dell'atmosfera, valore pressoché costante nel tempo, è detta costante solare. La radiazione solare non è concentrata su una sola frequenza, ma è distribuita su un ampio spettro di ampiezza non uniforme con la forma tipica di una campana com'è tipico dello spettro di un corpo nero col quale la sorgente solare è modellizzata. Il massimo di radiazione è centrato nella banda della radiazione visibile o luce col picco ai 500 nm fuori dall'atmosfera terrestre in base alla legge di Wien, corrispondente al colore Ciano-verde.

## Spettro della radiazione solare

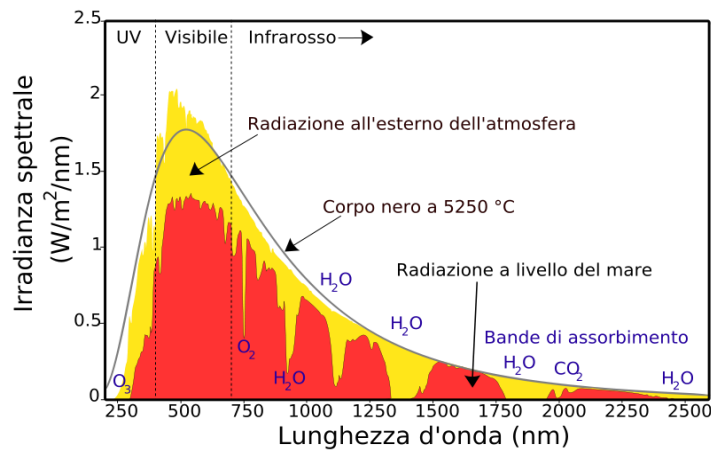


Figura 1-Spettro solare

La banda di radiazioni fotosinteticamente attive (PAR) va dai 400 ai 700 nm, corrisponde alla radiazione visibile ed è pari al 41% della radiazione totale. All'interno del PAR esistono sotto-bande con radiazioni:

- blu-violetto, (400-490 nm), assorbite dai pigmenti, con azione sulla fioritura, sintesi proteica, effetti fototropici, medio effetto sulla fotosintesi;
- verdi (490-560 nm), le meno attive fotosinteticamente;
- gialle (560-590 nm);
- rosso-arancio (590-700 nm), molto attive per la fotosintesi.

Oltre alla radiazione visibile una componente energeticamente minoritaria, è costituita dagli infrarossi e dai raggi ultravioletti. Nell'attraversare l'atmosfera la radiazione solare subisce fenomeni di riflessione, rifrazione, assorbimento, diffusione ad opera dei vari gas atmosferici in misura variabile in funzione della frequenza, così che al suolo lo spettro solare risulta irregolare rispetto a quello rilevato alle soglie esterne dell'atmosfera (TOA) con presenza di tipiche bande di assorbimento o riflessione.

La Terra riceve dal Sole  $1366 \text{ W/m}^2$  Questa è riferita alle soglie dell'atmosfera e al piano perpendicolare ai raggi solari entranti. L'atmosfera a sua volta filtra in una certa misura i raggi solari come fa ogni corpo provocando:

- una riflessione ed una retrodiffusione dei raggi dovuta al suo albedo, alle nubi e ai gas atmosferici stessi;
- un assorbimento che ne provoca un aumento di temperatura, a seguito del quale riemette radiazioni in ogni direzione in accordo con la legge di Wien. Tale assorbimento è comunque

modesto nella banda della luce visibile risultando così trasparente alla radiazione solare diretta.

Circa metà della radiazione attraversa invece l'atmosfera senza alterazioni prendendo il nome di radiazione netta. Metà della radiazione netta contribuisce infine all'evaporazione delle masse d'acqua, di conseguenza l'energia disponibile è circa un quarto di quella complessivamente emessa.

La stratosfera assorbe i raggi ultravioletti compresi nella banda 200-300 nm grazie all'ozono, la troposfera assorbe e diffonde l'infrarosso grazie al vapore acqueo e alla CO<sub>2</sub>. L'azione di filtro delle bande alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto, per la maggior parte letali, è essenziale per lo sviluppo della vita.

In termini percentuali quanto sopra descritto può essere sintetizzato come segue. Il 97% della radiazione solare cade nello spettro del visibile (0.3-2.5 micron). Lo spettro di emissione della terra è invece molto più ampio ad abbraccia quasi tutto l'infrarosso con un massimo attorno a 10 micron. Dell'energia solare complessiva che in un anno raggiunge la parte superiore dell'atmosfera, circa il 45% riesce a raggiungere la superficie terrestre (radiazione globale), in parte come radiazione diretta ed in parte come radiazione diffusa dalle molecole d'aria, dagli aerosol (nubi, nebbia, foschia). Circa il 35% viene invece riflesso verso lo spazio interplanetario ad opera dell'atmosfera, delle nubi, del terreno ed il restante 20% viene assorbito direttamente dall'aria. In media dunque, il sistema terra-atmosfera trattiene complessivamente il 65% dell'energia solare incidente. Per l'equilibrio terra-atmosfera, tale energia viene restituita verso lo spazio sotto forma di radiazione nell'infrarosso. Tuttavia solo una parte dell'energia infrarossa emessa dal sistema terra-atmosfera va integralmente persa nello spazio esterno e precisamente quella compresa tra 8-12 micron. La restante parte viene assorbita e poi nuovamente diffusa in tutte le direzioni. Della restante energia ancora posseduta dal suolo, una parte viene ceduta all'aria sovrastante mediante i processi turbolenti di origine termica (convezione) o meccanica (ad opera del vento) e una parte viene utilizzata per l'evapotraspirazione superficiale.



Figura 2-Effetti della radiazione solare su atmosfera e superficie terrestre

## 1.2 UMIDITA' E TEMPERATURA DELL'ARIA

Il vapore acqueo presente in atmosfera ha origine dall'evaporazione dell'acqua dei mari e degli oceani che risulta essere massima in corrispondenza delle zone tropicali e subtropicali aride, discretamente elevata all'equatore e via via discendente verso i poli. Nella fascia 0°-10° di latitudine l'evaporazione è più forte sui continenti, grazie all'enorme contributo della traspirazione delle foreste equatoriali. Fonti minori di umidità sono il terreno ed i bacini di acqua aperti, come laghi e fiumi.



Figura 3-Ciclo idrologico dell'acqua

Il vapore acqueo circola in atmosfera mescolato alle masse di aria che si spostano di continuo, ora in senso meridiano ora dall'oceano al continente. Quando si verifica una sensibile diminuzione della temperatura di una massa d'aria contenente vapore acqueo, quest'ultimo può raggiungere e superare il punto di saturazione e subire un processo di condensazione o sublimazione a seconda che la temperatura ambientale sia superiore o inferiore a 0°. Nel primo caso il vapore passa allo stato liquido in forma di goccioline, mentre nel secondo caso passa allo stato solido, in forma di sottili aghi di ghiaccio. Il fenomeno di condensazione può però verificarsi soltanto se nella massa d'aria sono presenti corpuscoli e particelle di polveri o sali che possano catturare le molecole del vapore acqueo e dell'acqua e formare quindi aggregati di maggiori dimensioni detti nuclei di condensazione. Il raffreddamento che conduce al punto di saturazione può essere determinato dalla perdita di calore della massa d'aria in seguito ad irraggiamento o da una diminuzione della pressione, causata a sua volta dall'ascesa della massa d'aria umida verso strati più alti e meno densi dell'atmosfera. La diminuzione della pressione genera espansione della massa d'aria che a sua volta comporta l'allontanamento delle molecole che lo compongono e la riduzione della frequenza delle loro mutue collisioni, provocandone il raffreddamento. È necessario allora introdurre i concetti di processi adiabatici e non adiabatici. In termodinamica le trasformazioni che avvengono senza scambi di calore vengono dette adiabatiche; al contrario le trasformazioni non adiabatiche sono quelle in cui esistono scambi di calore nel sistema. L'aria è un pessimo conduttore di calore e pertanto qualunque

movimento verticale di una sua particella può essere considerato adiabatico, cioè senza scambi di calore con l'ambiente esterno. Sono invece processi non adiabatici tutti gli scambi di calore che avvengono, per conduzione, convezione ed irraggiamento, tra il suolo e la bassa atmosfera. All'adiabaticità dei moti atmosferici verticali contribuisce anche il fatto che i processi di più rilevante interesse, come i moti convettivi, hanno durata molto breve che in tale lassi di tempo, generalmente inferiori all'ora, gli scambi di calore con l'ambiente esterno risultano trascurabili. Prima che la condensazione del vapore acqueo abbia inizio, il raffreddamento di una massa d'aria in ascesa risulta essere quindi adiabatico. Si parla di raffreddamento adiabatico secco quando il gradiente termico adiabatico verticale secco è di circa  $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  in salita. Quando viene raggiunta la temperatura di rugiada, temperatura alla quale l'aria a pressione costante diventa satura di vapore acqueo e inizia la condensazione, il processo di ulteriore espansione e raffreddamento non può essere considerato adiabatico secco. Questo perché il calore latente ceduto nel processo di condensazione va in parte a riequilibrare la perdita di calore dovuta all'espansione, facendo sì che da quel momento l'aria satura in ascesa si raffreddi in misura minore. Questo processo è detto pseudoadiabatico, con un gradiente medio di  $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  nei primi 5000/6000m di quota. Per questo motivo l'aria che sale nella nube sarà ancora più calda di quella circostante e subirà un'ulteriore spinta ascensionale.

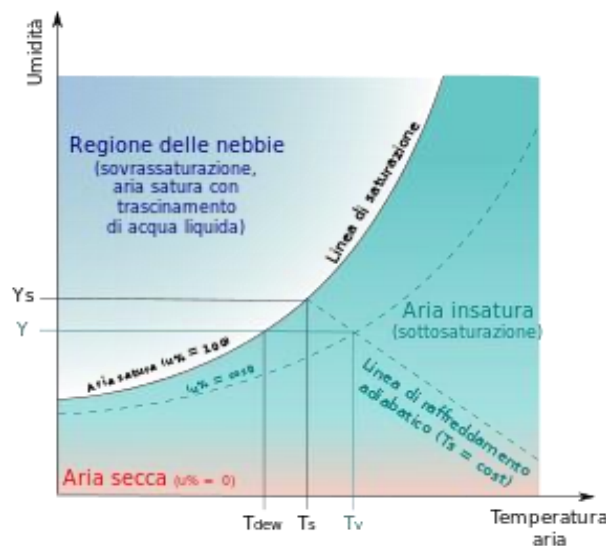


Figura 4-Diagramma psicrometrico

Dalla figura sopra riportata si osserva la linea di saturazione che separa la zona delle nebbie, in cui il sistema è formato da aria satura ed acqua liquida dispersa in essa sotto forma di minuscole gocce, e la zona costituita da aria insatura, una miscela di aria e vapore acqueo. Si possono osservare i punti T<sub>dew</sub> e T<sub>s</sub> che rappresentano rispettivamente la temperatura di rugiada e la temperatura di saturazione.

La stabilità atmosferica esprime l'attitudine dell'atmosfera a favorire o impedire lo sviluppo ed il mantenimento al suo interno di eventuali moti verticali liberi, come quelli legati, ad esempio, alla turbolenza convettiva. La stabilità atmosferica verticale dipende dalla curva di stato  $\frac{dT}{dz}$  e dal gradiente termico adiabatico verticale secco  $\Gamma$ :

- se  $\left|\frac{dT}{dz}\right| > |\Gamma|$ , l'aria in ascesa risulta essere sempre più calda e meno densa dell'atmosfera circostante. Quando la formazione di sollevamento cessa la sua azione, l'aria tende ancora a salire in virtù dell'impulso iniziale. Questa situazione è nota come instabilità atmosferica. Tale situazione si verifica principalmente nelle zone continentali aride o semiaride delle medie e basse latitudini, durante i periodi di massima insolazione e quindi di forte riscaldamento del terreno;
- se  $\left|\frac{dT}{dz}\right| < |\Gamma|$ , l'aria in ascesa si raffredda più velocemente dell'atmosfera circostante. Quando la forzante di sollevamento cessa la sua azione, l'aria tende a ricadere nelle condizioni iniziali poiché è più densa di quella circostante. In questo caso si è in condizioni di stabilità atmosferica. Tale situazione si verifica soprattutto in quei luoghi nei quali la superficie terrestre è più fredda dell'aria sovrastante, come spesso accade nelle zone continentali delle medie ed alte latitudini durante la stagione invernale e sugli oceani d'estate.

I processi sopra esposti diventano più complessi se si introduce l'aria umida, che possiede sempre una certa quantità di energia per effettuare i passaggi di stato del vapore acqueo. La massa di aria umida in ascesa segue prima la curva adiabatica secca ma, durante la salita, la sua temperatura diminuisce mentre la sua umidità assoluta aumenta. Raggiunta la saturazione segue la curva adiabatica satura. Per garantire la stabilità della massa di aria non è più sufficiente che la curva di stato sia superiore al valore del gradiente termico adiabatico verticale secco: l'aria deve essere forzatamente sollevata fino alla quota di convezione libera, prima che la sua temperatura sia uguale a quella circostante. A partire da questa quota l'aria salirà spontaneamente.

### **1.3 PRESSIONE ATMOSFERICA**

La pressione al livello del mare si aggira attorno ai 1.013 hPa alle medie latitudini, ma la pressione locale subisce ampie oscillazioni diurne o stagionali intorno a tale valore. La pressione atmosferica diminuisce in modo esponenziale con l'altitudine e varia anche a seconda della latitudine. Diminuisce all'aumentare dei valori di temperatura e umidità.

Quando l'atmosfera si riscalda l'aria tende a dilatarsi, diventando meno densa e più leggera a parità di volume occupato. Di conseguenza il minore peso della massa d'aria calda riduce la pressione della

colonna d'aria. Per quanto riguarda l'umidità, le molecole di vapore acqueo prendono il posto delle molecole più pesanti rendendo l'aria umida più leggera.

La differenza di pressione tra aree geografiche diverse determina lo spostamento delle masse di aria, ovvero il vento, che porta a contatto masse d'aria con proprietà termobariche differenti. In questi casi, lungo la sottile demarcazione dove le due masse di aria si fronteggiano, possono verificarsi reciproci sconfinamenti di aria fredda verso le aree di area più calda (fronte freddo) o viceversa (fronte caldo). Tali perturbazioni sono poi come si vedrà in seguito i responsabili portatori del maltempo alle medie latitudini.

Le diminuzioni locali della pressione atmosferica sono quindi la causa di innesco dei moti verticali ascendenti di origine dinamica, responsabili a loro volta dei processi di condensazione in seno all'atmosfera (nubi e precipitazioni).

Il moto dell'aria è quindi influenzato da tre fattori: il gradiente di pressione, la forza deviante della rotazione terrestre e la forza centrifuga.

La forza gradiente causa lo spostamento delle masse di aria dalle aree di alta pressione alle aree di bassa pressione ma, essendo presente la rotazione terrestre, insorge la forza deviante la cui intensità dipende dalla latitudine e dall'intensità della velocità di spostamento. Questa forza devia verso destra il vento nell'emisfero settentrionale e verso sinistra in quello meridionale, con intensità massima ai poli e nulla all'equatore. In assenza di altre forze si genera l'equilibrio geostrofico, equilibrio dinamico in cui la forza gradiente e quella deviante risultano opposte ed il vento è perpendicolare ad entrambe. In tale condizione il vento si dispone parallelamente alle isobare, lasciando, nell'emisfero nord, la bassa pressione alla propria sinistra. In altre parole, nell'emisfero nord, il vento viaggia in verso antiorario attorno alle zone di bassa pressione. (legge di Buys-Ballot). Nella realtà questo equilibrio è influenzato dall'attrito dell'aria, sia al suo stesso interno che nei confronti della superficie terrestre. Ne risulta che il vento non è veramente parallelo alle isobare ma è formato da direzioni mutate.

Le variazioni locali della pressione atmosferica al suolo possono essere anche di origine dinamica: se sulla verticale del luogo entra più aria di quanta ne esca (situazione di convergenza) è chiaro che la pressione atmosferica è destinata ad aumentare; viceversa se il flusso di aria entrante è minore di quello uscente (situazione di divergenza) la pressione al suolo diminuirà.

La pressione atmosferica gioca quindi un ruolo fondamentale nelle vicende del tempo, dato che quasi tutti i fenomeni meteorologici sono originati dalle sue variazioni spaziali (orizzontali e verticali) o temporali.

Se la pressione in loco è in diminuzione, la bassa pressione che così si origina al suolo, richiama aria dalle aree circostanti, che, però, non potendo ammassarsi tutta il loco, è costretta a sollevarsi. Tali



moti ascendenti trasportano l'aria più umida degli strati prossimi al suolo verso pressioni decrescenti, con conseguente espansione, raffreddamento e condensazione della massa di aria in ascesa. Una diminuzione della pressione atmosferica lascia presagire un peggioramento del tempo. Al contrario, un aumento locale della pressione atmosferica è quasi sempre accompagnato da un miglioramento nelle condizioni metereologiche.

## **1.4 SOLLEVAMENTO DELLE MASSE D'ARIA**

Il sollevamento delle masse d'aria può avvenire per:

- convezione forzata, in cui l'aria si muove per cause esterne. In questa categoria è presente il sollevamento orografico ed il sollevamento frontale, nei quali i fattori esterni scatenanti sono riconducibili ad ostacoli montuosi ed allo scontro tra masse d'aria di diversa provenienza;
- convezione libera, in cui la massa d'aria si muove liberamente a causa della mancanza di un equilibrio idrostatico dovuto alla sua diversa temperatura rispetto all'ambiente circostante. In questa categoria è incluso il sollevamento convettivo ed il sollevamento ciclonico.

### **1.4.1 SOLLEVAMENTO OROGRAFICO**

Il sollevamento orografico avviene quando le masse di aria in movimento orizzontale sono costrette ad una ascendenza forzata a causa della presenza di un rilievo. Salendo lungo il rilievo l'aria si raffredda ed in contemporanea, per la deviazione subita, subisce un aumento della sua pressione interna e della sua densità, causando la condensazione dell'aria umida e la precipitazione sul versante controvento. Sul versante riparato si riscontra un riscaldamento dovuto alla compressione adiabatica di 1°C ogni 100m. La velocità di sollevamento è dell'ordine di 0.5-1m/s.

Se l'aria non è satura, l'ascensione avviene lungo un'adiabatica secca e segue il gradiente termico adiabatico verticale secco, raffreddandosi di 1°C ogni 100m fino al livello in cui tale raffreddamento non innesca un processo di condensazione. A questo punto, il calore liberato dalla condensazione attenuerà il raffreddamento dell'aria in ascesa ed il sollevamento proseguirà lungo l'adiabatica satura con un gradiente termico che dipende dai valori iniziali di temperatura, umidità specifica e velocità ascensionale.

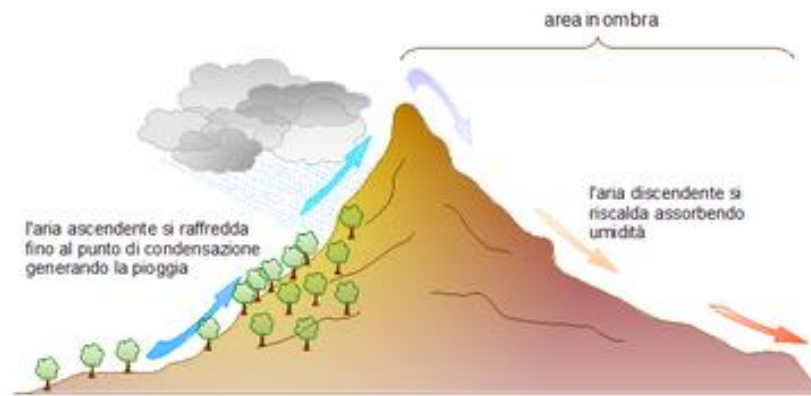


Figura 5-Sollevamento orografico

Tipici sollevamenti orografici sono la Stau ed il Fohn, che verranno presentati in seguito.

### 1.4.2 SOLLEVAMENTO FRONTALE

Il sollevamento frontale delle masse d'aria si origina quando si verifica lo scontro tra masse d'aria di origine differente, e la conseguenza è lo sviluppo di un fronte caldo o di un fronte freddo.

### 1.4.3 FRONTE CALDO

L'aria calda scorre sopra all'aria fredda pre-esistente dando luogo alla formazione di nubi estese a causa di lenti moti ascendenti che si originano dal sollevamento. Le velocità verticali sono dell'ordine di qualche decina di centimetri al secondo mentre la pendenza è limitata. Il fronte caldo interessa aree estese, anche lontane centinaia di chilometri.

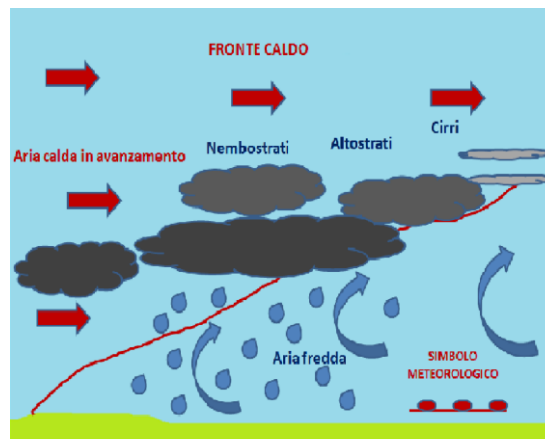


Figura 6-Fronte caldo

#### 1.4.4 FRONTE FREDDO

L'aria fredda che caratterizza il fronte si incunea sotto allo strato caldo pre-esistente, sollevandolo bruscamente e provocando un consistente moto ascendente. Le velocità verticali sono dell'ordine di qualche metro al secondo ed il fronte è quasi verticale con areale limitato.

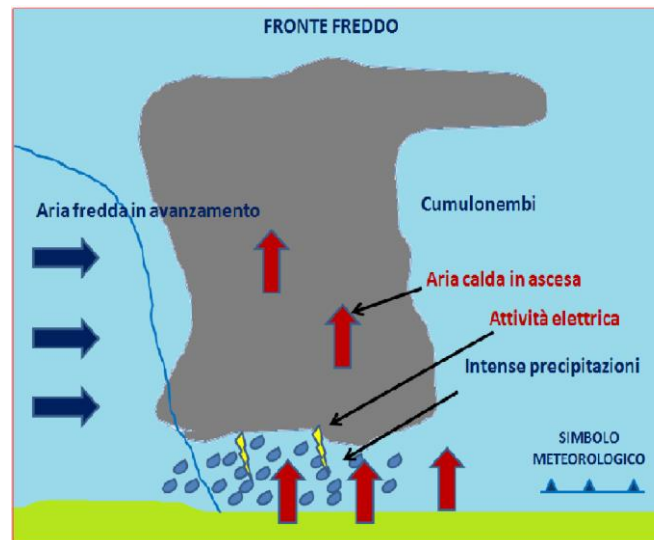


Figura 7-Fronte freddo

#### 1.4.5 SOLLEVAMENTO CONVETTIVO

Il sollevamento convettivo si verifica quando la massa d'aria viene sospinta verso l'alto dalla forza di galleggiamento di Archimede, a causa di un forte riscaldamento della superficie terrestre. Dai terreni maggiormente riscaldati dal Sole, nelle ore centrali della giornata, si alzano masse d'aria calde di densità minore rispetto all'atmosfera circostante che generano correnti ascendenti le cui velocità verticali sono piuttosto intense, dell'ordine dei 2-10 m/s. A distanza di molte centinaia di metri, l'aria calda ridiscende al di sopra delle aree più fresche. Se la massa è sufficientemente umida, quando raggiunge il livello di saturazione condensa generando una nube. Il processo di condensazione, liberando il calore latente di evaporazione, contribuirà a riscaldare ulteriormente la massa d'aria che diventerà così maggiormente instabile. In questo modo il moto convettivo può spingersi ad altezze notevoli, fino ai limiti della troposfera, portando alla formazione di nuvole a forte sviluppo verticale quali cumuli e cumulonembi.

#### 1.4.6 SOLLEVAMENTO CICLONICO

Il sollevamento ciclonico si origina da lenti movimenti verticali che ascendono sulle aree di bassa pressione o discendono sulle aree di alta pressione. I cicloni vengono innescati dalla fuoriuscita

orizzontale di aria in corrispondenza dei rami ascendenti del getto polare, che genera un calo di pressione al suolo e un risucchio dell'aria verso l'alto per colmare il vuoto creatosi. La diminuzione della pressione al suolo richiama aria dalle zone adiacenti, generando moti ascendenti. Queste correnti verticali producono un riscaldamento ed un raffreddamento sulle aree di bassa pressione che è quasi sempre accompagnato da condensazione del vapore acqueo. A causa della natura della circolazione globale dell'aria, ci sono regioni atmosferiche nelle quali i venti convergono ed altre in cui divergono. Dove il vento converge, l'aria è forzata verso l'alto e da ciò deriva un centro di bassa pressione. Dove diverge, invece, l'aria è forzata verso il basso per sostituire quella che si è spostata; ne risulta un centro di alta pressione. I flussi d'aria sono soggetti anche alla forza di Coriolis, per via della rotazione terrestre. L'effetto di questa forza consiste nell'esistenza di venti che seguono traiettorie curve, secondo quanto accennato dalla legge di Buys-Ballot. La combinazione di queste traiettorie e dei flussi del vento causati da convergenza e divergenza porta alla formazione dei cosiddetti venti ciclonici e venti anticiclonici. I primi sono venti che spirano verso un centro di bassa pressione, mentre i secondi spirano attorno ad un centro di alta pressione, allontanandosene.

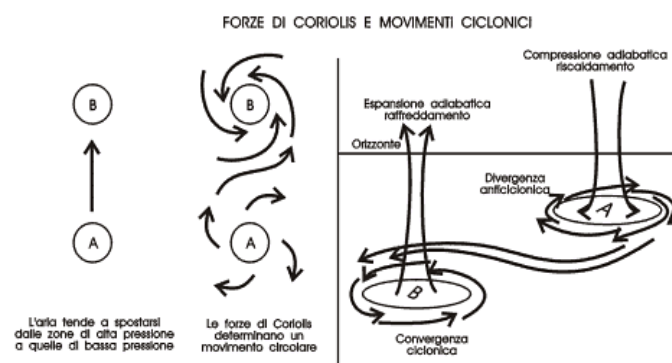


Figura 8-Forze di Coriolis e movimenti ciclonici

## 1.5 CLASIFICAZIONE DEL VENTO

Il vento è il movimento di una massa d'aria atmosferica da un'area con alta pressione (anticiclonica) a un'area con bassa pressione (ciclonica). In genere con tale termine si fa riferimento alle correnti aeree di tipo orizzontale, mentre per quelle verticali si usa generalmente il termine correnti convettive che si originano invece per instabilità atmosferica verticale. Il vento è causato dalle differenze di pressione atmosferica che spingono l'aria da zone di alta pressione a zone di bassa pressione per effetto della forza di gradiente. Il flusso d'aria non corre in maniera diretta da un punto all'altro, cioè con la stessa direzione della forza di gradiente, ma subisce una deviazione dovuta alla forza di Coriolis (o effetto di Coriolis) che tende a spostarlo verso destra nell'emisfero settentrionale e verso sinistra nell'emisfero meridionale. A causa di questo effetto, che non è presente all'equatore, il vento soffia parallelamente alle isobare (vento geostrofico). Tuttavia alle basse quote (meno di 600 m) è

necessario tenere conto che l'attrito con la superficie terrestre può modificare la direzione del vento di circa 10° sopra il mare e 15–30° sopra la terra.

Tradizionalmente la scala di Beaufort fornisce una descrizione empirica dell'intensità del vento basata sulle condizioni del mare. La scala contiene termini generali per definire i venti di differenti velocità medie come brezza, burrasca, tempesta e uragano, talvolta preceduti da aggettivi come moderato, fresco, forte, che vengono usati per differenziare la forza del vento all'interno della stessa categoria. La terminologia per i cicloni tropicali differisce da una regione all'altra del mondo. La maggior parte dei bacini oceanici usa la media della velocità del vento per determinare la categoria del ciclone.

Forza	Descrizione	Velocità (km/h)	Mare
0	calma	0-1	mare d'olio
1	bava di vento	2-5	increspato
2	brezza leggera	6-11	ondicelle minute
3	brezza tesa	12-19	ondicelle grosse
4	vento moderato	20-28	onde piccole
5	vento teso	29-38	onde moderate
6	vento fresco	39-49	cavalloni
7	vento forte	50-61	onde grosse
8	burrasca	62-74	onde moderatamente alte
9	burrasca forte	75-88	onde alte
10	tempesta	89-102	onde molto alte
11	tempesta violenta	103-117	onde eccezionalmente alte
12	uragano	oltre 118	mare bianco

Tabella 1-Classificazione del vento, scala di Beaufort

## 1.6 NUBI

Le nubi sono agglomerati visibili di particelle d'acqua allo stato liquido o solido, in sospensione nell'atmosfera, principalmente in troposfera. Il loro aspetto è sempre in evoluzione poiché sono sempre in perenne movimento e cambiamento di stato.

Una nube è un insieme di microscopiche gocce per centimetro cubo con un raggio all'incirca di 10 micron. Le dimensioni tipiche sono infatti dell'ordine di 10-102 micron, mentre la concentrazione (numero di gocce per litro) varia tra 103-107, in funzione delle dimensioni. Con queste dimensioni e concentrazioni il conglomerato risulta opaco alle lunghezze d'onda del visibile, per effetto della diffusione della luce.

La presenza di vapore acqueo in atmosfera è determinante per la formazione delle nubi in atmosfera: le precipitazioni hanno luogo quando la nube diventa instabile, quando cioè alcune gocce iniziano ad

accrescersi a scapito delle altre. In atmosfera, e principalmente nella troposfera, il contenuto di vapore acqueo nell'aria è di circa il 4% in volume e sebbene la sua percentuale sia apparentemente bassa esso gioca un ruolo determinante in numerosi processi atmosferici. La sua importanza è legata al fatto che è l'unico tra i gas atmosferici a subire cambiamenti di fase nell'intervallo di pressioni e temperature che si incontrano in atmosfera. I calori latenti per i suoi cambiamenti di fase hanno valori molto elevati, determinando importanti scambi di calore con l'aria e di conseguenza sensibili variazioni di temperatura. La formazione delle nubi è legata a processi di condensazione o sublimazione del vapore acqueo in atmosfera, che dà origine alle goccioline o ai cristalli di ghiaccio. Da un punto di vista termodinamico, perché si abbia condensazione o sublimazione devono essere state raggiunte le condizioni di saturazione: se in una data massa d'aria, in condizioni di saturazione, l'umidità aumenta ancora, quella in eccesso condensa sotto forma di goccioline. Affinché il processo continui con formazione di un numero di gocce tali da creare una nube visibile ed in modo che queste rimangano stabili (senza evaporare), le condizioni di saturazione devono essere mantenute abbastanza a lungo. A livello macroscopico le nubi rappresentano quindi l'interazione tra il sistema termodinamico ed elettrico attraverso l'azione combinata di umidità, pressione e temperatura, con spostamenti di masse d'aria orizzontali e verticali, flussi energetici e cariche elettriche sia all'interno che all'esterno (biosfera, idrosfera, geosfera) del dominio atmosferico.

La condensazione del vapore può essere raggiunta o mediante raffreddamento di una massa d'aria umida o mediante umidificazione della massa d'aria. La maggior parte delle nubi si origina dal processo di raffreddamento. Al diminuire della temperatura dell'aria si avvicina alla saturazione essendo minore la quantità di vapore che vi può essere contenuta. I meccanismi che possono portare al raffreddamento e dunque alla formazione delle nubi sono diversi:

- Nubi convettive, si formano quando l'aria vicino alla superficie terrestre viene riscaldata sia in modo diretto dai raggi solari che dalla radiazione indiretta proveniente dal suolo. L'aria calda si espande e, quando diventa meno densa dell'aria sopra di sé, sale nell'atmosfera. A questo punto si raffredda e raggiunta una certa altitudine, corrispondente al livello di condensazione, raggiunge la sua temperatura di dew point e tutto il vapore in essa contenuto inizia a condensare;
- Nubi frontali, si generano quando la massa d'aria viene forzata verso l'alto dall'incontro con aria fredda e più densa. Su un fronte, la massa d'aria più fredda scivola sotto la massa calda che salendo si raffredda e raggiunge la sua temperatura di dew point dando inizio alla condensazione ed alla formazione della nube;
- Nubi orografiche, si formano quando una massa d'aria è obbligata a salire nell'atmosfera a causa di un ostacolo orografico;

- Nubi turbolente, si formano quando una massa d'aria passa sopra ad una superficie topografica discontinua. Se la massa si muove velocemente si generano dei mulinelli che portano parte dell'aria ad altitudini più alte dove si formano poi le nubi.

### **1.6.1 CLASSIFICAZIONE DELLE NUBI**

Le nubi vengono classificate a seconda della loro altitudine e della loro estensione. Si distinguono pertanto tre famiglie: le nubi alte, le nubi medie e le nubi basse. Tutte le nubi appartenenti a queste famiglie hanno un'estensione prevalentemente orizzontale. Alle suddette, occorre aggiungere un'altra famiglia, quella delle nubi a sviluppo verticale, che trovano nell'altezza la loro dimensione prevalente. Le nubi a sviluppo orizzontale sono nuvole di carattere stratificato formatesi principalmente a causa di correnti ascensionali deboli che non riescono a contrastare i forti venti in quota a causa della loro sessa naturale espansione.

Le nubi verticali invece si formano grazie a notevoli movimenti ascendenti e discendenti dell'aria secondo una componente verticale. Sono dovute alla rapida ascesa di aria calda, che viene portata fino a sei, otto e persino oltre a 10 chilometri di altezza, qualche volta forando la tropopausa.

### **1.6.2 NUBI ALTE**

Formazioni nuvolose con base (nelle regioni temperate) sopra gli 8000 m, sono le nubi più fredde, composte essenzialmente da cristalli di ghiaccio che le rendono traslucide. Comprendono:

- Cirrus, formata da cristalli di ghiaccio;
- Cirrocumulis, formata sia da cristalli di ghiaccio che da goccioline;
- Cirrostratus, formata sempre da cristalli di ghiaccio.

### **1.6.3 NUBI MEDIE**

Sono formazioni nuvolose con base (nelle regioni temperate) tra i 2000 e gli 8000 m. Sono essenzialmente composte da gocce d'acqua o da un miscuglio di gocce d'acqua e cristalli di ghiaccio.

Comprendono:

- Altcumulus, formata da goccioline d'acqua;
- Altostratus, formata sia da cristalli di ghiaccio che da goccioline.

### **1.6.4 NUBI BASSE**

Formazioni nuvolose con base (nelle regioni temperate) sotto i 2000 m, sono essenzialmente composte da gocce d'acqua. Quando le nubi basse giungono in contatto col terreno si parla di nebbia.

Comprendono:

- Stratocumulus, formata da goccioline d'acqua;

- Stratus, formata da goccioline d'acqua.

### 1.6.5 NUBI A MEDIO SVILUPPO VERTICALE

Formazioni con base sotto i 3000 m. Sono essenzialmente composte da gocce d'acqua. Comprendono:

- Cumulos, formate da goccioline d'acqua.

### 1.6.6 NUBI A GRANDE SVILUPPO VERTICALE

Formazioni nuvolose verticali. Sono le nubi più turbolente e sovrastano le correnti ascensionali. Nelle loro forme più grandi, possono raggiungere dimensioni enormi, coprendo intere regioni e portando violente precipitazioni e temporali. Comprendono:

-Cumulonimbus, formate da goccioline d'acqua con un'incudine formata da una nuvola di cristalli di ghiaccio.

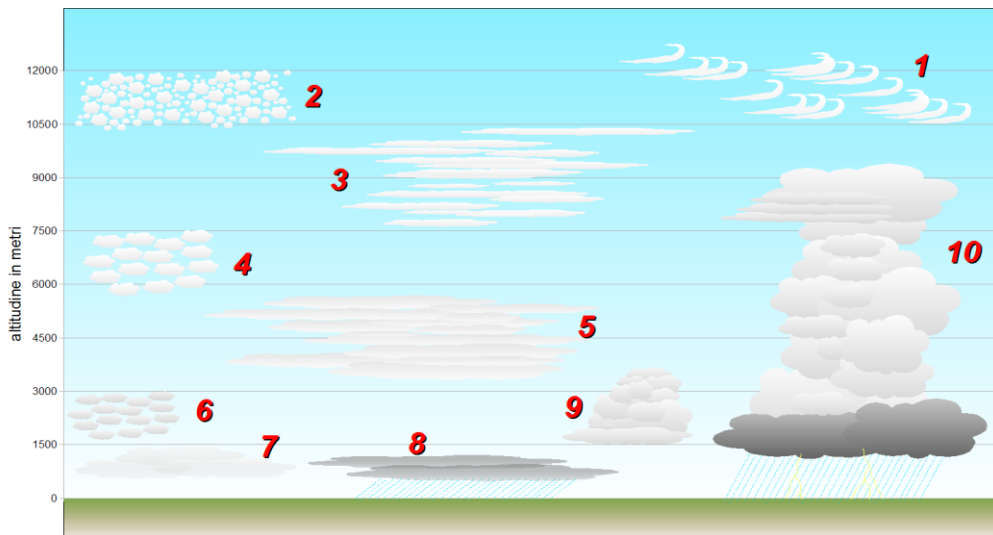


Figura 9-Classificazione delle nubi

1: Cirri 2: Cirrocumuli 3: Cirrostrati 4: Altostrati 5: Altostrati 6: Stratocumuli 7: Strati 8: Nembostrati 9: Cumuli 10: Cumulonembi

## 1.7 PRECIPITAZIONE

La precipitazione è un fenomeno meteorologico complesso, variabile sia nello spazio che nel tempo. È regolato da due elementi fondamentali, uno dinamico – gli afflussi – ed uno statico – la posizione geografica e la conformazione del territorio.

### 1.7.1 MECCANISMO DI FORMAZIONE

Secondo la teoria vigente, proposta dal meteorologo svedese Tom-Bergeron, le precipitazioni possono avvenire solo quando la forza peso delle gocce sarà maggiore della resistenza offerta dal



moto ascendente che ha portato alla formazione della nube stessa e che tende a mantenere le gocce in sospensione.

Sono necessarie centinaia di milioni di goccioline presenti nelle nubi, con diametri dell'ordine di 10 -25 micron, per formare una goccia, che invece diametri maggiori, con un diametro tra i 500 -3000 micron. I meccanismi che attuano questa trasformazione sono essenzialmente tre:

accrescimento per condensazione, accrescimento per coalescenza ed accrescimento per cristalli di ghiaccio.

Il primo processo è quello della condensazione del vapore soprassaturato dell'aria all'interno della nube sulle goccioline già esistenti. Si distingue per essere un processo estremamente lento.

Il processo più rapido ed efficiente nella formazione delle precipitazioni è il secondo, l'accrescimento per coalescenza. In questo processo, le gocce più grandi, trascinate verso l'alto dalle correnti ascendenti che hanno originato la nube, collidono con le gocce più piccole che, più leggere, sono animate da velocità verticali maggiori. Nella collisione le gocce più grandi catturano una certa frazione di goccioline urtate, un processo che è tanto più efficace quanto più la nube è densa. Quando le gocce raggiungono un certo diametro (200 micron), le correnti ascensionali non sono più in grado di mantenerle in sospensione e quindi iniziano a cadere, ingrandendosi ulteriormente.

L'ultimo processo citato, si verifica nelle nubi molto fredde, immerse nell'atmosfera a temperature inferiori agli zero gradi, dove i nuclei glaciogeni attraggono su stessi le goccioline di vapore, formando così di micro cristalli di ghiaccio. Questi, attirando le molecole di vapore, si ingrandiscono e precipitano. Nella caduta possono accrescere ulteriormente per coalescenza, sia urtando gocce sovrapposte, sia scontrandosi con altri cristalli. Usciti dalla nube, se la temperatura rimane negativa o poco superiore allo zero cadono come cristalli di neve, altrimenti si trasformano in gocce di pioggia.

### **1.7.2 TIPOLOGIE DI PRECIPITAZIONE**

La temperatura alla quale si verifica la condensazione del vapore acqueo nelle masse d'aria determina la tipologia di precipitazione: pioggia, neve, grandine, nebbia, rugiada e brina.

Per la formazione di pioggia e neve è necessaria la presenza di granelli di polvere sospesi nell'aria che permettano l'agglomerazione delle molecole d'acqua. Quando la loro condensazione avviene ad una temperatura superiore agli zero gradi e il diametro della goccia supera gli 0.5mm si ha la pioggia. Se invece la temperatura rimane al di sotto degli zero gradi le molecole di acqua cristallizzano, formando il ghiaccio. Questi cristalli, attraversando strati d'aria a temperature superiori agli zero gradi, fondono formando i fiocchi di neve che possono raggiungere anche dimensioni notevoli.

Un altro tipo di precipitazione è la grandine. I chicchi di grandine hanno forma sferica e dimensioni molto variabili tra i 5 ed i 125 mm. Sono costituiti da un nucleo centrale formato da un granello di

polvere ed avvolto alternativamente da uno strato di ghiaccio trasparente e da uno strato di ghiaccio opaco. La grandine si forma quando le gocce di pioggia sono spinte da forti correnti verso l'alto, dove ghiacciano, e poi verso il basso, dove fondono in parte. Ad ogni ciclo (ascesa – discesa) si forma un nuovo strato di ghiaccio e il chicco aumenta di dimensione.

Quando invece la condensazione delle molecole d'acqua presenti nelle masse d'aria si verifica al suolo si ha la nebbia.

Nella stagione calda, durante la notte, quando il suolo si raffredda maggiormente rispetto all'aria, la condensazione delle molecole d'acqua forma la rugiada.

Infine, nelle notti invernali, quando la temperatura si abbassa notevolmente, le molecole d'acqua sublimano direttamente allo stato solido formando la brina, costituita da piccoli cristalli di ghiaccio.

### **1.7.3 NEBBIA**

La nebbia è un'idrometeora che si forma per condensazione del vapore acqueo negli strati immediatamente adiacenti al suolo. È formata da un aggregato visibile di minuscole gocce d'acqua dal diametro di 5 -10 micron. Secondo la definizione internazionale la nebbia è associata ad una visibilità inferiore al chilometro, altrimenti si parla di foschia. Il fenomeno della foschia è del tutto analogo a quello della nebbia con la differenza che le goccioline sono più piccole e più disperse.

La formazione della nebbia avviene in diversi modi, legati ai diversi processi fisici che possono portare a condensazione della massa d'aria umida adiacente al suolo.

#### **1.7.3.1 NEBBIA DA UMIDIFICAZIONE**

Quando la temperatura dell'aria cresce lungo la verticale, le gocce di pioggia che cadono dai sovrastanti corpi nuvolosi possono risultare più calde dello strato d'aria che stanno attraversando. In tali condizioni le goccioline evaporano, sottraendo calore all'ambiente circostante. Il raffreddamento può portare la massa d'aria alla condensazione del vapore acqueo; le nuove gocce così originatesi possono crescere in numero ed in grandezza fino a che la visibilità orizzontale non si riduce a 1000 m o meno. Lo strato nuvoloso da cui cade la pioggia si sviluppa in tal caso verso il basso e può toccare anche il suolo, dando così origine alla nebbia.

#### **1.7.3.2 NEBBIA DA RAFFREDDAMENTO**

La causa più frequente e più efficace per la formazione della nebbia è il raffreddamento dell'aria umida negli strati prossimi al suolo. Sulla terraferma le nebbie infatti sono in genere determinate dal forte raffreddamento notturno del suolo per perdita di calore nell'infrarosso – nebbia da irraggiamento.

Tali nebbie ordinariamente non superano i 200 -300 m di spessore tendono a dissolversi nelle ore più calde della giornata e si generano in situazioni caratterizzate da cielo sereno, assenza di vento, elevato grado di umidità e atmosfera molto stabile.

Queste condizioni si riscontrano con maggior frequenza nel periodo invernale, in concomitanza di situazioni anticicloniche che sono caratterizzate da cielo sereno e debole circolazione e quindi favoriscono un intenso irraggiamento notturno, accompagnato dalla formazione di inversioni termiche con base al suolo, sotto le quali tendono a ristagnare e ad accumularsi progressivamente il vapore acqueo.

#### **1.7.4 CLASSIFICAZIONE DELLE PIOGGE**

In natura esistono diverse tipologie di pioggia, con il fatto che il raffreddamento delle masse d'aria necessario alla condensazione, e quindi alla formazione della pioggia, può avvenire in modi diversi. Inoltre, non sempre è possibile distinguere in modo netto tra le diverse manifestazioni piovose. È ragionevole perciò operare una classificazione delle precipitazioni in base ai processi di formazione.

Un'ulteriore classificazione può essere effettuata in funzione dell'intensità del fenomeno.

#### **1.7.5 CLASSIFICAZIONE PER GENESI**

Si possono riconoscere essenzialmente tre tipologie di pioggia: piogge convettive, piogge cicloniche e piogge orografiche.

##### **1.7.5.1 PIOGGE CONVETTIVE**

Le piogge convettive hanno origine dall'ascesa di una massa d'aria che si è riscaldata a contatto con la superficie terrestre; salendo in quota, dove la temperatura diminuisce, l'umidità contenuta nell'aria condensa e dà luogo alla precipitazione. Le condizioni ideali per questo tipo di precipitazione si hanno nella zona equatoriale, durante tutto il corso dell'anno, sia sui continenti che sui mari purché non attraversati da correnti fredde.

Nella fascia compresa tra i tropici e l'equatore la stagione si divide in due periodi distinti, mentre nella zona dei tropici marginali è concentrata in un unico semestre, in corrispondenza del periodo in cui il sole è allo zenit o comunque molto alto sull'orizzonte. Le piogge convettive sono caratterizzate da forte intensità, localizzazione limitata e breve durata.

Si possono distinguere in base alla loro genesi quattro tipologie di temporali:

-Temporali frontali, che a loro volta sono suddivisi in tre sottocategorie:

- Da fronte freddo: si generano quando l'aria umida stagnante al suolo viene forzatamente sollevata verso l'alto e libera la propria instabilità mediante una rapida condensazione e conseguente cessione di calore latente.
- Da fronte caldo: si generano quando la massa d'aria calda che sale lungo la superficie del fronte risulta instabile.
- Pre-frontali: avvengono quando nel settore caldo della perturbazione il surriscaldamento del suolo, l'umidità e la spinta del fronte freddo in avanzamento causano instabilità dei bassi strati.
- Temporali orografici: si generano quando una massa d'aria umida viene spinta verso l'alto dalla presenza di rilievi. Il conseguente raffreddamento provoca la condensazione dell'umidità.
- Temporali di calore: avvengono in condizioni di alta pressione, quando il surriscaldamento al suolo causa forti correnti ascendenti di aria umida e instabile,
- Temporali avvevivi: si generano quando una massa d'aria fredda scorre lungo una superficie calda.

### **1.7.5.2 PIOGGE CICLONICHE E FRONTALI**

Le piogge cicloniche sono legate a depressioni che si muovono generalmente da ovest verso est e che nascono dal contrasto tra masse d'aria calda di origine tropicale e masse d'aria più fredda provenienti dalle alte latitudini. Sono fenomeni caratteristici delle aree extra tropicali. Per genesi e manifestazione le piogge cicloniche potrebbero essere confuse con le piogge convettive. Tuttavia è presente una differenza sostanziale: mentre nelle piogge convettive l'impulso ascensionale è di tipo termico, nelle piogge cicloniche è di tipo dinamico, in quanto l'aria calda è spinta verso l'alto dall'aria fredda e pesante che scorre al suolo.

Le precipitazioni che derivano di un fronte caldo sono prolungate e spazialmente estese ma a bassa intensità, mentre quelle generate da un fronte freddo sono caratterizzate da durata minore ma da maggiore intensità.

### **1.7.5.3 PIOGGE OROGRAFICHE**

Le piogge orografiche si generano quando una massa d'aria in moto orizzontale deve sollevarsi forzatamente a causa della presenza di un ostacolo lungo il percorso. Le condizioni ideali per il manifestarsi di piogge orografiche si hanno in presenza di lunghe catene montuose relativamente continue che si allungano parallelamente alla costa e con venti provenienti dal mare che le investono con un angolo di circa novanta gradi.

In questa situazione si osserva una marcata differenza tra il versante esposto al vento dominante, dove avvengono abbondanti precipitazioni, e il versante riparato dove si registra una relativa aridità. Inoltre, è stato verificato che l' flessione delle precipitazioni non è circoscritta al solo versante riparato,

ma si estende anche al piede della montagna, per un'ampiezza che dipende direttamente dall'altezza della catena montuosa.

È necessario specificare che gran parte delle precipitazioni che avvengono in quota non hanno origine puramente orografica ma hanno una genesi più complessa, a cui contribuiscono diversi fenomeni:

- La formazione di correnti ascendenti lungo i fianchi del rilievo a causa del forte riscaldamento del terreno;
- Il verificarsi dell'effetto di blocco esercitato dai rilievi sui cicloni in movimento, che causa piogge abbondanti anche a bassa quota;
- La tendenza all'ascesa propria di certe masse instabili, accentuata dalla presenza della montagna.

### 1.7.6 CLASSIFICAZIONE PER INTENSITA'

Un altro criterio di classificazione delle piogge riguarda l'intensità del fenomeno e un modo proposto per ordinarle secondo il grado di intensità è riportato nella tabella sottostante, nella quale si distinguono sei classi:

<b>Formazione della precipitazione</b>	<b>Intensità di precipitazione [mm/h]</b>	<b>Diametro delle gocce [mm]</b>	<b>Velocità di caduta al suolo [m/s]</b>	<b>Densità in atmosfera [mg/m<sup>3</sup>]</b>
<i>PiovigGINE</i>	<1	0.2	0.75	93
<i>Pioggia debole</i>	1-2	0.5	2	139
<i>Pioggia moderata</i>	2-6	1	4	278
<i>Pioggia moderata</i>	>6	1.5-2	5	833
<i>Rovescio</i>	>10	2-3	6	1852
<i>Nubifragio</i>	>30	3	8	5401

Tabella 2-Classificazione della precipitazione per intensità

All'aumentare della dimensione delle gocce di pioggia aumenta anche l'intensità del fenomeno. Tuttavia, i diametri delle gocce non superano mai i 6 mm, altrimenti le gocce in caduta verrebbero frammentate in parti più piccole dalla resistenza dell'aria. È stato inoltre dimostrato che per diametri maggiori di 3 mm la tensione superficiale non è più sufficiente per tenere insieme le molecole d'acqua

che formano la goccia. La quantità d'acqua che precipita dipende dalla quantità di vapore saturo che condensa durante il moto verticale della massa d'aria, che a sua volta dipende dall'effettivo contenuto di umidità della stessa. È inoltre noto che la capacità dell'aria di contenere vapore acqueo aumenta al crescere della temperatura. Risulta quindi evidente che per avere piogge abbondanti è necessario avere masse d'aria molto umide e calde.

Anche le velocità delle correnti ascensionali influenzano l'intensità della precipitazione: le velocità delle nubi frontali sono di pochi centimetri al secondo mentre quelle prodotte dal sollevamento orografico e dal sollevamento convettivo sono molto più elevate.

## **1.8 FATTORI CLIMATICI GEOGRAFICI**

### **1.8.1 LATITUDINE E INCIDENZA DEI RAGGI SOLARI**

Al variare della latitudine, delle stagioni e della presenza di rilievi, l'angolo di incidenza dei raggi solari cambia, determinando significative differenze nella quantità di radiazione solare percepita dalle varie località. Questa variazione rende possibile una ripartizione zonale dei climi a livelli mondiali.

### **1.8.2 DISTRIBUZIONE DELLE TERRE EMERSE – MARE**

La suddivisione geografica di mari e di terre emerse determina in primo luogo il carattere continentale o marittimo delle masse d'aria che circolano in atmosfera e, di conseguenza, del clima. L'interazione degli effetti tra mare e terre è più marcata nelle zone costiere e si manifesta nella caratteristica variazione diurna e annuale di temperatura, precipitazione e umidità. La distinzione tra carattere marittimo e continentale, non è sempre netta, le masse d'aria presentano spesso un grado intermedio tra i due caratteri, la cui determinazione è influenzata dalla distanza dal mare. Va però sottolineato che l'influenza degli oceani non dipende soltanto dalla loro distanza dalle zone in esame ma anche dalla natura della circolazione generale atmosferica.

Nelle zone a carattere continentale, la precipitazione annuale totale decresce muovendosi dalle coste verso l'entroterra. Nelle zone a carattere marittimo, invece, la precipitazione totale accumulata è elevata e cade principalmente nel tardo autunno.

### **1.8.3 CORRENTI OCEANICHE**

Le correnti oceaniche, sia quelle calde provenienti dalle zone equatoriali, che quelle fredde provenienti dalla fascia polare, tendono a estendersi notevolmente nel senso dei meridiani, permettendo importanti scambi di calore tra le basse e alte latitudini.

Va però sottolineato che le correnti calde esercitano maggiore influenza delle fredde in quanto queste ultime, più pesanti, tendono a scorrere lungo il fondo degli oceani invece che in superficie.

Le correnti marittime esercitano non solo un'influenza termica, ma svolgono un ruolo fondamentale anche sulla distribuzione delle precipitazioni. Le correnti calde determinano un incremento dei fenomeni meteorici, in quanto una massa d'aria che arriva su un continente da un mare relativamente caldo subisce sulla terraferma un raffreddamento che porta l'aria umida vicino al punto di condensazione, accrescendo le probabilità di precipitazione. Le correnti fredde agiscono invece in modo opposto.

Il clima europeo è fortemente influenzato dalla Corrente Nordatlantica, una corrente oceanica calda che nasce a sud – est dell'isola di Terranova, dove le acque calde della Corrente del Golfo si mischiano a quelle fredde della Corrente del Labrador.

#### **1.8.4 ORIENTAMENTO DELLE CATENE MONTUOSE**

I sistemi montuosi influenzano il clima in due modi diversi: sbarrando le correnti aeree e agendo direttamente sui moti atmosferici, imponendo variazioni di percorso rispetto alle direzioni originarie, incanalando le masse d'aria lungo direttrici prestabilite e provocando modifiche nella struttura termodinamica delle stesse. Nel primo caso, quando un sistema montuoso impedisce l'afflusso di aria umida dal mare verso l'interno, le zone che si trovano sottovento presentano un clima fortemente continentale e con precipitazioni scarse. Al contrario, le zone litoranee presentano abbondanti precipitazioni e godono di un clima più mite perché risultano protette dai venti freddi provenienti dall'entroterra.

#### **1.8.5 RILIEVI E LORO ESPOSIZIONE TOPOGRAFICA**

Al crescere dell'altitudine la pressione atmosferica diminuisce e la radiazione solare effettiva aumenta. La copertura nuvolosa delle regioni montane dipende dal livello di condensazione del vapore acqueo, dall'altezza delle montagne – che ostacolano il movimento delle masse d'aria – e dall'esposizione dei versanti ai venti dominanti.

Quando l'aria sale forzatamente lungo un versante si formano più nubi gonfie di pioggia. La quantità di precipitazione aumenta fino ad una certa altitudine, poi si riscontra un'inversione e inizia a diminuire.

Le condizioni climatiche non sono influenzate solo dall'altitudine rispetto al livello del mare, ma anche dall'estensione e dal grado di continuità delle catene montuose, dalla direzione del loro asse, dalla pendenza dei versanti, dall'ampiezza delle valli, dalla presenza di passi e dalla loro altezza e dall'esposizione al sole e ai venti dominanti.

I versanti sopravento sono molto più piovosi dei versanti riparati e delle aree da essi protette.

La frequenza delle nevicate e la durata del manto nevoso crescono con l'altezza. Sopra ad una certa altitudine – che dipende dalla latitudine - le temperature sono sempre negative e rendono possibile la copertura permanente della neve.

Questa altitudine è chiamata linea di neve e dipende inoltre dal quantitativo di neve che precipita, dall'esposizione del pendio e dal contenuto di umidità dell'aria.

### **1.8.6 ACQUE CONTINENTALI**

La presenza di specchi d'acqua dolce di notevole estensione contribuisce a rendere il clima di una regione continentale più mite perché le masse d'acqua attenuano le temperature estreme. Un esempio significativo di questa influenza sono i laghi prealpini italiani, in quanto il clima lungo le loro rive risulta più mite di quello della vicina Pianura Padana. La presenza di laghi determina anche differenze di temperatura e pressione rispetto alle valli ed ai rilievi contigui, dando origine a sistemi di brezza tra laghi e valli.

### **1.8.7 USO E COPERTURA DEL SUOLO**

In base al tipo di copertura del suolo esistono diversi microclimi.

Una prima distinzione viene fatta tra vegetazione di tipo forestale o boschiva e vegetazione derivante da attività agricole, che è stagionale. È necessario considerare l'influenza della vegetazione sull'albedo, ossia il potere riflettente associato ad ogni superficie, che a sua volta è un fattore di particolare importanza per le condizioni climatiche locali e regionali. Infatti, l'albedo varia anche in funzione del tipo di vegetazione, del suo colore, della densità e della continuità.

Le aree prive di vegetazione sono soggette ad elevata radiazione diretta durante le ore giornaliere e, a loro volta, irradiano intensamente durante la notte. Nel caso di vegetazione fitta, invece, una quantità minore di energia solare riesce a penetrare fino al suolo ma allo stesso tempo, durante la notte, viene presa meno energia come radiazione effettiva. Infatti, le aree vegetate costituiscono una fonte importante di vapore acqueo che passa nell'atmosfera come risultato dell'evapotraspirazione. Ciò nonostante, l'effetto di boschi e foreste sul clima delle aree adiacenti è minimo. Nei boschi e nelle foreste le temperature estive sono minori rispetto alle aree limitrofe cittadine per via dell'evapotraspirazione del suolo, della traspirazione dalle piante e del ristagno dell'aria, in quanto il vento soffia sopra la foresta o ai suoi lati. La precipitazione è minore, dal momento che parte di essa viene trattenuta dalla corona degli alberi e parte evapora direttamente.

Un ulteriore fattore da tenere presente è l'urbanizzazione; in aree densamente abitate si genera il fenomeno dell'isola di calore, per il quale la temperatura, sia in estate che in inverno, risulta più alta



rispetto alle zone rurali circostanti. Questo perché avviene un maggior assorbimento di energia solare da parte delle superfici asfaltate e del cemento degli edifici. Inoltre, il suolo urbano presenta una scarsa capacità di trattenere l'acqua; ne consegue una minore evaporazione, che riduce ulteriormente la temperatura dell'aria in prossimità del terreno.

## CAP.2 CIRCOLAZIONI ATMOSFERICHE

### 2.1 CIRCOLAZIONE GENERALE DELL'ATMOSFERA

Nonostante le carte meteorologiche elaborate giornalmente, presentino un continuo susseguirsi di strutture circolatorie sempre diverse che evolvono, esiste una struttura media a scala planetaria del trasporto delle masse d'aria, alla quale si fa riferimento come alle *circolazioni generale dell'atmosfera*.

Il primo impulso a una circolazione generale nasce dal fatto che l'atmosfera presenta una differenza nella distribuzione della temperatura media con la latitudine. Vi è cioè un gradiente di temperatura tra i poli e l'equatore dovuto al bilancio energetico del sistema Terra-Sole. Il sole è l'unica fonte di energia della Terra, e la radiazione solare assorbita dal sistema dipende fortemente dalla latitudine: c'è un netto surplus di energia alle basse latitudini attorno all'equatore e un deficit alle medie e alte latitudini. Questo fa sì che la temperatura media nelle zone tropicali sia notevolmente più alta di quella delle zone polari. Il gradiente di temperatura nord-sud è effettivamente il motore primo dell'atmosfera, sebbene non sia ancora sufficiente a spiegare la circolazione generale nella sua complessità.

La circolazione generale dell'atmosfera è formata da un sistema a tre celle convettive. La cella di Hadley rappresenta la circolazione termica dell'atmosfera e la sua estensione raggiunge i 30° di latitudine. Tra i 30° ed i 60°, dove il gradiente nord-sud di temperatura è il più forte, la circolazione meridionale è opposta a quella richiesta da una circolazione di tipo termico. Questa cella, detta di Ferrel, l'aria sale nelle zone più fredde e discende verso quelle più calde. Nelle zone polari esiste poi una terza cella, nuovamente di tipo termico ma più debole, detta la cella polare.

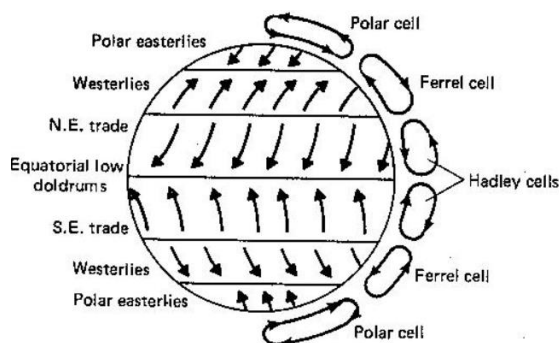


Figura 10-Cella polare, Cella di Ferrel, Cella di Hadley

Il moto dell'aria è strettamente collegato alle variazioni di pressione. Salvo le variazioni stagionali, in linea di massima la variazione di pressione è la seguente: sull'equatore si osserva una cintura di basse pressioni, seguita a circa 30° nord e sud da una zona di alte pressioni, le alte sub-tropicali, che producono in questa fascia un sistema di venti di nord-est nel nostro emisfero e di sud-est nell'emisfero opposto, detti *venti del commercio*. Tra le alte pressioni subtropicali e le basse che si trovano generalmente verso i 60° nord e sud si originano venti verso ovest, e poiché i poli sono zone di alte pressioni, i venti nella regione polare sono nuovamente verso est.

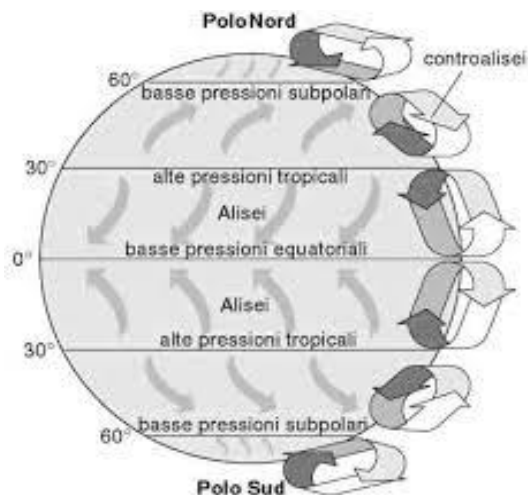


Figura 11-Distribuzione delle pressioni atmosferiche a scala globale

Il trasporto di calore dai tropici ai poli alle medie latitudini non avviene tramite la cella convettiva di Ferrel che è antitermica, ma attraverso un sistema di moti vorticosi. In corrispondenza delle zone di separazione delle tre celle si osservano una frattura della tropopausa, che per ogni cella circolatoria aumenta la propria altezza, e delle correnti ad alta quota orizzontali molto intense, le *correnti a getto*. L'intensità delle correnti a getto, variabile durante l'anno, determina il tempo meteorologico alle nostre latitudini. Le due zone di confine vengono dette il fronte polare e il fronte subtropicale. Dalle ondulazioni del fronte polare e dalle grandi correnti occidentali nascono le perturbazioni che interessano le nostre latitudini. Queste, sono tanto più intense quanto maggiore è il contrasto termico tra i blocchi d'aria, e presentano fenomeni evolutivi caratteristici con grandi ondulazioni orizzontali (dovuti a fenomeni di instabilità ad alta quota), dette Onde di Rossby.

## 2.2 PERTURBAZIONI E FRONTI

Un fronte è la linea di separazione tra due masse d'aria con caratteristiche differenti, per esempio una calda ed una fredda. Si parla di fronte caldo quando l'aria calda scorre sopra l'aria fredda più densa, e di fronte freddo quando l'aria fredda si incunea sotto l'aria più calda sollevandola.

Un sistema frontale è generalmente formato da un fronte freddo che segue uno caldo, ed è normalmente collegato a zone cicloniche. L'evoluzione del sistema è dovuta alle diverse proprietà cinetiche dei due fronti: il fronte freddo, muovendosi più velocemente di quello caldo, tende a raggiungerlo e la linea che segna l'incontro dei due fronti si dice occlusione o fronte occluso.

Spesso i sistemi ciclonici non si presentano isolati ma a gruppi di tre o quattro, che vengono detti famiglie di cicloni. I cicloni che seguono il primo avranno via via evoluzioni minori. Tra una famiglia di cicloni e l'eventuale famiglia successiva in movimento alla periferia settentrionale di un anticiclone, generalmente stazionario, si inserisce un anticiclone mobile, detto anche anticiclone di chiusura.

Un fronte caldo è generalmente preceduto da una diminuzione continua della pressione, che dopo il suo passaggio si stabilizza. Le nubi che si formano lungo la superficie hanno una grande estensione e comprendono cirri, cirrostrati, altostrati, nembostrati e strati. Le precipitazioni sono costituite da piogge o pioggerelle continue. Vicino al fronte e sotto la superficie frontale possono formarsi nebbie dovute in gran parte all'evaporazione delle gocce della precipitazione.

Un fronte freddo è preceduto da variazioni irregolari di pressione, che dopo il suo passaggio aumenta piuttosto bruscamente. Le nubi sono di tipo cumuliforme e le precipitazioni sono violenti rovesci di pioggia, neve o grandine.

Nell'occlusione calda, che si verifica quando l'aria fredda prefrontale è più fredda dell'aria post frontale, si ha un fronte caldo al suolo e uno freddo in quota. I fenomeni che lo accompagnano, specialmente per quanto riguarda le precipitazioni, presentano dapprima i caratteri propri del fronte freddo e poi quelli del fronte caldo.

### **2.3 I CICLONI DELLE MEDIE LATITUDINI**

I cicloni alle medie latitudini si sviluppano dalle ondulazioni del fronte polare quasi stazionario. Causato dall'aria calda che da sud viene spinta verso nord, si forma un sistema frontale sull'angolo del quale si produce una depressione, che favorisce lo sviluppo di una circolazione ciclonica. Con lo sviluppo del sistema frontale si ha la formazione del fenomeno dell'occlusione. Quando la maggior parte dell'aria calda si è sollevata, il sistema ha trasformato tutte le sue riserve di energia potenziale in energia cinetica e inizia una fase di dissolvimento. Durante la ciclogenese l'aria calda si sposta verso il polo e l'aria fredda si sposta verso sud (nel nostro emisfero) e quindi si ha un trasporto di calore verso nord. Le nubi e le precipitazioni che accompagnano i cicloni alle nostre latitudini sono quelli caratteristici di un fronte caldo seguito da uno freddo. All'arrivo del fronte freddo le nubi sono a sviluppo verticale e le piogge più forti.

## 2.4 MASSE D'ARIA CHE AGISCONO SUL MEDITERRANEO

Una massa d'aria è un volume di troposfera definita da valori termo-igrometrici omogenei, che origina in una determinata regione del pianeta. Le masse d'aria originano da un'area anticiclonica per muoversi in direzione di un'area di bassa pressione. Originariamente una massa d'aria può stazionare a lungo sulle regioni occupate dai grandi anticicloni permanenti o stagionali (es. Azzorre o Russo) ove la ventilazione è debole e pertanto acquisiscono le caratteristiche fisiche del suolo o del mare sottostante. Per questa ragione le masse d'aria vengono distinte oltre che con la denominazione del luogo di origine anche in continentali e marittime. Ciascun tipo fondamentale di massa d'aria si suddivide a sua volta, in base alle caratteristiche termodinamiche, in calda o fredda, a seconda che la sua temperatura sia più alta o più bassa di quella della superficie su cui venga a trovarsi. La classificazione delle masse d'aria in base al luogo di origine planetario prevede quattro grandi tipi fondamentali:

- Aria Artica;
- Aria Antartica;
- Aria Polare;
- Aria tropicale o subtropicale;
- Aria equatoriale.

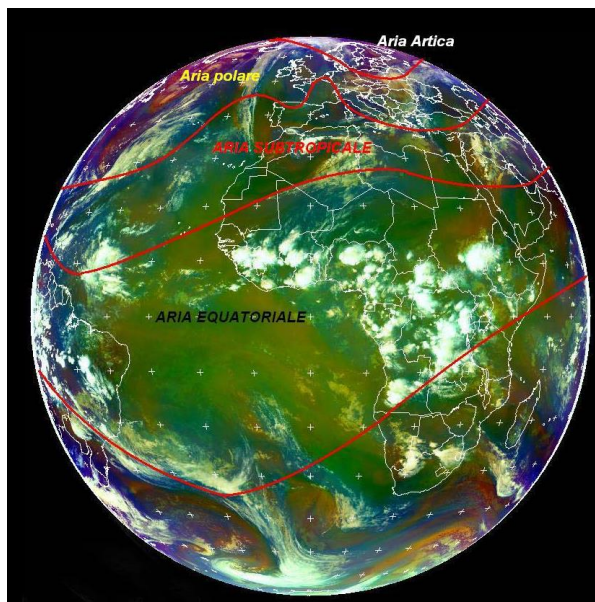


Figura 12-Distribuzione delle masse d'aria in base al luogo di origine

Le masse d'aria che più interessano le regioni italiane sono l'aria artica, l'aria polare (sia fredda che calda), l'aria subtropicale. Tali masse d'aria nel trasferirsi possono assumere almeno in parte le caratteristiche dei luoghi che oltrepassano, assumendo caratteri più marittimi o continentali.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche principali delle masse d'aria che possono interessare l'Italia e infine, alcune immagini esemplificative.

### **Aria artica marittima - mA**

La situazione barica favorevole all'afflusso di questa massa d'aria sull'Europa è la presenza di un anticiclone termico sulla Groenlandia o più frequentemente della spinta dinamica dell'anticiclone delle Azzorre verso le latitudini artiche dell'Oceano Atlantico.

*Luoghi di origine:* Groenlandia.

*Periodo di esistenza:* tutto l'anno tranne luglio e agosto.

*Spessore:* 3-6 km, quindi elevato con la possibilità di oltrepassare le Alpi.

*Caratteristiche fisiche:* fredda, umida ed instabile.

*Venti sull'Italia:* Maestrale, Tramontana, Bora e Föhn.

Questa massa d'aria, dato il suo notevole spessore, attraversa sovente le Alpi manifestandosi con venti di caduta; se non riesce a superare la catena alpina la raggiunge, irrompendo dalla porta del Rodano (depressione su Golfo di Genova, Costa Azzurra, Golfo del Leone) e talvolta dalla porta di Trieste (depressione su Adriatico).

### **Aria artica continentale - mC**

Si forma per l'accumulo al suolo di aria gelida tipico dell'anticiclone termico russo-siberiano ed in rare circostanze raggiunge le nostre regioni apportando memorabili ondate di freddo note come "Burian" o bufere di neve. Per tale ragione è nota come la massa d'aria più fredda in assoluto che possa interessare la nostra penisola.

La colata gelida riesce a raggiungere in pieno l'Italia quando il suddetto anticiclone espande un promontorio fino ai Balcani, concomitante all'approfondimento di una depressione sul Mediterraneo centrale o centro-occidentale.

*Luoghi di origine:* Mare di Barents, Russia Settentrionale, Siberia.

*Periodo di esistenza:* da fine ottobre ad inizio aprile.

*Spessore:* limitato a 2-3 km.

*Caratteristiche fisiche:* più fredda e più secca rispetto alla mA, piuttosto instabile.

*Venti sull'Italia:* Tramontana, Bora, Grecale.

Questa massa d'aria di esiguo spessore è caratterizzata da un raffreddamento limitato agli strati più bassi della troposfera.

### **Aria polare fredda marittima - mPk**

Il suo afflusso è collegato all'anticiclone dinamico situato in pieno Atlantico ad occidente delle Isole Britanniche e corrisponde al settore freddo dell'ondulazione del fronte polare: per questa ragione è la più comune massa d'aria che segue il fronte freddo annesso ad una depressione delle medie

latitudini. Può percorrere molta strada provenendo addirittura da oltreoceano.

*Luoghi di origine:* Atlantico settentrionale, Labrador, Terranova e Canada.

*Periodo di esistenza:* tutto l'anno.

*Spessore:* 3-6 km, quindi elevato con la possibilità di oltrepassare le Alpi.

*Caratteristiche fisiche:* fresca con diminuzione della temperatura più avvertibile in estate al passaggio di un fronte freddo; contrariamente in inverno riesce a rimuovere lo strato di inversione al suolo, apportando un lieve aumento della temperatura. E' una massa d'aria piuttosto umida e generalmente instabile.

*Venti sull' Italia:* Maestrale, Föhn

Questa massa d'aria, dato il suo notevole spessore, può attraversare le Alpi manifestandosi con venti di caduta post-frontali o non di rado, nelle opportune configurazioni bariche, entrare dalla porta del Rodano, scavando una depressione sul Golfo di Genova o sul Golfo del Leone.

### **Aria polare fredda continentale - cPk**

I suoi luoghi di origine sono gli estesi anticicloni termici invernali della Russia e dell'Europa centro-orientale. Questi anticicloni hanno generalmente una lunga durata e si rigenerano continuamente per l'afflusso in quelle regioni di aria artica, che con il passare del tempo crea una solida inversione termica al suolo.

*Luoghi di origine:* Russia meridionale, Balcani, Europa centro-orientale.

*Periodo di esistenza:* inverno.

*Spessore:* esiguo, limitato ad 1-1,5 km.

*Caratteristiche fisiche:* fredda nei bassi strati, caratterizzata da molte inversioni termiche; nel raggiungere le nostre regioni attraversa il mare Adriatico arricchendosi di umidità.

*Venti sull' Italia:* Bora, Grecale.

Questa massa d'aria tipicamente invernale raggiunge l'Italia provenendo dai Balcani in concomitanza con l'approfondimento di una depressione sul Mediterraneo centro-occidentale. Può presentare inversioni termiche in quota riconoscibili da nuvolosità irregolare strato cumuliforme come inversioni termiche al suolo: in questo ultimo caso forma uno strato freddo al suolo (cuscinetto) sul quale può scorrere un flusso più mite senza che esso venga rimosso.

### **Aria polare calda marittima - mPw**

Si forma in corrispondenza del settore caldo di un'ondulazione del fronte polare, spesso in prossimità del margine settentrionale dell'anticiclone delle Azzorre. In alcuni casi origina dalla trasformazione di mPk che ha sostato a lungo su latitudini intermedie dell'Oceano Atlantico in prossimità di un campo di alta pressione. Per tali ragioni questa massa d'aria si presenta in inverno nel settore caldo particolarmente sviluppato di un ciclone extratropicale.

*Luoghi di origine:* Atlantico tra i 40°-50° di latitudine.

*Periodo di esistenza:* inverno.

*Spessore:* limitato ad 1-2 km.

*Caratteristiche fisiche:* fresca in estate, mite in inverno; si presenta molto umida e non particolarmente instabile.

*Venti sull' Italia:* Ponente, Libeccio.

In genere questa massa d'aria interessa l'Europa centrale quando vi è un intenso flusso ondulato atlantico con veloci treni perturbati: l'Italia ne è interessata a fasi alterne quando tale flusso si abbassa di latitudine.

### **Aria polare calda continentale - cPw**

E' una massa d'aria tipicamente estiva che si forma negli anticicloni di scarso rilievo barico e non persistenti sui continenti dell'Europa sud-orientale per surriscaldamento radiativo del continente o per trasformazione di una preesistente massa d'aria fredda di natura post-frontale.

*Luoghi di origine:* Russia Meridionale, Balcani, Turchia.

*Periodo di esistenza:* estate.

*Spessore:* limitato ad 1-2 km.

*Caratteristiche fisiche:* si riscalda dal basso per irraggiamento; in origine è secca, ma potenzialmente instabile.

*Venti sull' Italia:* Levante.

Questa massa d'aria raggiunge raramente l'Italia; i suoi caratteri di potenziale instabilità si accentuano quando nell'attraversare il mare Adriatico raccoglie umidità nei suoi bassi strati. Per tale ragione può dare luogo a locali ed isolati episodi temporaleschi.

### **Aria tropicale marittima - mT**

Il suo luogo di produzione è il bordo sudoccidentale dell'anticiclone delle Azzorre; giunge sul Mediterraneo con un flusso attraverso Gibilterra o Marocco. Per tale ragione è spesso foriera di piogge. Questa massa d'aria raramente raggiunge l'Europa centrale.

*Luoghi di origine:* Atlantico tra i 30°- 40° di latitudine, Azzorre, Canarie.

*Periodo di esistenza:* tutto l'anno.

*Spessore:* elevato fino ai limiti superiori della troposfera.

*Caratteristiche fisiche:* calda; molto umida; elevata umidità specifica distribuita su tutta la colonna d'aria, originariamente piuttosto stabile.

*Venti sull' Italia:* Libeccio.

Questa massa d'aria costituisce un enorme serbatoio di calore latente disponibile ad eventuali inneschi dinamici nella formazione di importanti sistemi temporaleschi (estate) e vigorose

depressioni mediterranee (inverno). I valori di acqua precipitabile in questa massa d'aria sono davvero notevoli.

### **Aria tropicale continentale - cT**

Questa massa d'aria risale dal bordo occidentale di anticicloni dinamici subtropicali, per cui origina dal Nord Africa, dall'Asia Minore e dall'Europa sud-orientale. Questa massa d'aria è annessa alle spinte dinamiche alto pressorie subtropicali per cui può giungere sull'Italia con un'azione anticiclonica che la rende per subsidenza ancora più calda e più secca (caldo torrido estivo); nel semestre freddo tende invece ad assomigliare alla mT in quanto particolarmente arricchita di vapore acqueo raccolto durante il suo lungo tragitto sul Mediterraneo. E' considerata in assoluto la massa d'aria più calda che possa raggiungere l'Italia.

*Luoghi di origine:* Marocco, Algeria, Tunisia, Libia, Egitto; in rare occasioni Asia Minore, Europa sud-orientale.

*Periodo di esistenza:* tutto l'anno.

*Spessore:* elevato fino ai limiti superiori della troposfera.

*Caratteristiche fisiche:* molto calda in tutte le stagioni, alquanto umida specie se legata a condizioni cicloniche; potenzialmente instabile.

*Venti sull' Italia:* Scirocco.

Questa massa d'aria, ad eccezione del periodo estivo in cui è legata al dominio anticiclonico subtropicale, raggiunge le nostre regioni quando l'alta pressione dinamica risale dal Nord Africa o dall'Asia Minore in concomitanza ad una depressione sul Mediterraneo centrale. È associata a lunghi e pesanti episodi di maltempo, responsabile di alcune alluvioni autunnali. Il suo arrivo è preannunciato da un innalzamento consistente della temperatura e da precipitazioni colorate, dato che è in grado di trasportare particelle di sabbia proveniente dal deserto del Sahara.

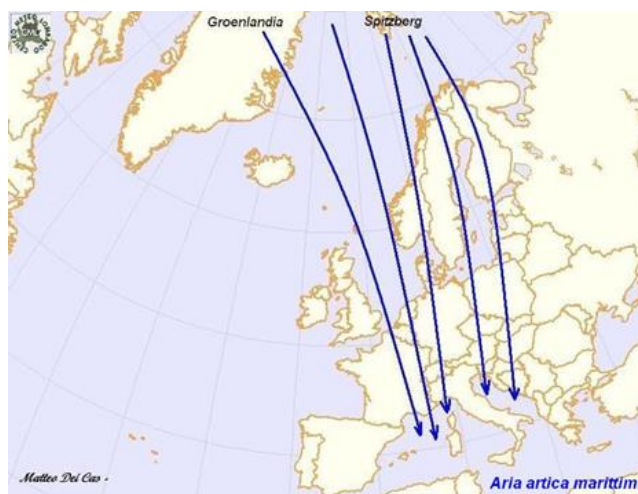


Figura 13-Aria Artica marittima





Figura 14-Aria Artica continentale



Figura 15-Aria Polare calda marittima



Figura 16-Aria Polare calda continentale

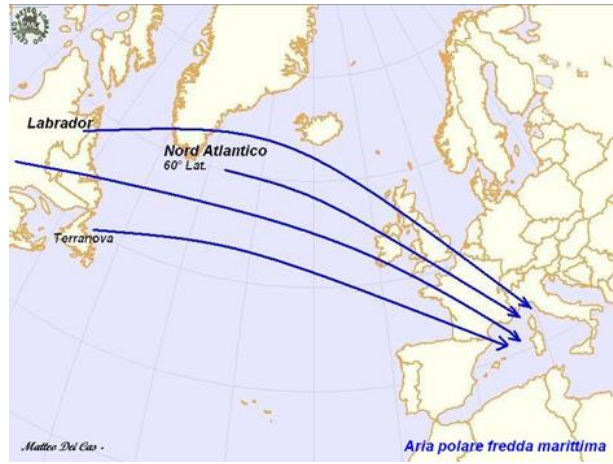


Figura 17-Aria Polare fredda marittima

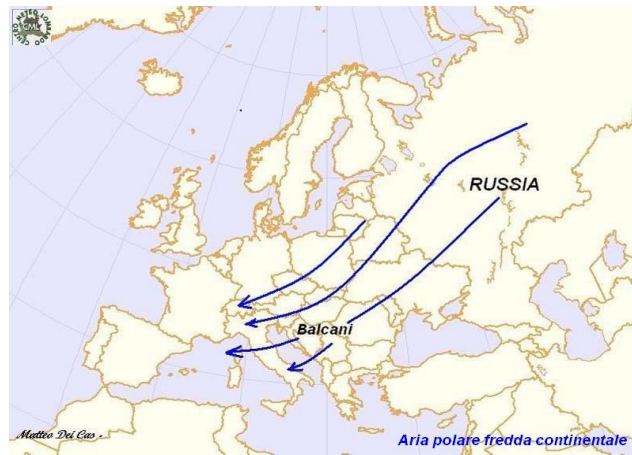


Figura 18-Aria Polare fredda continentale

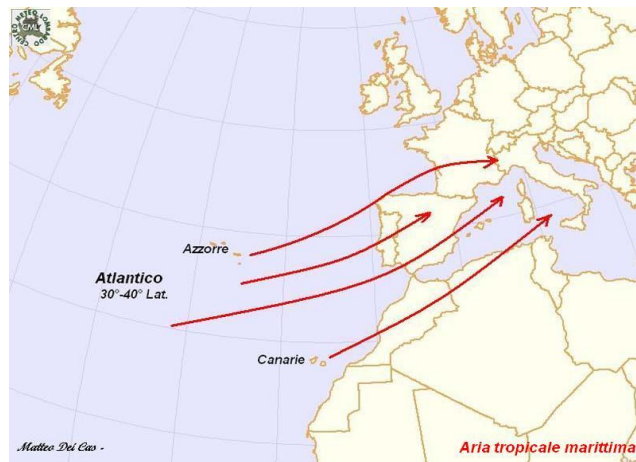


Figura 20-Aria Tropicale marittima



Figura 21-Aria Tropicale continentale

## 2.5 I VENTI CHE INTERESSANO L'ITALIA



Figura 22-Venti sull'Italia

In questo paragrafo si vuole presentare in sintesi quelli che sono i principali venti che interessano la nostra Penisola.

### **MAESTRALE**

Vento freddo che proviene dalla Francia e soffia da nord-ovest sul Mar Ligure.

### **BORA**

Vento freddo e secco, soffia dalle regioni dell'Europa centro-orientale verso l'Alto Adriatico (in particolare Trieste), dove raggiunge notevoli velocità (fino a 130 km/h).

**TRAMONTANA**

Vento freddo che, soprattutto in inverno, spira da nord su quasi tutte le regioni italiane.

**FOHN**

Vento tiepido e secco che interessa le regioni della Pianura Padana, proveniente dall'Europa, dovuto alla perdita di umidità delle masse d'aria quando attraversano le Alpi.

**GRECALE**

Vento invernale che spira da nord-est sulle regioni dell'Italia meridionale che si affacciano sul Mar Ionio.

**SCIROCCO**

Vento proveniente dal Sahara, si carica di umidità sul Mediterraneo e giunge sulle nostre regioni portando la pioggia.

**LIBECCIO**

Vento che soffia da sud-ovest sul Mar Tirreno e porta di solito temporali e burrasche sia in estate che in inverno.

### **CAP. 3 CLIMATOLOGIA DELLA VAL PADANA**

All'interno del seguente capitolo vengono introdotti i concetti generali relativi alla climatologia della Val padana e della città di interesse per questo studio, Milano.

#### **3.1 INQUADRAMENTO DELLA VAL PADANA**

La Val Padana è una regione geografica dell'Italia settentrionale che coincide con il bacino idrografico del fiume Po, nelle regioni di Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna e le contigue pianure del Veneto e del Friuli Venezia Giulia. La Val Padana costituisce un tutt'uno con la pianura veneta a nord-est e la piccola pianura romagnola a sud est, entrambe di origine alluvionale. La superficie occupata dalla Val Padana è di circa 46000km<sup>2</sup>, limitata a nord e ad ovest dalla catena montuosa delle Alpi, a sud da quella degli Appennini e ad est dal mare Adriatico. La Pianura Padana è quasi totalmente coltivata e lascia dunque spazi irrilevanti a boschi e ad altri ambienti naturali. La Val Padana comprende tre zone con differenti caratteristiche:

- Alta pianura o pianura asciutta. Si stende ai piedi delle Prealpi e del pedemonte degli Appennini. Il suolo è permeabile, composto da sabbie e ghiaie e non riesce a trattenere l'acqua piovana, che quindi penetra per decine di metri sotto la superficie fino a incontrare uno strato di materiale impermeabile. Sulle rocce impermeabili l'acqua scorre fino al punto in cui ha la possibilità di riaffiorare dalla falda freatica, dando origine a fontanili e risorgive.
- Bassa pianura o pianura irrigua. Inizia in corrispondenza della linea delle risorgive ed è costituita da suoli fini come le argille, impermeabili o poco permeabili, dove le acque ristagnano originando con facilità paludi o acquitrini. Qui la falda freatica raggiunge quasi il suolo.
- Media pianura. La media pianura presenta caratteristiche intermedie alle due precedenti.



Figura 23-Val Padana

## **3.2 CARATTERISTICHE CLIMATOLOGICHE DELLA VAL PADANA**

Il clima di un territorio deriva da un insieme di fattori legati a diverse scale geografiche che ne influenzano le caratteristiche e le peculiarità a livello della macroscale, della mesoscale e della microscale. Il clima della Pianura Padana può essere descritto in base ad una serie di fattori:

- Circolazione delle masse d'aria: perturbazioni, ingresso di aria polare siberiana, etc.;
- Parametri meteorologici: temperatura, umidità, pressione, etc.;
- Fenomeni atmosferici: trombe d'aria, Fohn, fulminazioni e fenomeni ceraunici, nebbie e foschie, temporali con precipitazioni sia acquee che grandinogene;
- Fattori geografici: latitudine, vegetazione, acque continentali, presenza dei rilievi, etc.

### **3.2.1 MACROSCALA**

Il bacino padano, situato a circa quarantacinque gradi nord e dieci gradi est di longitudine, è interessante da un clima di tipo temperato continentale. I principali fattori che condizionano il clima europeo delle medie latitudini alla macroscale sono i seguenti:

- La posizione di transizione della valle tra l'area continentale centro-europea e quella mediterranea;
- La presenza di tre centri barici importanti, tra cui due centri ad alta pressione quali l'Anticiclone delle Azzorre (permanente) e l'Anticiclone Russo-Siberiano (semipermanente o stagionale) ed un centro di bassa pressione rappresentato dalla Depressione d'Islanda (permanente);
- La circolazione delle masse d'aria, tipicamente nord-occidentali, o circolazioni retrograde, come quella da nord-est, da sud-est o sud-ovest che si muovono in direzione opposta alla rotazione terrestre. Quando queste masse d'aria si muovono in direzione dell'Europa mediterranea, qualunque sia la provenienza, tendono a contaminarsi, variando il loro contenuto in umidità relativa e modificando, almeno parzialmente, le caratteristiche termiche;
- Le perturbazioni mobili trasportate dai venti occidentali;
- La vicinanza del Mar mediterraneo e con i deserti del Sahara e siriano-giordano.

Per via di tutti questi fattori il clima della Val Padana risulta essere contraddistinto da molte sfumature che non riescono ad essere descritte in modo soddisfacente dai grandi sistemi di classificazione. A livello macroscopico il clima della Val Padana è caratterizzato da quattro stagioni. Durante le due stagioni invernale ed estiva si hanno due solstizi, quando il Sole raggiunge, nel suo apparente lungo l'eclittica, il punto di declinazione massima (in estate) e minima (in inverno). Il circolo di illuminazione viene a trovarsi alla massima distanza dai Poli così che, all'equatore, la durata del dì e

della notte risulti pari a dodici ore. Nelle altre due stagioni invece si verificano gli equinozi, quando il Sole si posiziona allo Zenith dell'equatore. Il circolo di illuminazione passa per entrambi i Poli, così che in questi due giorni la durata del dì e della notte coincidono per tutti i punti della Terra.

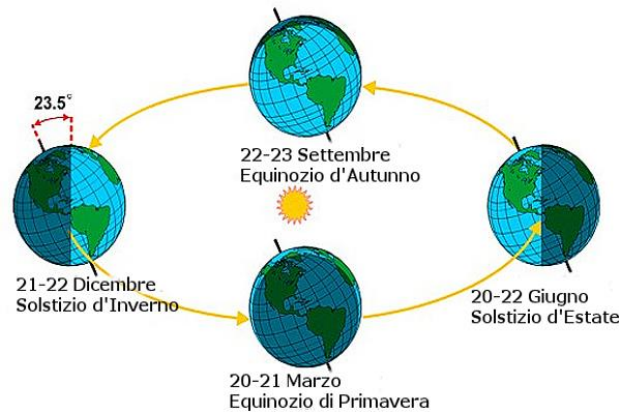


Figura 24-Solstizi ed Equinozi

I tre centri barici che interessano l'Europa fanno sì che durante l'anno si abbiano le due stagioni di inverno ed estate prevalentemente caratterizzate da alta pressione e caratteristiche termiche opposte e le altre due stagioni di primavera ed autunno con alternanza di alte e basse pressioni. In particolare si può affermare che:

- Nella stagione invernale sono presenti tutti e tre i centri barici: l'Anticiclone Russo migra verso ovest, mentre il ciclone di Islanda e l'Anticiclone delle Azzorre permangono invariati. Questa condizione fa sì che si crei un campo d'alte pressioni e che generalmente non piova;
- Nella stagione primaverile invece l'Anticiclone Russo è in dissolvimento mentre l'Anticiclone delle Azzorre migra verso nord, senza interessare però il Nord Italia che rimane soggetto alle precipitazioni nordatlantiche causate dalla Depressione d'Islanda;
- La stagione estiva risulta interessata solo dal Ciclone Islandese e dall'Anticiclone delle Azzorre, il quale migra verso nord cedendo l'alta pressione. Questo causa situazioni di ingresso d'aria da nord che portano alla nascita di fenomeni convettivi o precipitativi piuttosto rari;
- Infine in autunno l'Anticiclone Russo è in fase di formazione mentre l'Anticiclone delle Azzorre migra verso sud, lasciando campo libero alla Depressione Islandese che porta con sé consistenti precipitazioni.

### 3.2.2 MESOSCALA

A livello regionale le catene montuose delle Alpi e degli Appennini costituiscono una barriera quasi insormontabile per le masse d'aria provenienti da occidente e da nord e fanno sì che la Pianura Padana

assuma la caratteristica conformazione a “conca”, favorendo un notevole ristagno d’aria sia in inverno che in estate e, conseguentemente di inquinanti.

In particolare in inverno si forma un cuscinetto freddo con scarsità di vento che può perdurare per diversi giorni, specie in quelli umidi e nebbiosi, causando gelo intenso. Può succedere però che vi siano giornate rigide ma più secche poiché entra un vento foriero di perturbazioni fredde, provenienti dalle zone polari, che possono portare forte maltempo con temperature basse e neve: queste perturbazioni entrano sulla pianura da nord est (Porta di Bora) e da nord ovest (valle del Rodano). In rare occasioni anche il Buran, vento orientale di origine russa, riesce a raggiungere il bacino padano, sferzandolo con raffiche intense e forti precipitazioni. Per contro nelle zone a piedi delle Alpi possono soffiare venti di caduta che oltre a rendere il ciclo limpidissimo portano giornate decisamente miti anche in pieno gennaio.

In estate invece il cuscinetto della pianura porta ad un forte ristagno di aria calda e molto umida che produce temperature e connessi valori di umidità molto elevati, che generano giornate molto calde ed afose, specialmente in presenza dell’Anticiclone Africano. La forte umidità tende a scaricarsi sotto forma di violenti temporali e grandinate.

La scarsa distanza dal mare influisce principalmente sui fenomeni nevosi, rari e più o meno isolati, facendo sì che non esista una vera e propria stagione nevosa. Infine, l’elevata presenza di acque continentali, sia correnti che stagnanti, porta ad avere terreni molto umidi.

Il bacino padano è dunque interessato dalle seguenti masse d’aria:

- Massa d’aria artica continentale: si origina nel mare di Barents e nelle zone della Siberia prossime alla calotta polare ed arriva in Italia attraverso la “Porta della Bora”, convogliata dall’anticiclone Russo che, nella stagione invernale, si estende fino alle coste dalmate. L’aria artica continentale è accompagnata da venti nord-orientali di particolare intensità nel Golfo di Trieste e sull’alto Adriatico (bora chiara). Durante queste irruzioni il cielo si presenta sereno, l’atmosfera è limpida, la temperatura si abbassa e l’umidità è scarsa.
- Massa d’aria polare fredda marittima: proviene dall’Atlantico settentrionale ed è convogliata verso le coste europee e la penisola italiana dall’azione congiunta di un anticiclone posizionato sull’Atlantico settentrionale e di una profonda depressione estesa fra il Mediterraneo occidentale, la Francia e le isole britanniche. Giunge nel Mediterraneo attraverso la valle del Rodano ed i Pirenei dando luogo a venti di forte maestrale anche sui bacini italiani. L’arrivo di questa massa d’aria è accompagnato da un forte calo della temperatura e da un brusco aumento della pressione atmosferica. L’aria polare fredda marittima è la principale causa delle depressioni del Mediterraneo occidentale che provocano un maltempo generalizzato sulle



regioni italiane. La parte più orientale di tale flusso nel tentativo di aggirare le Alpi è costretta a scorrere verso est attraverso le Alpi Carniche, fino a sfociare con violenza nel Mar Adriatico (bora scura) richiamata dalla depressione esistente sul Mar Tirreno.

Nei mesi estivi l'aria polare marittima non riesce a raggiungere il Mediterraneo, poiché protetto dall'Anticiclone delle Azzorre, ma lambisce marginalmente le regioni alpine e quelle settentrionali della nostra penisola, provocando temporali nelle ore pomeridiane.

- Massa d'aria polare fredda continentale: si origina nelle zone occupate dall'Anticiclone Russo e giunge in Italia quando il bordo occidentale dell'anticiclone si estende fino all'Europa centrale ed ai Balcani. Tipica della stagione invernale, questa massa d'aria giunge sulla penisola italiana attraverso le Alpi Carniche ed Illiriche per poi sfociare sull'Adriatico settentrionale, accompagnata da forti venti da est o nord-est, cielo terso e scarsi fenomeni piovosi.

### **3.2.2.1 SINTESI ALLA MESOSCALA DEL CLIMA DELLA VAL PADANA**

A livello stagionale la conformazione del complesso alpino-appenninico protegge la pianura dalle perturbazioni e dai venti, limitando la circolazione delle masse d'aria e generando una anomalia termica positiva che porta ad un clima più caldo sia in inverno che in estate. Questo fattore, unito all'alto tenore di umidità dei terreni padani, fa sì che la Val Padana sia caratterizzata da un clima caldo e umido, con ampia escursione termica annuale con temperature medie abbastanza basse in inverno ed alte in estate. La piovosità è concentrata principalmente nei mesi primaverili ed autunnali, ma nelle estati calde e umide sono molto frequenti i temporali. Possiamo quindi definire il clima della Val Padana come semicontinentale temperato umido, con caratteristiche di continentalità più marcate rispetto al resto d'Italia, in quanto zona di transizione tra il tipico clima mediterraneo a sud e quello oceanico o marittimo temperato a nord, nord-ovest. Il complesso quadro climatico fino ad ora descritto fa sì che l'anno sia caratterizzato dai seguenti tratti distintivi:

- Due stagioni di ristagno, l'inverno e l'estate, in cui le precipitazioni sono deboli o assenti;
- Due stagioni con aumento progressivo di circolazione, entrambe piovose, una moderatamente calda che rende possibile il processo convettivo ed una moderatamente fredda con un trend negativo di temperature;
- La presenza di condizioni di persistenza piuttosto che di variabilità, a causa della presenza dei rilievi e della collocazione geografica alle medie latitudini. Le Alpi fanno sì che le depressioni possano raggiungere il Nord Italia da sud-ovest e sud-est e solo raramente da settentrione;
- La prevalenza di tempo sereno piuttosto che nuvoloso;

- Una media di giorni piovosi all'anno che si aggira attorno agli ottanta/novanta giorni;
- La presenza di fenomeno stagionali ricorrenti, quali la nebbia ed il Fohn nella stagione fredda e caldo afoso nella stagione calda.

<b>Stagioni</b>	<b>Caratteristiche principali</b>	<b>Fenomeni</b>
<i>Estate</i>	Calda, afosa, elevata umidità Precipitazioni rare ed intense	- Caldo afoso - Ristagno di aria ed inquinanti
<i>Inverno</i>	Freddo e rigido Precipitazione debole	- Fohn - Nebbia - Ristagno di aria ed inquinanti
<i>Primavera</i>	Moderatamente calda Precipitazione abbondante	- Alternanza di alte e basse pressioni - Aumento della circolazione ventosa - Inizio processi convettivi
<i>Autunno</i>	Moderatamente fredda Precipitazione abbondante	- Alternanza di alte e basse pressioni - Aumento della circolazione ventosa

Tabella 3-Stagioni e fenomeni distintivi

<b>Precipitazioni in Italia</b>				
	<i>Inverno</i>	<i>Primavera</i>	<i>Estate</i>	<i>Autunno</i>
<i>Nord</i>	Assenza di pioggia	Presenza di pioggia	Prevalenza di non pioggia	Presenza di pioggia
<i>Centro</i>	Prevalenza di non pioggia	Prevalenza di non pioggia	Assenza di pioggia	Presenza di pioggia
<i>Sud</i>	Presenza di pioggia	Assenza di pioggia	Assenza di pioggia	Presenza di pioggia

Tabella 4-Precipitazioni in Italia

### **3.2.3 FENOMENI RICORRENTI ALLA MESOSCALA**

#### **3.2.3.1 I VENTI NELLA VAL PADANA**

La circolazione dei venti nella Val Padana è prevalentemente debole, caratterizzata dalla mancanza dei venti sinottici al livello del suolo, e questo effetto è determinato sia dalla conformazione della valle, sia dalla vicinanza delle Alpi. Prendendo come riferimento il fiume Po, si può constatare che a nord di esso i settori interessati sono rispettivamente quelli da nord durante la notte e da sud durante il giorno, mentre a sud del fiume l'andamento si inverte e presenta un massimo notturno che arriva da sud-ovest ed un massimo pomeridiano che arriva da nord-est. L'effetto della circolazione di brezza è rilevabile solo al suolo, poiché a quote più alte la corrente di ritorno ha valori trascurabili rispetto

all'intensità del vento sinottico e comunque si esaurisce entro i primi mille metri dal suolo. Il flusso laminare delle brezze notturne converge verso la bassa pianura, dove si accumula e si raffredda fino alla saturazione uno strato di aria umida dello spessore di circa duecento metri. Questo fenomeno spiega l'elevata frequenza e persistenza delle nebbie della Val Padana. La distribuzione anemologica compresa tra il suolo ed i primi mille metri è molto variabile anche se è orientata verso una prevalente presenza di venti occidentali. Nella zona pedemontana nord è molto frequente il Fohn, vento caldo e asciutto tipico della stagione fredda, che scende a raffiche intermittenti dai crinali alpini e s'incanala lungo le valli. I casi con velocità del vento molto elevate sono rare, in media otto/dodici giorni l'anno, anche se quando insorgono sono molto intensi.

Un'altra caratteristica peculiare dell'area in esame è il disaccoppiamento che si verifica tra le circolazioni negli strati prossimi al suolo e quelli superiori dell'atmosfera; tale evento è qui amplificato dalla presenza della barriera alpina, che interferisce con la debole circolazione dei venti sinottici.

La velocità del vento varia in modo sensibile con la quota. Infatti quando la velocità del vento al suolo raggiunge il minimo valore (uno/due metri al secondo), a causa dell'inversione termica si sviluppa una struttura dinamicamente e termodinamicamente non stazionaria, che porta ad un disaccoppiamento dei flussi a differenti altezze. Questo fenomeno prende il nome di "Wind shear" e produce ampie variazioni di direzione e velocità dei venti con la quota. La variabilità del vento con la quota può essere sinteticamente descritta come segue:

- Le calme, che rappresentano in un anno al suolo quasi il cinquanta per cento dei casi, concentrate nelle stagioni estreme, a cento metri raggiungono appena il dieci per cento dei casi;
- Da mille a tremila metri prevalgono correnti nord-occidentali in inverno e sud-occidentali in estate. I venti molto forti rappresentano il venti per cento dei casi e si verificano in inverno.

Questo andamento è accentuato anche dall'orografia e dalle brezze: l'incanalamento forzato determinato dalla presenza dei rilievi alpini e appenninici determina un incremento di velocità nello strato atmosferico compreso tra il suolo e l'altezza media dei rilievi. I venti di brezza a loro volta raggiungono la massima intensità nei primi duecento/cinquecento metri, favorendo un rafforzamento della circolazione.

Per quanto concerne la variazione giornaliera della direzione media del vento, in tutti i mesi dell'anno questo subisce negli strati prossimi al suolo una rotazione oraria nelle ore diurne rispetto alle ore notturne, così che le correnti, generalmente settentrionali nelle ore notturne, divengano meridionali nelle ore diurne.

### 3.2.3.2 FÖHN

Il Föhn è un fenomeno di particolare interesse per l'Italia settentrionale. Questo è un vento di caduta caldo e secco che si sviluppa ogni volta che un flusso d'aria, esteso alle arie quote, è costretto a scavalcare una catena montuosa posta lungo la sua traiettoria. Prende origine lungo il versante sopravento di una catena montuosa. In particolare quando una massa di aria umida incontra un rilievo, viene costretta a salire per superarla; durante la salita la massa si raffredda e raggiunta adiabaticamente la saturazione, se vi è sufficiente umidità, condensa con la conseguente formazione di nubi, che si ammassano sul versante di sopravento. Questo fenomeno prende il nome di Stau (sbarramento) ed è l'esatto opposto del Föhn. La ricaduta sul versante di sottovento può svilupparsi in due differenti modi:

- Ricadendo l'aria si riscalda sul versante di sottovento, si comprime e torna alle condizioni di partenza; tale situazione avviene quando buona parte dell'umidità contenuta nella massa d'aria non viene persa nella risalita;
- Se invece la condensazione del vapore d'acqua genera delle precipitazioni nel versante di sopravento, allora non si ritorna più nelle condizioni iniziali e l'aria arriva a valle con una temperatura più alta di quella di partenza nell'altro versante, dando origine al "favonio".

Durante la discesa l'aria tende a deumidificarsi a causa della compressione adiabatica, diventando calda e secca una volta raggiunto il fondovalle o la pianura sottostante.

Il Föhn è un fenomeno che può avvenire in due direzioni opposte: sud-nord e nord-sud. Nel primo caso, il Föhn soffia sul versante settentrionale delle Alpi nelle valli svizzere e austriche e si verifica quando l'Europa nord-occidentale è interessata da basse pressioni mentre in Italia settentrionale c'è un regime di alte pressioni. Nel secondo caso il favonio proviene da nord ed interessa anche la Pianura Padana. Questo in particolare si attiva quando un fronte freddo o un intenso flusso nord-occidentale o settentrionale, di provenienza nord atlantica o artica, è costretto a valicare l'arco alpino a seguito dell'affondo di un'ampia saccatura o di un'estensione lungo i meridiani dell'Anticiclone delle Azzorre verso le latitudini artiche o verso la Groenlandia, per poi riversarsi sul bacino centrale del mar Mediterraneo, sia attraverso la Porta della Bora che la Valle del Rodano.

È possibile riassumere quanto detto dicendo che l'aria fredda dopo aver scaricato gran parte dell'umidità durante la salita forzata sul versante francese e svizzero (dove si attiva il fenomeno dello Stau citato precedentemente), scende dai declivi alpini verso il versante italiano, riscaldandosi di circa un grado ogni cento metri. Scendendo velocemente dalle vette alpine la corrente d'aria per compressione adiabatica si comprime e raggiunge le vallate e le pianure sottostanti come un vento piuttosto tiepido e secco, che dissolve la nuvolosità e le nebbie rendendo i cieli in genere sereni o

poco nuvolosi, con un'atmosfera limpida e ottima visibilità orizzontale, dovuta al rimescolamento di aria dei bassi strati.

I venti del Föhn giungono quindi sull'alta Lombardia abbassando l'umidità e dissolvendo le foschie e le nebbie dominanti in tutta l'area padana occidentale. L'arrivo dei venti dal favonio è preannunciato dall'apertura di ampie schiarite che dalle Prealpi avanzano verso la pianura padana, accompagnate da un certo rialzo dei valori termici, anche durante le ore notturne nel cuore dell'inverno.

Il meccanismo di riscaldamento del Föhn risulta molto efficiente se la sua direzione di provenienza è nord-ovest e se il dislivello barico tra il versante sottovento e sopravvento è elevato ed in particolare sopra a quattordici hettopascal. Se quest'ultima condizione non si verifica, tipico delle estati, il favonio può non raggiungere il suolo. Se queste condizioni sono rispettate il riscaldamento del Föhn risulta molto efficace ed è quindi dato dall'insieme combinata di diversi fattori:

- Bassa umidità;
- Temperature elevate;
- Compressione adiabatica;
- Trasparenza elevata dell'aria;
- Attrito tra la massa d'aria e la superficie.

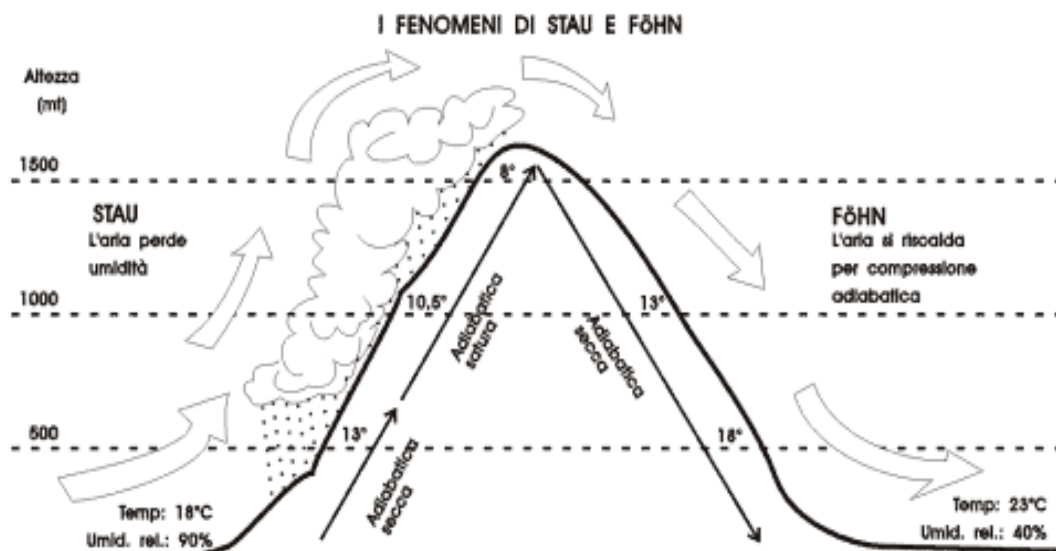


Figura 25-Fenomeni Föhn e Stau

### **3.2.3.3 LE NEBBIE**

Il bacino della Val Padana funge da serbatoio di inquinanti che giocano un ruolo fondamentale nella formazione della nebbia: le particelle di inquinanti costituiscono un supporto per la condensazione del vapore d'acqua nelle goccioline di nebbia, fenomeno che prende avvio quando lo strato di aria in prossimità del suolo diventa saturo. Maggiore è la concentrazione di inquinanti al suolo, maggiore sarà la durata e la frequenza delle nebbie. Il fenomeno della piana è inoltre accentuato dalle calme di vento che sono tipiche della pianura padana. Le nebbie più frequenti in Val Padana sono le nebbie da irraggiamento che sono provocate dalla condensazione del vapore d'acqua in prossimità del suolo a seguito del raffreddamento notturno del suolo stesso per perdita di calore: lo strato nebbioso che tipicamente si produce è dell'ordine dei cento/duecento metri. Tali nebbie hanno incidenza maggiore nel semestre ottobre-marzo e sono formate da elevata durata anche durante il giorno. Il loro dissolvimento è principalmente legato agli afflussi caldi e secchi del Föhn che interessano la Lombardia tipicamente nel periodo invernale.

### **3.2.3.4 LE PRECIPITAZIONI IN VAL PADANA**

La particolare conformazione della Val Padana influenza profondamente anche la distribuzione delle precipitazioni. L'arco alpino rappresenta un ostacolo importante per le correnti atmosferiche che provengono dai quadranti meridionali, che vengono convogliate, attraverso il golfo ligure, verso le regioni settentrionali italiane. Dopo il lungo tragitto sul mare le correnti sciroccali, cariche di umidità, si separano in due rami:

- Uno percorre con direttrice sud-est l'asse longitudinale della Val Padana
- L'altro investe con direttrice sud-ovest le Alpi Carniche e Giulie.

L'ascendenza forzata dovuta all'orografia determina il raffreddamento delle masse di aria fino alla condensazione delle notevoli quantità di vapore d'acqua ed influenza le precipitazioni fino a distanze di trenta/quaranta chilometri dai rilievi.

Nel periodo estivo le precipitazioni sulla regione sono legate essenzialmente ai temporali che si sviluppano quando l'aria più fredda, proveniente dal nord Europa, favorisce l'insorgere di moti convettivi all'interno delle calde e umide masse d'aria stagnanti in pianura. Il fenomeno è tipico delle ore più calde della giornata ed è molto frequente in prossimità dello sbocco delle grandi vallate alpine e sul Friuli, aree più facilmente interessate dagli afflussi di aria fredda. Tali temporali rappresentano per la loro elevata incidenza una peculiarità della Val Padana nel periodo estivo.

### **3.2.3.5 LE PRECIPITAZIONI NEVOSE IN VAL PADANA**

Le precipitazioni di carattere nevoso in Val Padana sono più rilevanti sul settore occidentale dove si ha un clima più continentale e l'orografia favorisce maggiormente il ristagno di aria fredda al suolo. Il settore orientale risulta invece meno nevoso, sia per l'influenza mitigatrice del Mar Adriatico, sia per la maggior esposizione ai venti caldi di Scirocco. Su tutta la regione risulta significativa la maggior nevosità delle zone pedemontane rispetto a quelle più distanti dai rilievi.

Le nevicite più abbondanti sulle Alpi si verificano proprio quando l'arrivo da sud di aria più calda e carica di umidità chiude un periodo freddo, mitigando le temperature che così salgono fino a valori prossimi allo zero. Se il freddo è stato sufficientemente intenso, tale da determinare valori al di sotto dello zero anche nelle zone pianeggianti, le nevicite possono raggiungere quote molto basse. È ciò che accade sul settore centro-occidentale della Pianura Padana, quando aria calda e umida proveniente dal Mediterraneo scivola su un cuscinetto di aria fredda precedentemente affluito ed intrappolato nei bassi strati della barriera delle Alpi e degli Appennini.

Può capitare che talvolta nevichi nonostante arrivi aria con temperature sotto zero, come nel caso in cui correnti di aria molto fredda sollevino bruscamente una massa di aria prossima alla saturazione e umida, portandola alla condensazione. Tale fenomeno, seppur raro, si può osservare in Val Padana quando aria fredda siberiana arriva sul Nord Italia proprio mentre in pianura ristagna aria molto umida o addirittura una coltre nebbiosa. Ma in questi casi le nevicite sono molto deboli, di breve durata e limitate solo alla pianura o alle basse pendici delle Prealpi.

### **3.2.4 MICROSCALA**

A livello della microscala vengono prese in considerazione le caratteristiche regionali del sito in esame che possono influenzarne il clima. Di seguito viene riportata un'analisi del clima della città di Milano.

#### **3.2.4.1 MILANO**

Milano copre una superficie di circa cento-ottantadue chilometri quadrati ed è situata a centoventidue metri sul livello del mare, ad occidente del bacino della Val Padana, nella media pianura, a 45°27'50'',98 N di latitudine e 9°11'25'',21 di longitudine. Tale posizione le conferisce un clima semicontinentale, secondo la classificazione dei climi di Köppen. È caratterizzata da un clima temperato-umido con estati molto calde ed afose, elevati tassi di umidità che ne accentuano la piovosità e risultano poco ventilate, ed inverni piuttosto rigidi. Pur trovandosi nell'area mediterranea, la relativa lontananza dal mare ne accentua il carattere continentale, che però non raggiunge gli

estremi tipici dell'Europa Centrale, per via della conformazione dei rilievi alpini. La continentalità del clima milanese si riscontra anche nelle accentuate escursioni termiche stagionali e diurne.

Le precipitazioni sono ben distribuite nell'arco dell'anno, con le massime riscontrabili nelle stagioni primaverile ed autunnale, cui segue l'estate. In inverno la precipitazione è minore e l'elevata umidità favorisce il fenomeno della nebbia, soprattutto nei quartieri meridionali della città. Come accennato precedentemente il fenomeno della nebbia è particolarmente accentuato dalla presenza di inquinanti, fortemente presenti nella città metropolitana. In particolare le precipitazioni medie annue sono di circa 983mm mediamente distribuite in 105 giorni, con un picco autunnale e primaverile, massimo secondario in estate e minimo invernale. Le precipitazioni nevose sono in diminuzione, poiché l'aumento delle temperature ha innalzato lo spessore medio dello strato di aria prossimo al suolo a temperatura positiva. La neve a Milano risulta in diminuzione ma di carattere straordinario quando di verifica.

L'alta densità abitativa (settemila-quattrocento-cinquanta abitanti per chilometro quadrato) contribuisce a creare un microclima interno alla città: l'isola di calore rende le temperature più elevate rispetto alle campagne circostanti. I quartieri centrali godono di minime lievemente maggiori rispetto alle periferie, che risentono invece dell'aria umida e fredda ristagnante nelle campagne. Le temperature minime in inverno nel centro della città risultano più alte che in periferia, mentre in estate questa differenza si attenua.

Conseguenza importante dell'aumento di calore è l'aumento della convettività, che porta a fenomeni temporaleschi e di grandine di una certa rilevanza. La latitudine di Milano non consente però la formazione di fenomeni temporaleschi auto innescanti.

Il clima di Milano è molto influenzato anche dal fenomeno della conurbazione: l'area metropolitana si estende dal confine alpino svizzero fino al Po, comprendendo le province di Monza e Brianza, Lecco, Bergamo, Como e Varese. Quest'area comprende numerosi corsi d'acqua, tra cui i principali sono Adda, Ticino, Po, Lambro, Seveso ed Olona. Di fondamentale importanza è la rete dei Navigli, tra cui il Naviglio Grande, il Naviglio Pavese ed il Canale Villoresi. Tuttavia questi corsi d'acqua non hanno una grande influenza sul clima della città, poiché gran parte di essi è inurbata nel sottosuolo. Al contrario la presenza del bacino artificiale dell'Idroscalo, nei pressi dell'aeroporto milanese di Linate, è da considerarsi una delle cause primarie nella formazione di nebbia nelle aree adiacenti.

Il clima milanese risulta anche molto influenzato dalle alterazioni antropiche, quali gli usi dei suoli e la forte presenza di inquinanti, che non verranno però approfonditi nel seguente elaborato.



## **CAP.4 DATI**

L'analisi dei dati è stata condotta in riferimento alla sola stazione di Milano-Linate.

I dati utilizzati consistono nella serie storica dei dati pluviometrici, relativi alla stazione di Milano, a partire dal 1984 fino al 2015. I dati raccolti sono riferiti ai contributi giornalieri di precipitazione e sono stati trattati in modo da eliminare le voci non disponibili o i dati non attendibili, che sono stati inseriti dopo aver confrontato i dati forniti da due archivi.

Gli archivi storici usati sono stati principalmente l'archivio di Arpa Lombardia e l'archivio Meteo Storico.

Al termine della prima parte di analisi si farà riferimento anche alla precipitazione cumulata storica nel periodo 1764-1983, presa dagli archivi dell'osservatorio di Brera. Tali dati verranno utilizzati per osservare alcune caratteristiche peculiari. Non è stato possibile usufruire anche per la serie 1984-2015 della serie dell'osservatorio di Brera poiché i dati non vengono resi disponibili in forma pubblica.

Dopo la validazione dei dati si è proseguito, nella prima parte di analisi, con il loro trattamento, attraverso operazioni statistiche di media, massimi, minimi e suddivisioni in classi pluviometriche.

I parametri considerati sono la precipitazione (mm) e il numero di giorni con precipitazione (/).

Ai dati di precipitazione è stata poi applicata un'analisi di regressione lineare ed il test di ipotesi basato sulla distribuzione F di Fisher, volto a verificare l'ipotesi che due popolazioni che seguono entrambe distribuzioni normali abbiano la stessa varianza.

Nella seconda fase di analisi i risultati ottenuti sul trimestre invernale sono stati approfonditi su tre anni campione, con il supporto delle mappe del geo-potenziale a 500 ed 850 (hPa), con le mappe di precipitazione (mm) e con le traiettorie delle circolazioni atmosferiche fornite dal programma Hi-split, al fine di identificare quali possano essere le circolazioni atmosferiche che hanno causato le anomalie individuate.

### **4.1 STAZIONE DI MISURA**

La stazione presa in esame per l'analisi dei dati nei diversi anni considerati è quella di Milano-Linate. La stazione di Milano-Linate è la stazione meteorologica di riferimento per il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare e per l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia, relativa alla città di Milano. A metà degli anni ottanta la stazione meteorologica presidiata è passata sotto la gestione dell'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo (ENAV). Attualmente la stazione meteorologica è automatica con rilevazioni che avvengono tramite schermo termometrico a 12 piatti.

La stazione meteorologica si trova in Lombardia, nel comune di Segrate, presso l'Aeroporto di Milano-Linate, a 103 metri s.l.m. ed alle coordinate geografiche 45°25'59.66"N , 9°16'56.24"E.

Oltre a rilevare i dati 24 ore su 24 di temperatura, precipitazioni, umidità relativa, eliofania, direzione e velocità del vento, è una delle sei stazioni del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare su un totale di otto stazioni italiane in cui vengono effettuate osservazioni in quota grazie ai radiosondaggi, con almeno due lanci di palloni sonda al giorno (alle ore 0 e alle ore 12 UTC).

I dati della stazione meteorologica a terra sono omologati dall'anno 1946.

## 4.2 ANALISI DEI DATI I

### 4.2.1 IDENTIFICAZIONE DELL'ANNO PLUVIOMETRICO MEDIO

L'analisi della precipitazione nel periodo 1984-1999 ha reso possibile assumerne i valori medi come valori medi storici, con cui confrontare la precipitazione del periodo 2000-2015, poiché hanno rispettato con buona precisione le caratteristiche teoriche del regime pluviometrico di Milano.

Le serie sono state assunte della stessa lunghezza temporale per poterle validamente confrontare.

La lunghezza di sedici anni è considerata sufficientemente omogenea per gli scopi dell'elaborato.

Dall'analisi dei valori cumulati di pioggia a livello annuale e stagionale della serie 1984-1999 si è riscontrato che questa ben rispetta il tipico regime pluviometrico della città di Milano.

La città, che si trova alle medie latitudini ( $43^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ), presenta un regime pluviometrico di tipo transizionale, ovvero in cui le due stagioni di massima precipitazione sono le due stagioni di transizione, l'autunno e la primavera. A seguito della primavera si ha l'estate, le cui piogge sono causate da celle convettive a carattere temporalesco. L'inverno è il minimo assoluto di precipitazione e si configura come una stagione fredda e prevalentemente secca.

Di seguito si riporta l'andamento della precipitazione media cumulata a Milano nel periodo 1984-1999.

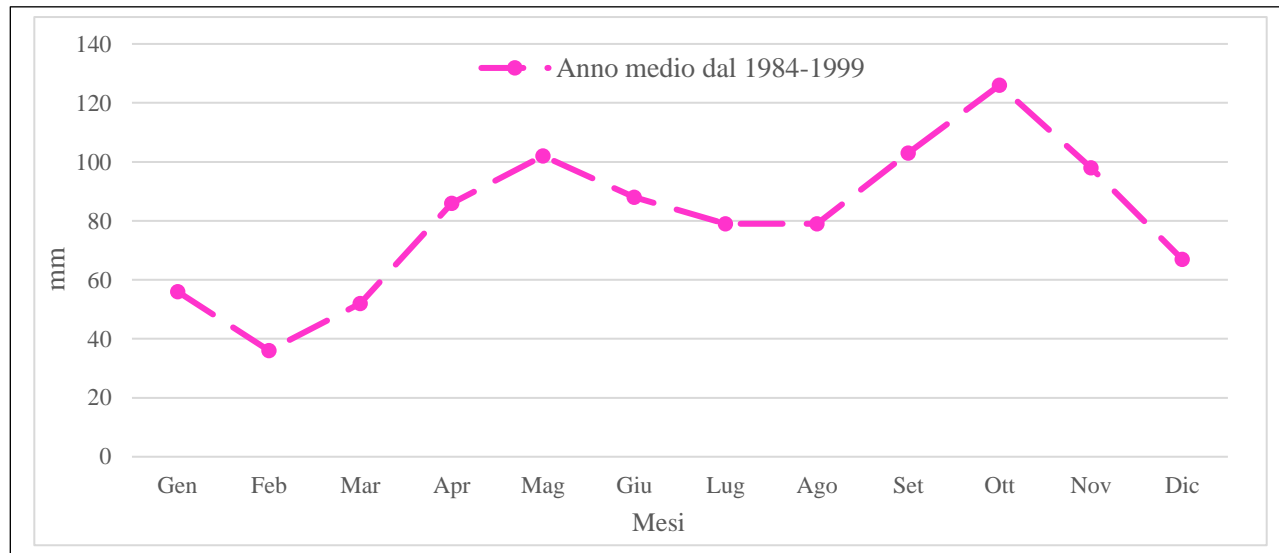


Figura 26-Precipitazione cumulata media, 1984-1999

I valori cumulati medi mensili sono stati calcolati dai valori grezzi proposti dagli archivi di Arpa Lombardia e dell'Archivio Meteo storico.

I valori cumulati giornalieri forniti dai due archivi coincidono.

Ai giorni in cui è stata rilevata una differenza millimetrica di precipitazione, tra i due database, è stato attribuito il valor medio dei due valori.

Le differenze millimetriche di precipitazione registrata sono da imputarsi alla diversa taratura degli strumenti usati per la misura ed al fatto che, ad oggi, gli archivi utilizzati non presentano analisi storica della precipitazione i cui valori possono dunque risultare poco accurati.

Dall'andamento qualitativo e quantitativo dell'anno medio si osserva che Milano dal 1984 al 1999 ha presentato un valore annuale medio di precipitazione pari a 972mm, la cui distribuzione mensile segue il regime teorico del clima semi-continentale della città.

I mesi di massima precipitazione sono ottobre e maggio, rispettivamente con 126mm e 102mm.

Il contributo stagionale è stato calcolato a partire dai valori mensili e considerando le stagioni come trimestri astronomici, facendo partire l'inverno dal mese di gennaio.

Anche il contributo stagionale conferma l'andamento pluviometrico teorico con un valore cumulato autunnale pari a 291mm ed uno primaverile pari a 276mm. Le due stagioni intermedie presentano anche il maggior numero di giorni piovosi, pari a 28 e 30 giorni nell'arco dell'anno.

In sintesi si conclude che nella città di Milano, nel periodo 1984-1999, ha piovuto con una frequenza media di 103 giorni all'anno ed un valore medio cumulato totale pari a 972mm.

Grazie al perfetto andamento pluviometrico in accordo con il regime teorico della città, identificato in questo lasso temporale, è stato possibile utilizzare tali valori come valori medi storici, con cui confrontare l'andamento pluviometrico nel periodo 2000-2015, al fine di identificarne eventuali affinità ed anomalie.

Mesi	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
<b>Medie mensili</b>	56	36	52	86	102	88	79	79	103	126	98	67	972

Tabella 5-Medie mensili della precipitazione cumulata a Milano nel periodo 1984-1999

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Tot.
<b>Medie stagionali</b>	144	276	261	291	972
<b>N. giorni piovosi medi</b>	21	30	24	28	103

Tabella 6-Medie stagionali e numero medio di giorni piovosi a Milano nel periodo 1984-1999

#### 4.2.2 ANALISI DELLA PRECIPITAZIONE ANNUALE NEL PERIODO 2000-2015

Si analizzano di seguito i contributi pluviometrici mensili, stagionali ed il numero di giorni piovosi in ogni anno della serie 2000-2015 per rintracciare quali siano state le analogie e le anomalie della precipitazione rispetto ai valori medi della serie 1984-1999.

##### 4.2.2.1 ANNO: 2000

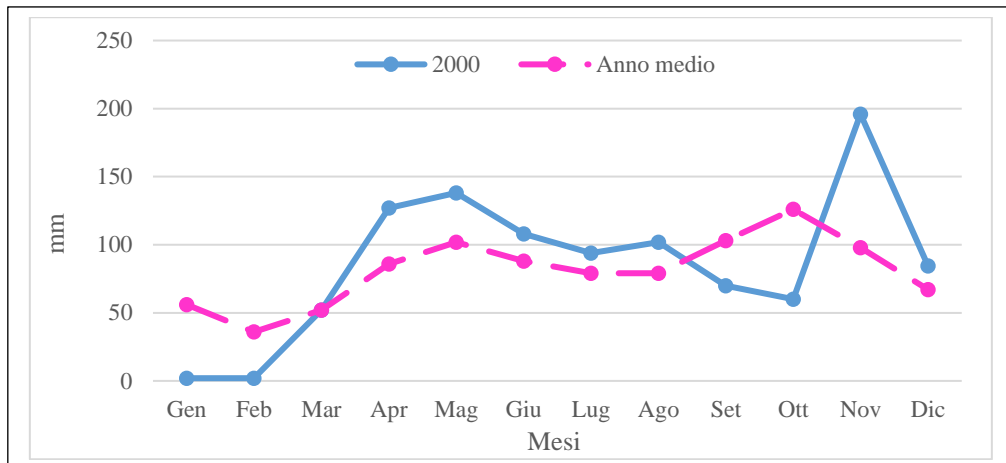


Figura 27-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2000

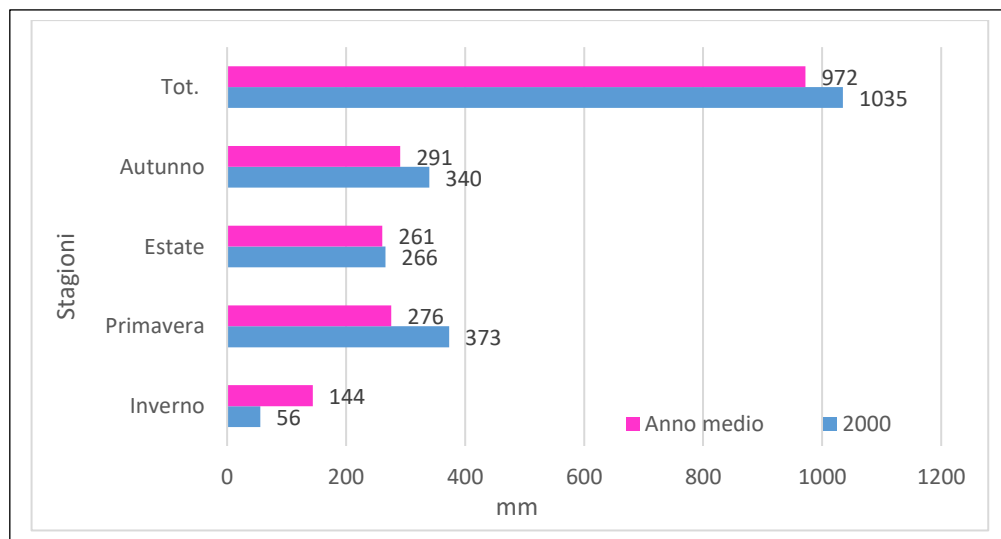


Figura 28-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2000

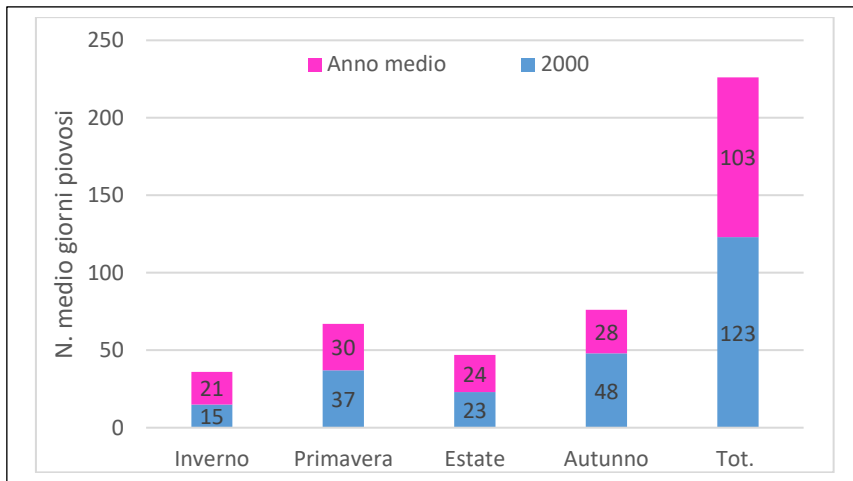


Figura 29-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2000

#### 4.2.2.2 ANNO: 2001

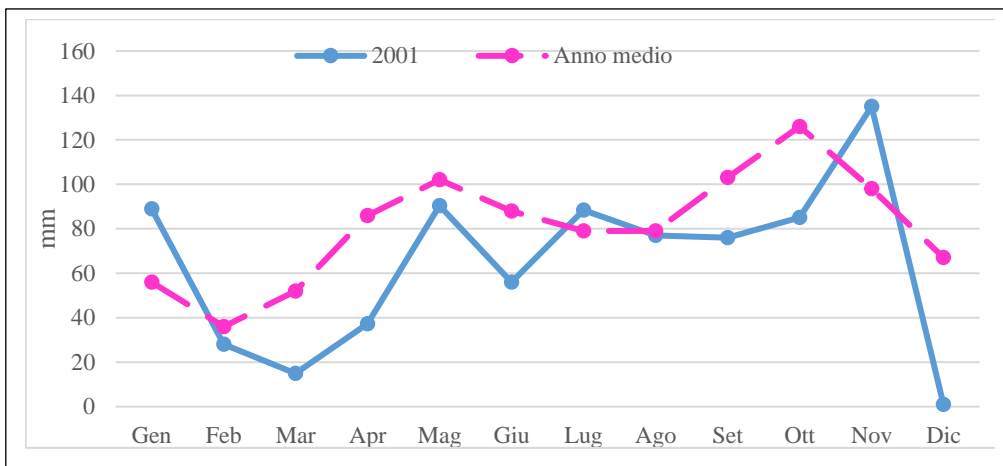


Figura 30--Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2001

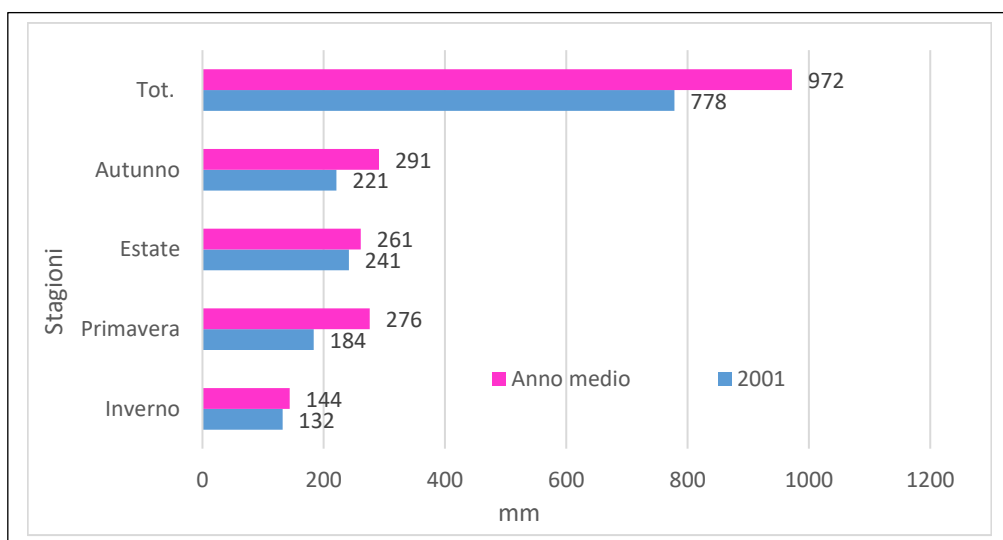


Figura 31-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2001

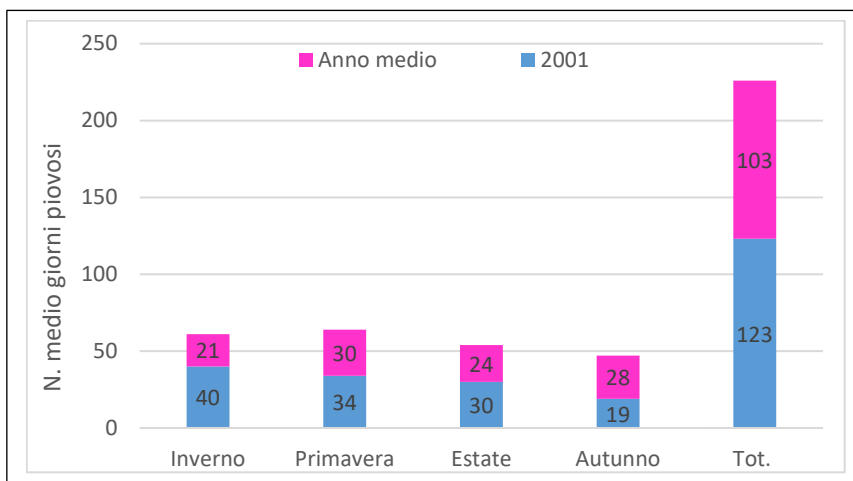


Figura 32-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2001

#### 4.2.2.3 ANNO: 2002

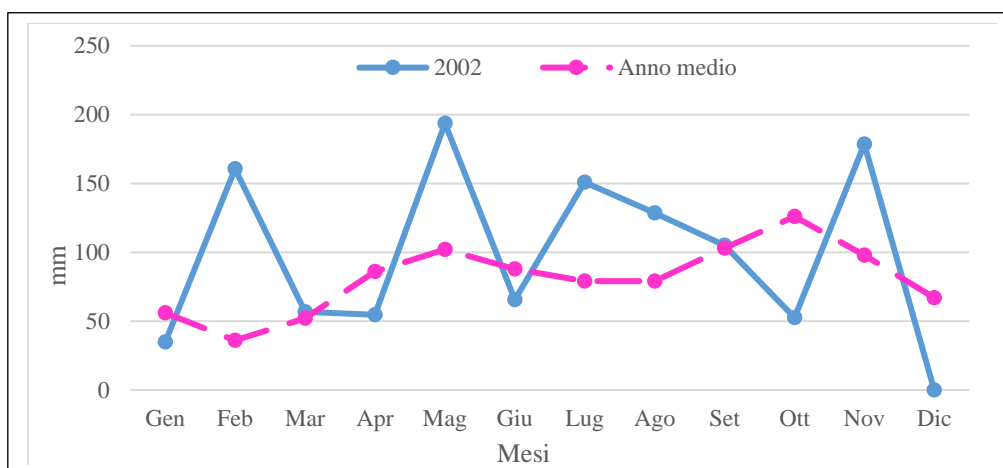


Figura 33-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2002

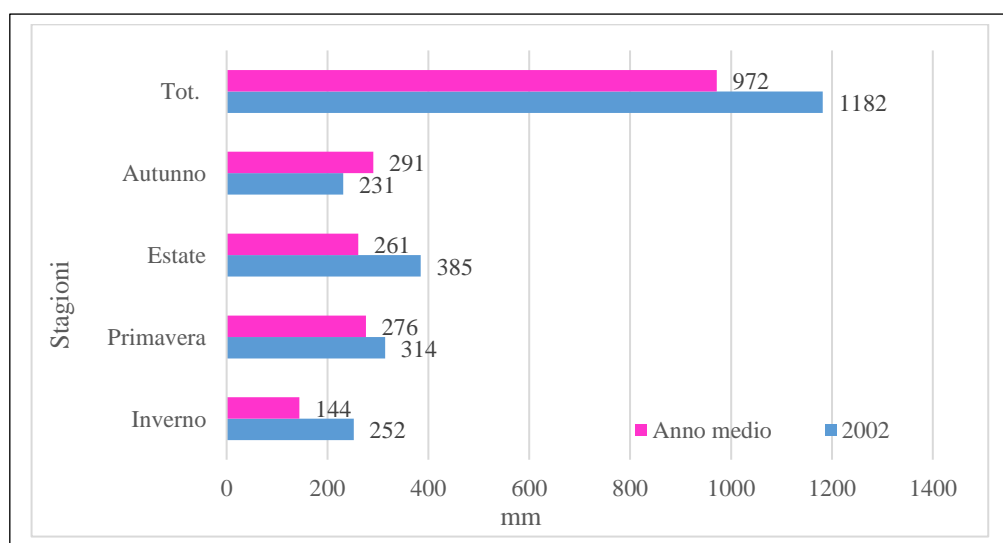


Figura 34-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2002

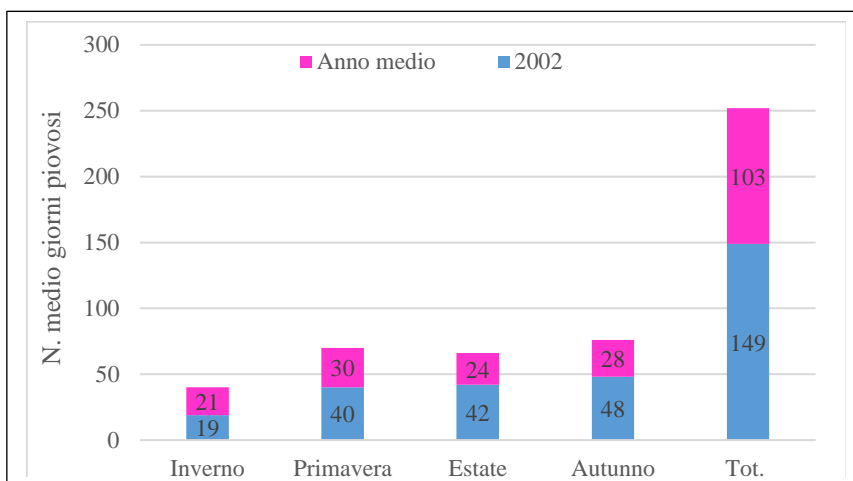


Figura 35-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2002

#### 4.2.2.4 ANNO: 2003

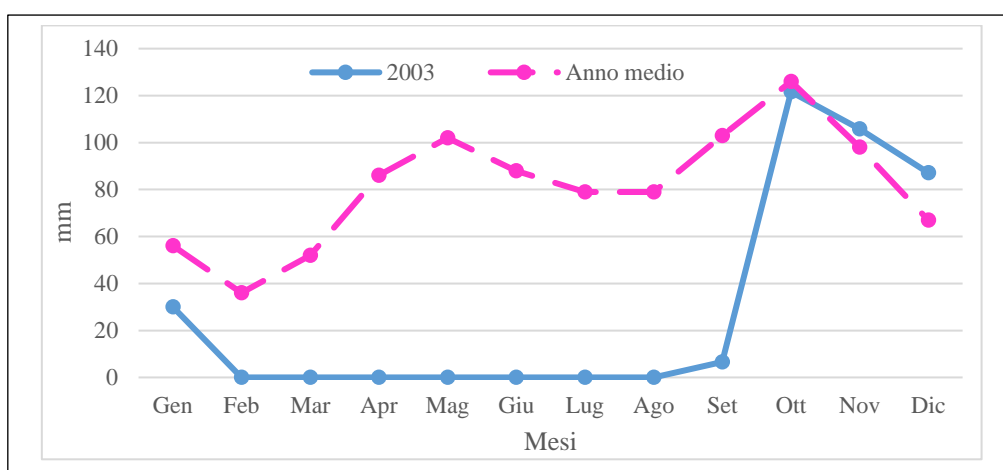


Figura 36-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2003

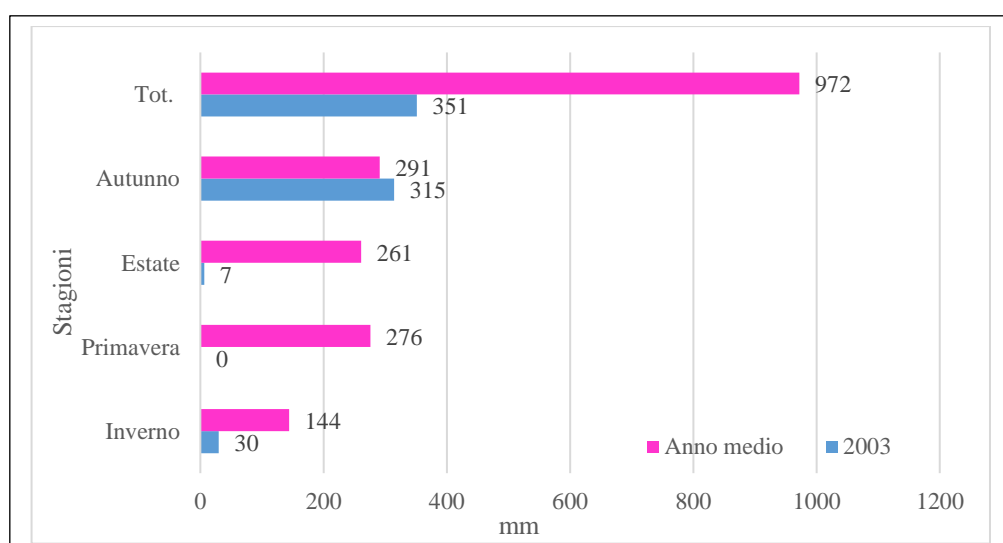


Figura 37-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2003



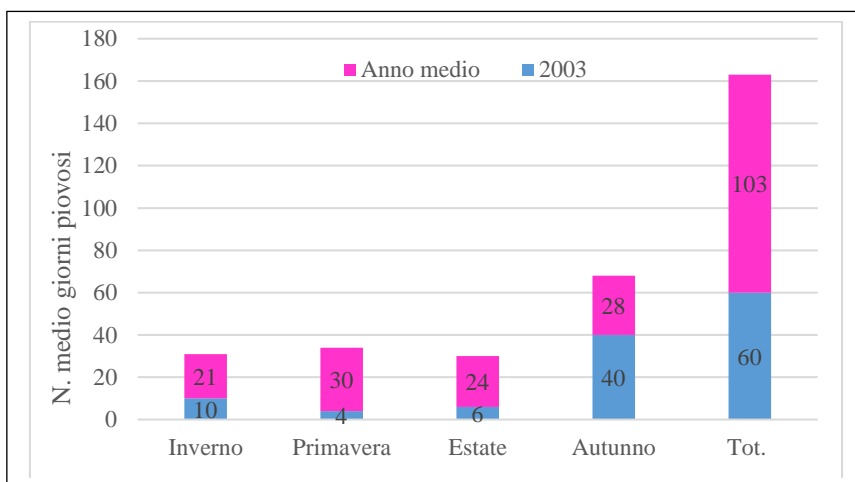


Figura 38-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2003

#### 4.2.2.5 ANNO: 2004

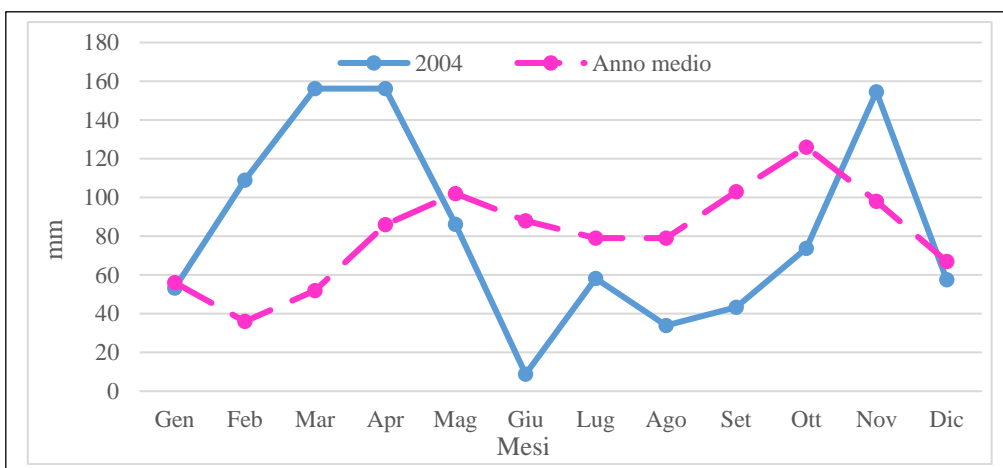


Figura 39-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2004

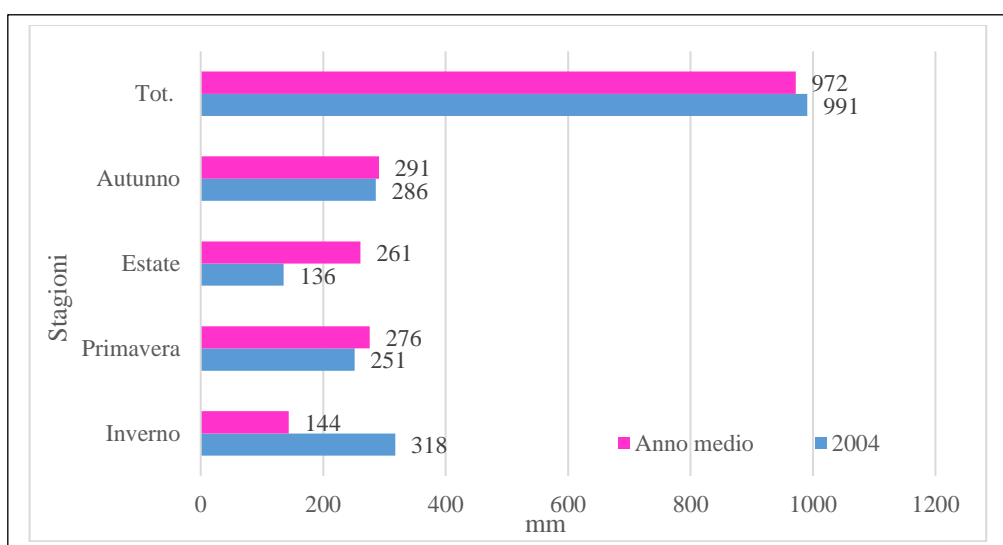


Figura 40 -Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2004

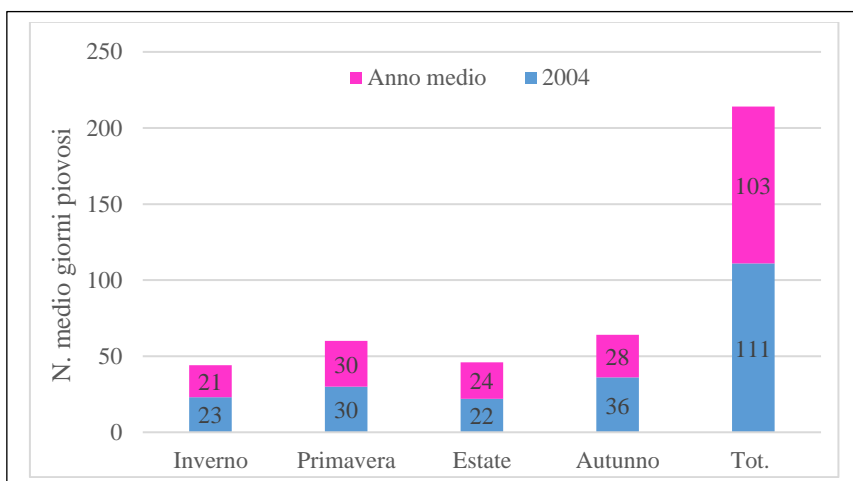


Figura 41-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2004

#### 4.2.2.6 ANNO: 2005

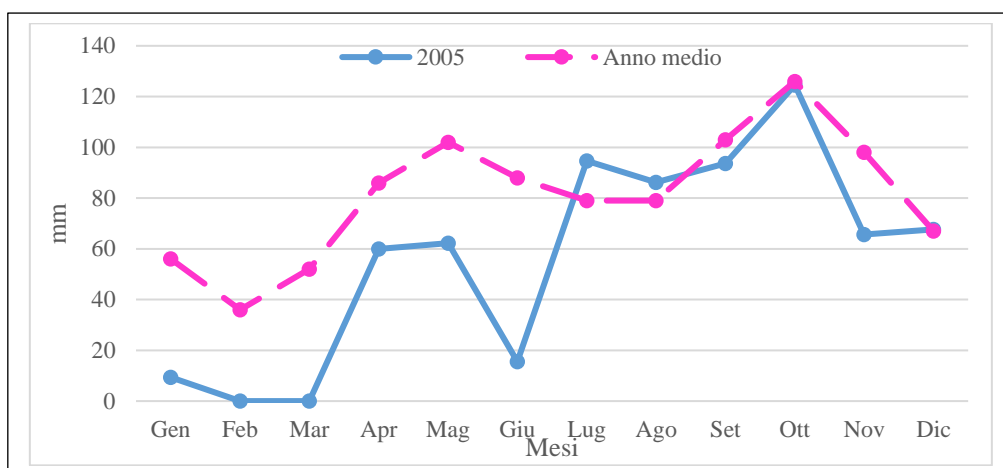


Figura 42-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2005

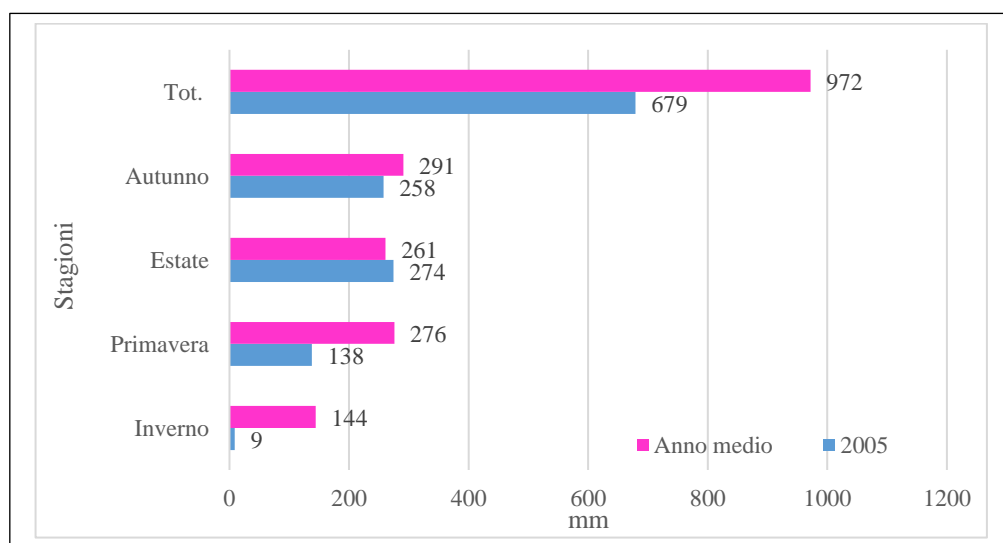


Figura 43-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2005

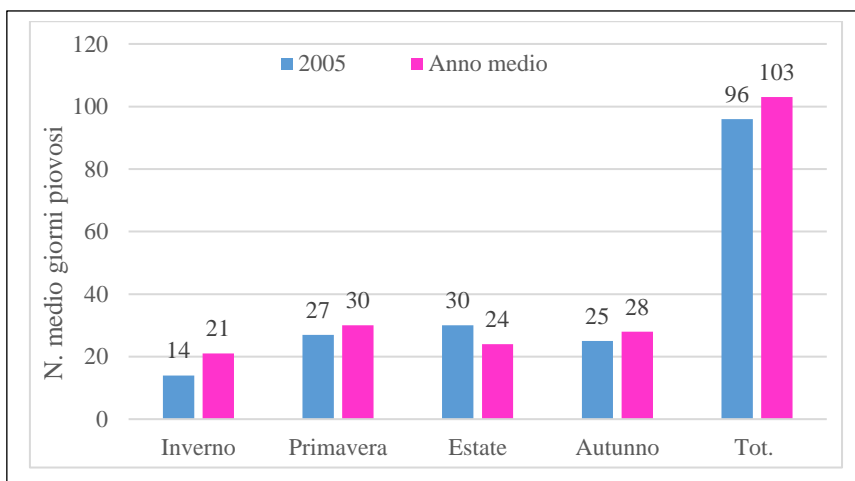


Figura 44-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2005

#### 4.2.2.7 ANNO: 2006

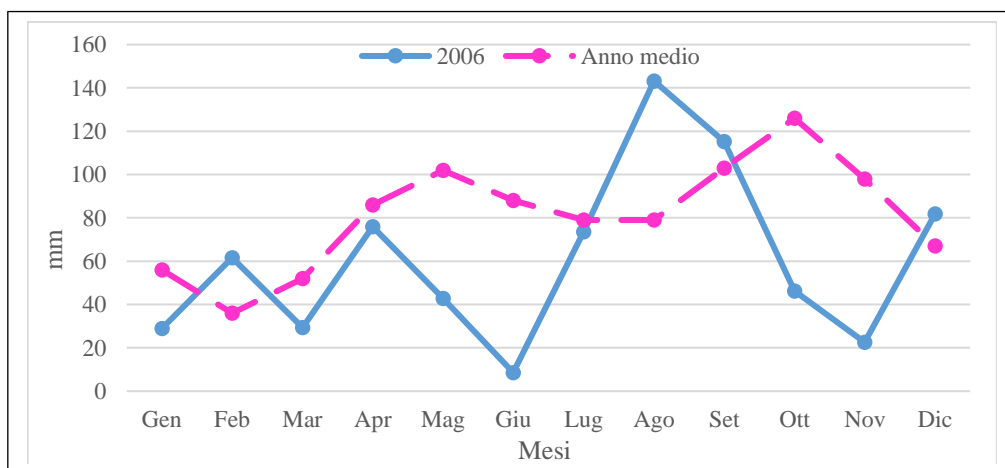


Figura 45-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2006

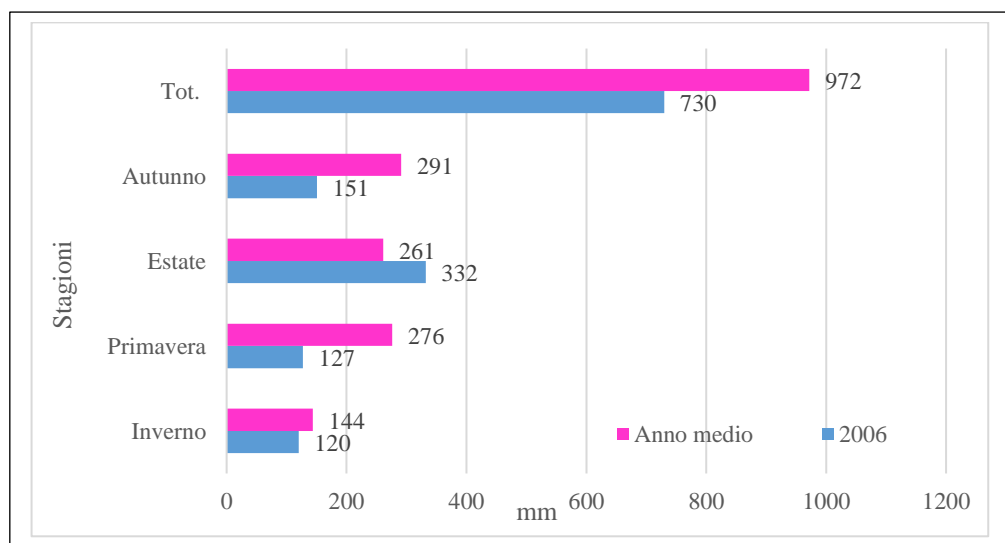


Figura 46-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2006

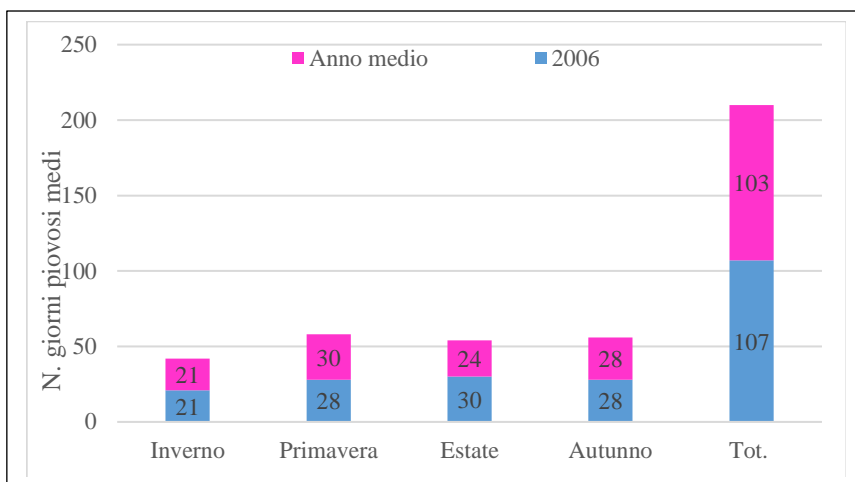


Figura 47-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2006

#### 4.2.2.8 ANNO: 2007

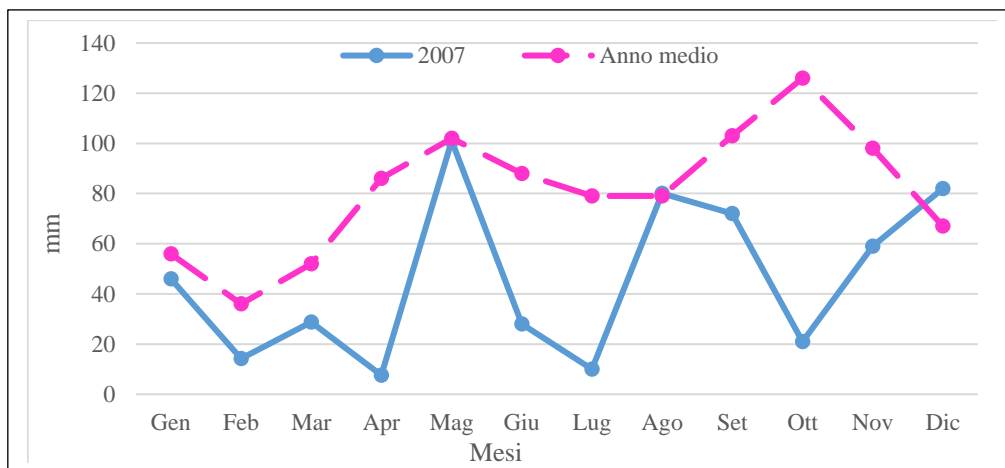


Figura 48-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2007

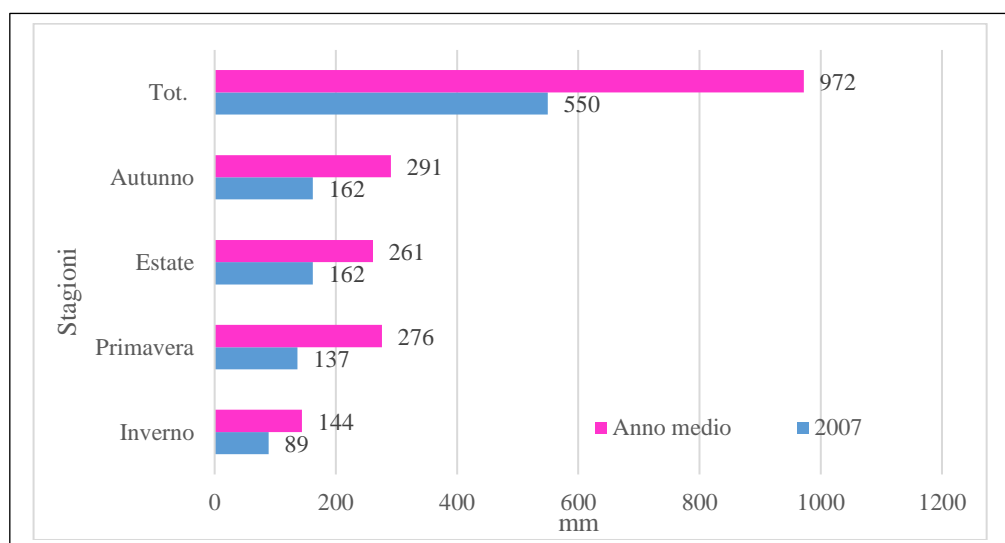


Figura 49-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2007

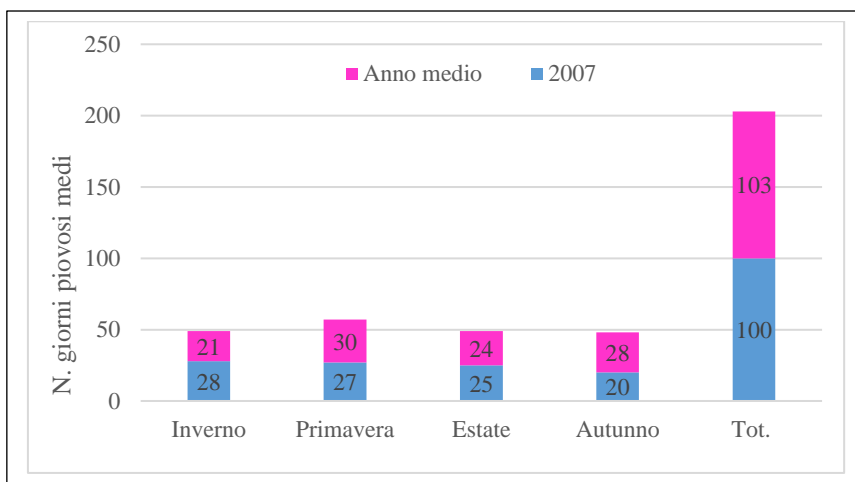


Figura 50-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2007

#### 4.2.2.9 ANNO: 2008

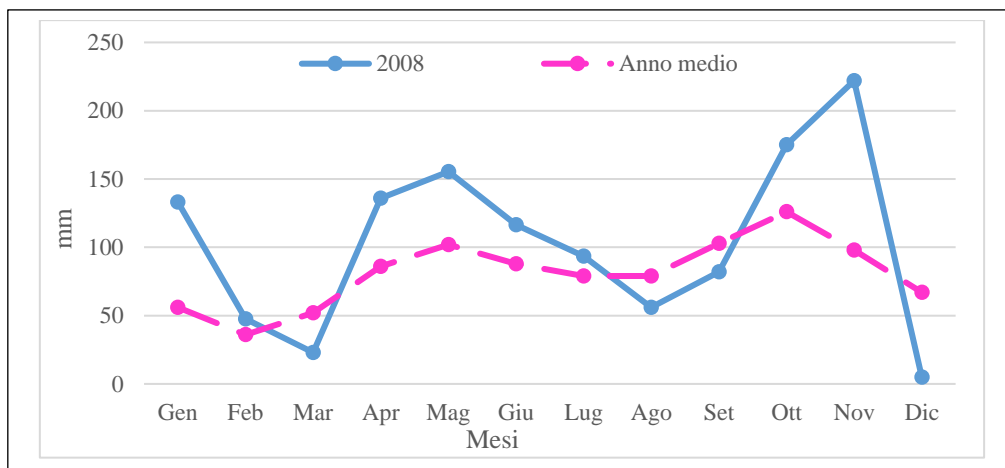


Figura 51-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2008

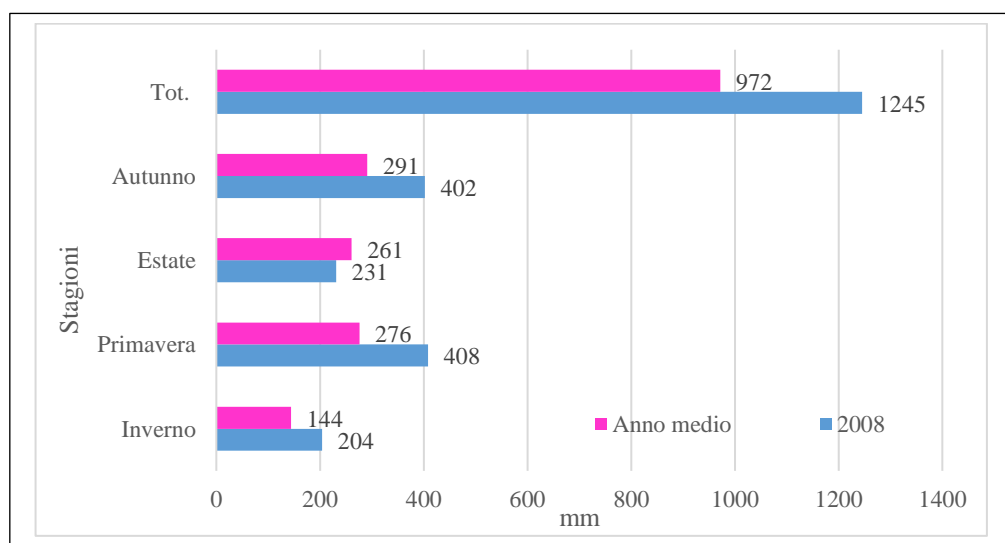


Figura 52-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2008

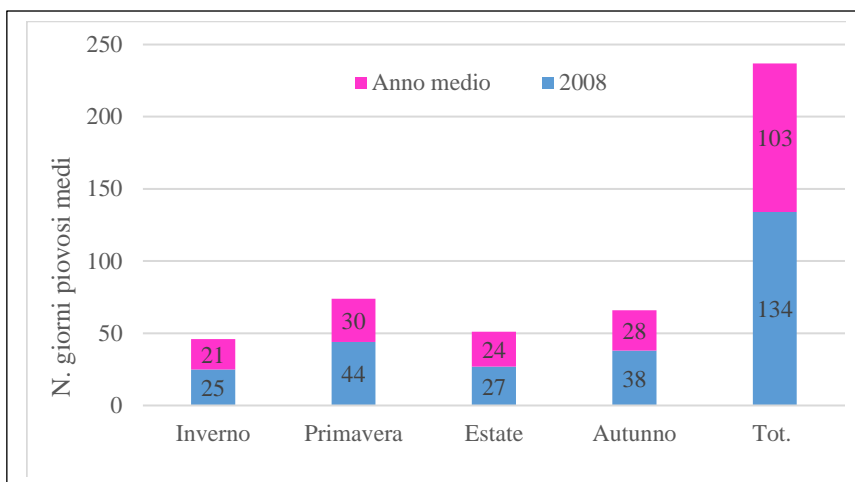


Figura 53-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2008

#### 4.2.2.10 ANNO: 2009

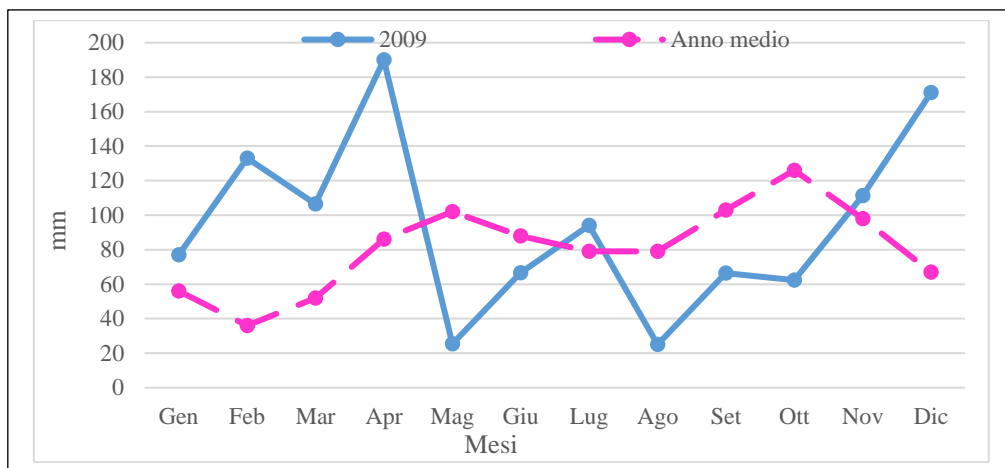


Figura 54-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2009

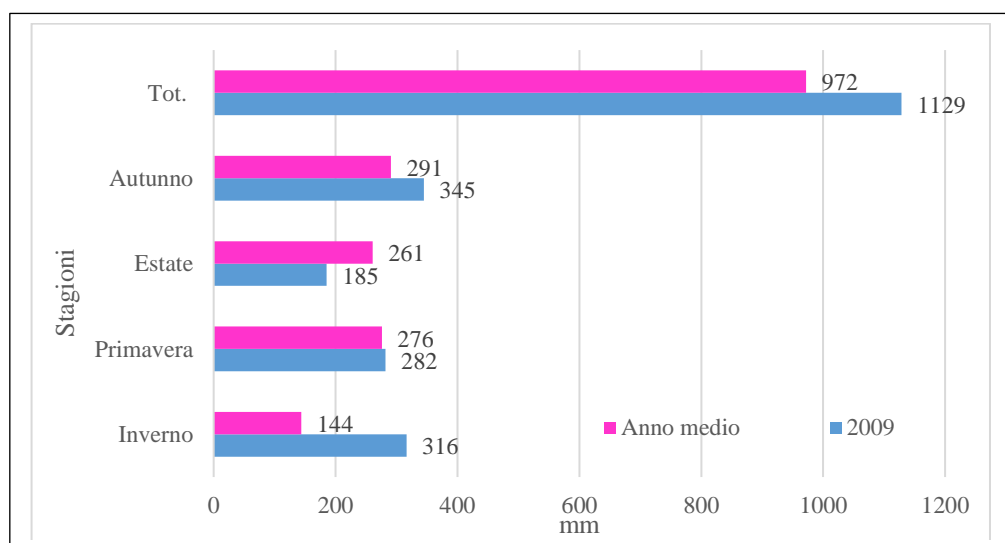


Figura 55-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2009

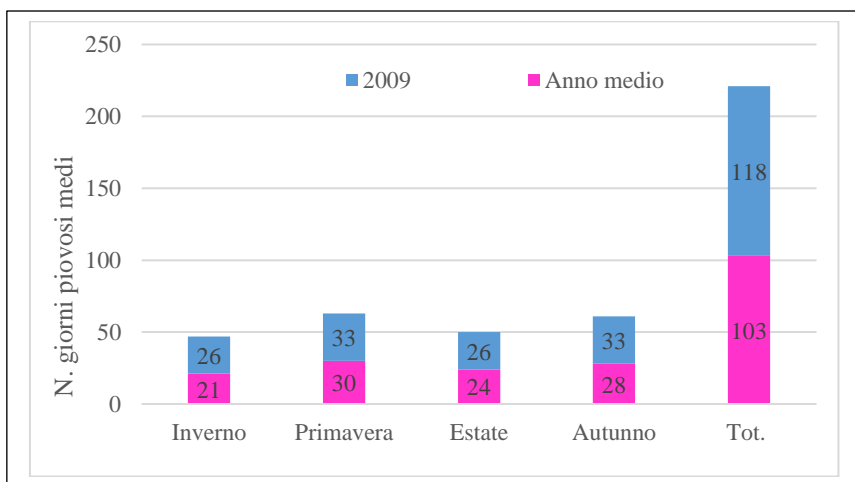


Figura 56-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2009

#### 4.2.2.11 ANNO: 2010



Figura 57-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2010

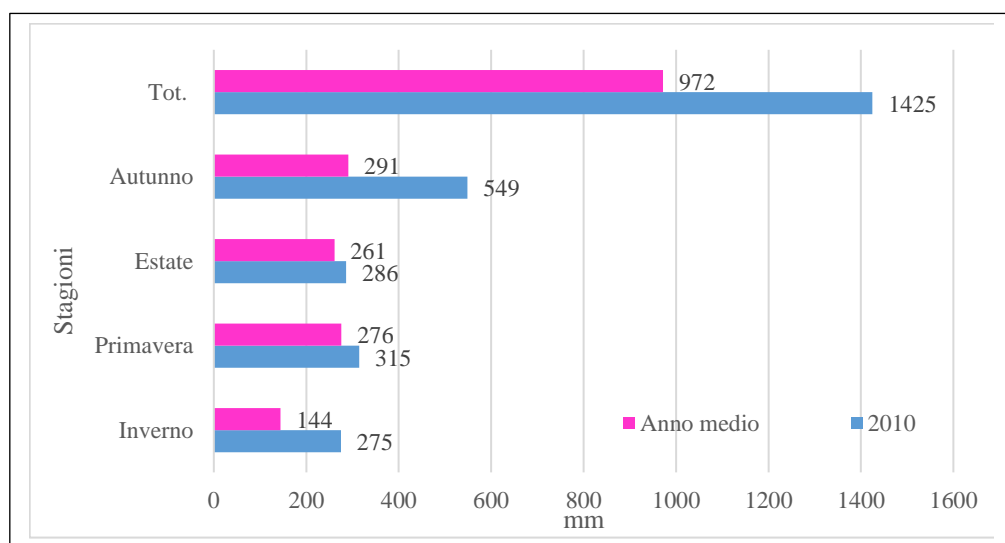


Figura 58-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2010

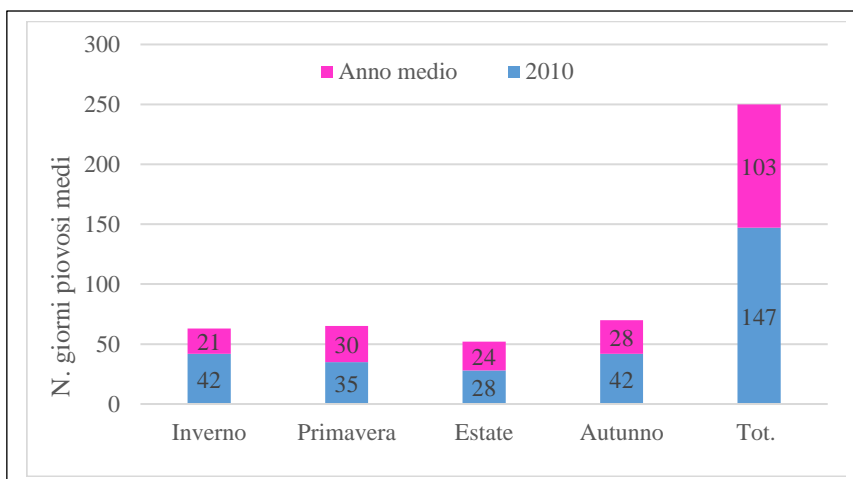


Figura 59-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2010

#### 4.2.2.12 ANNO: 2011

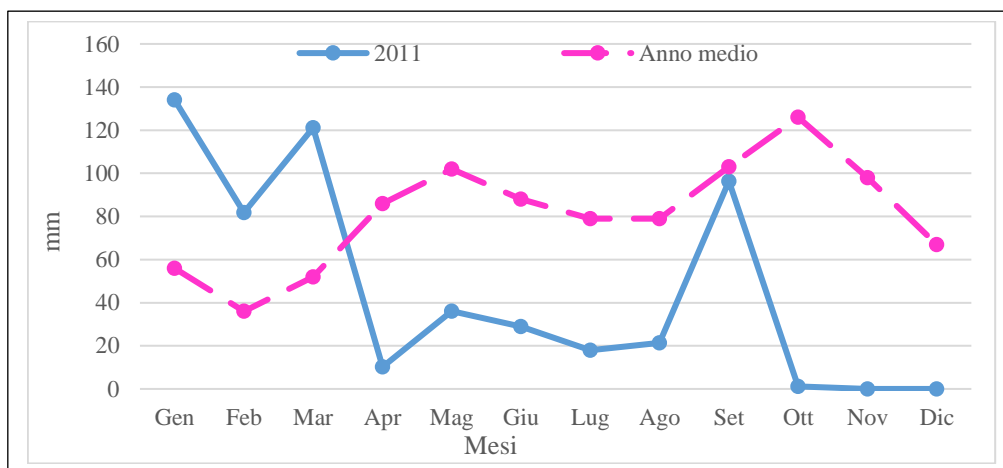


Figura 60-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2011

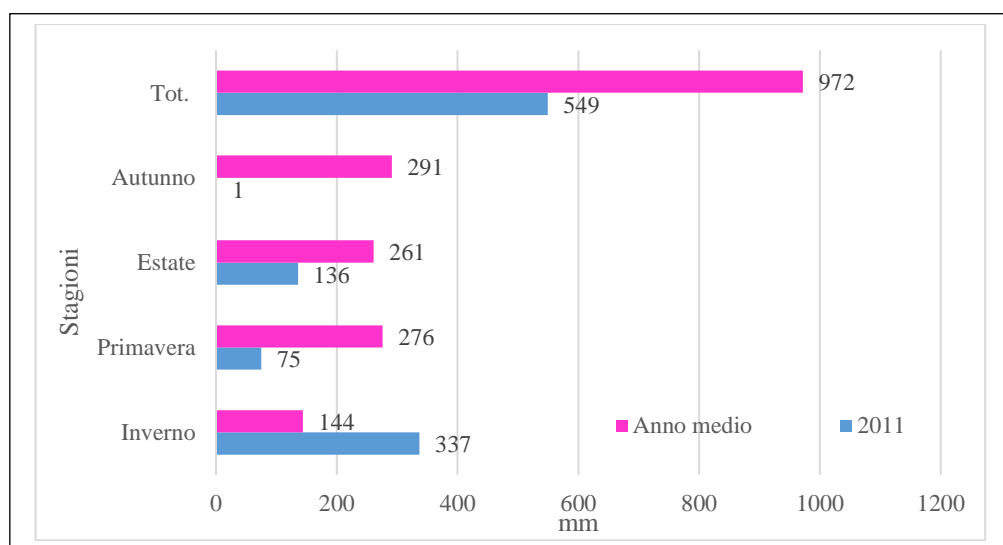


Figura 61-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2011



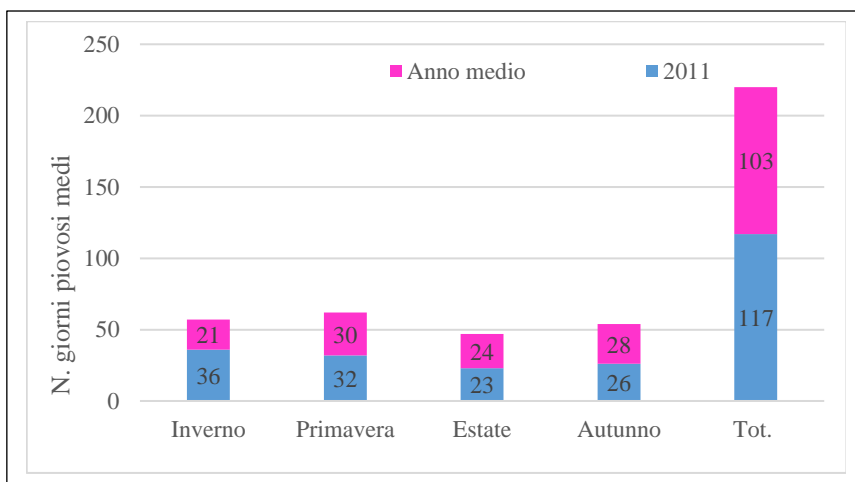


Figura 62-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2011

#### 4.2.2.13 ANNO: 2012

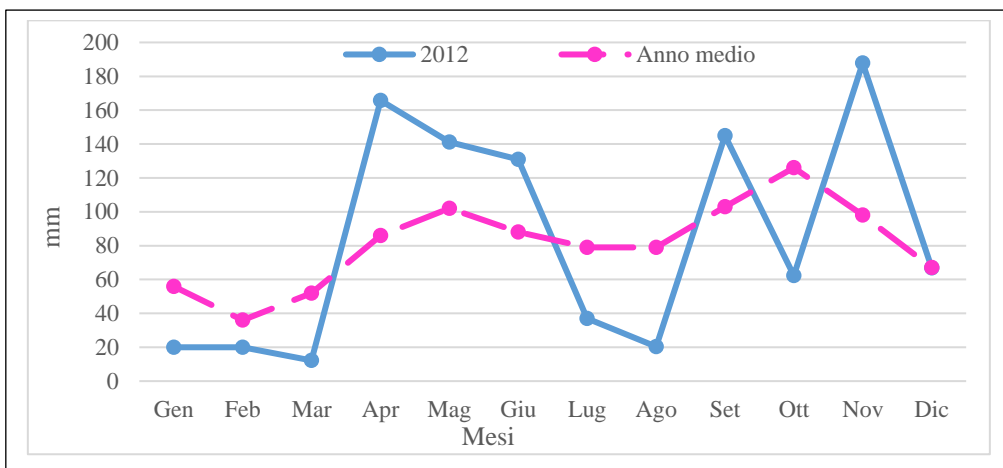


Figura 63-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2012

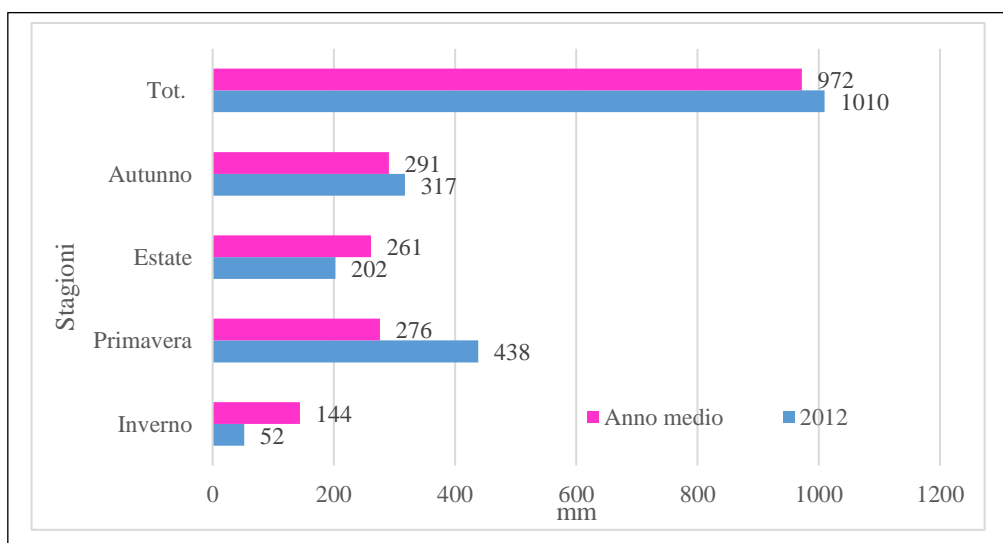


Figura 64-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2012

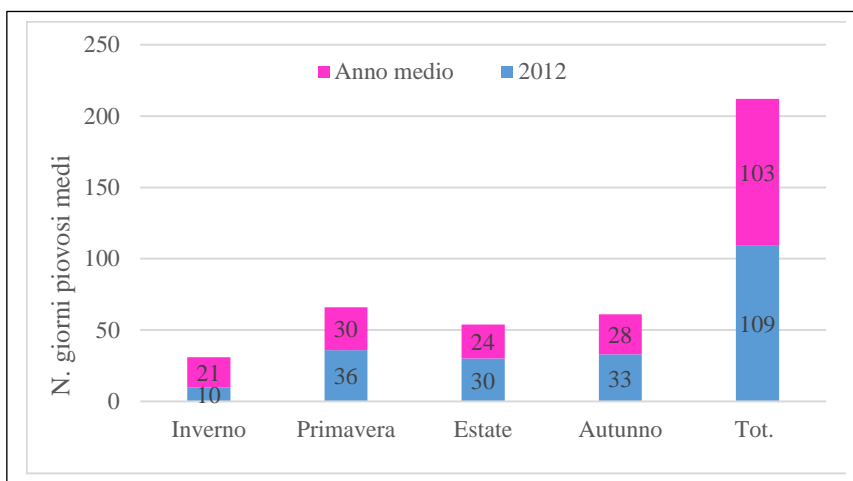


Figura 65-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2012

#### 4.2.2.14 ANNO: 2013



Figura 12-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2013

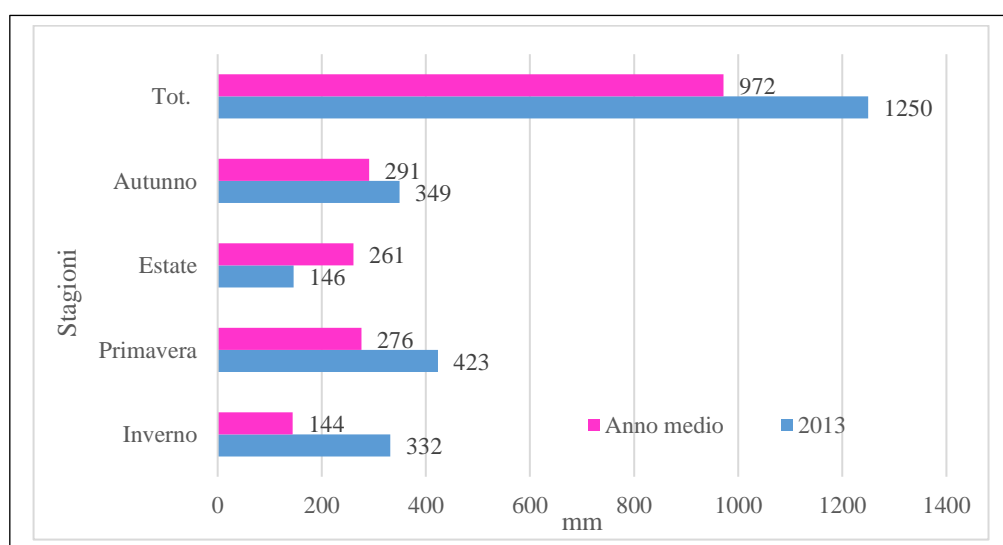


Figura 67-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2013

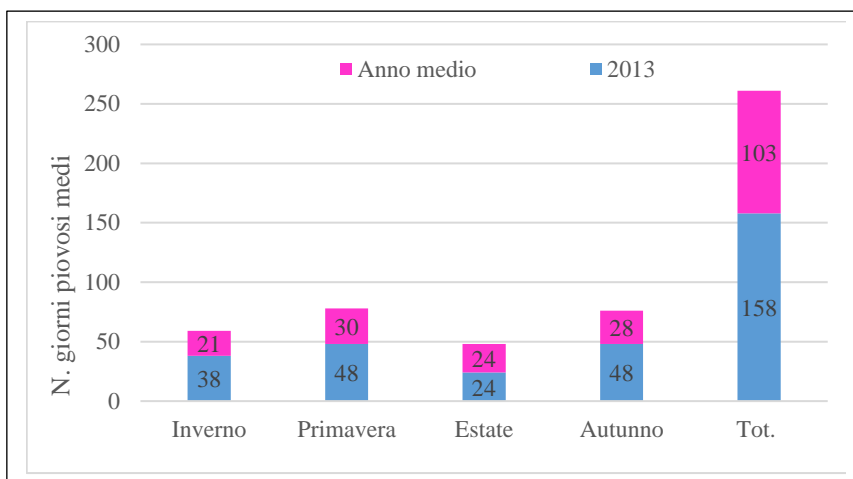


Figura 68-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2013

#### 4.2.2.15 ANNO: 2014

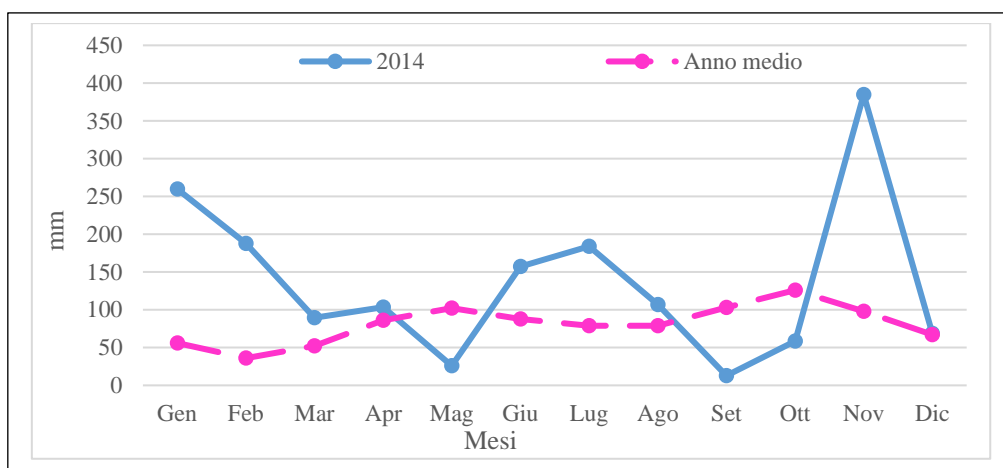


Figura 69-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2014

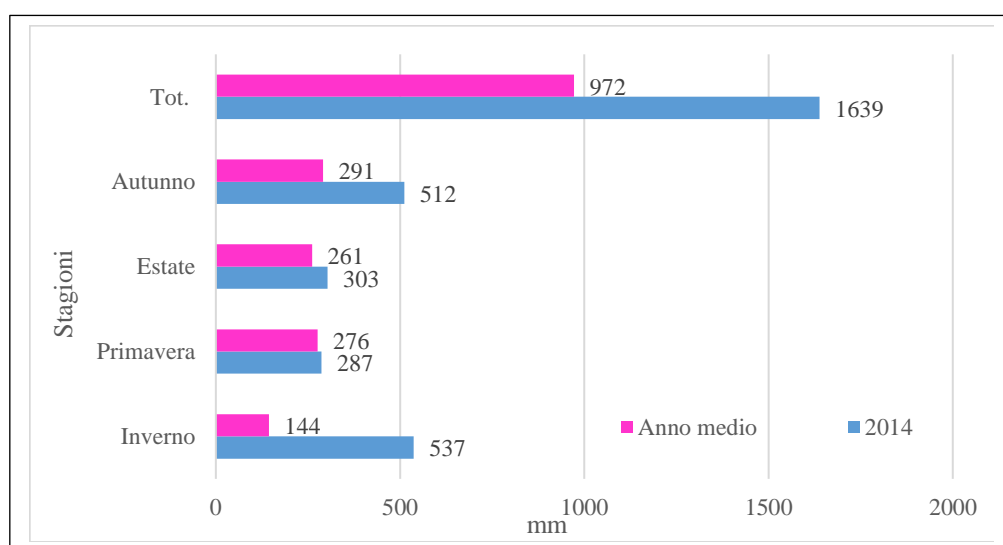


Figura 70-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2014

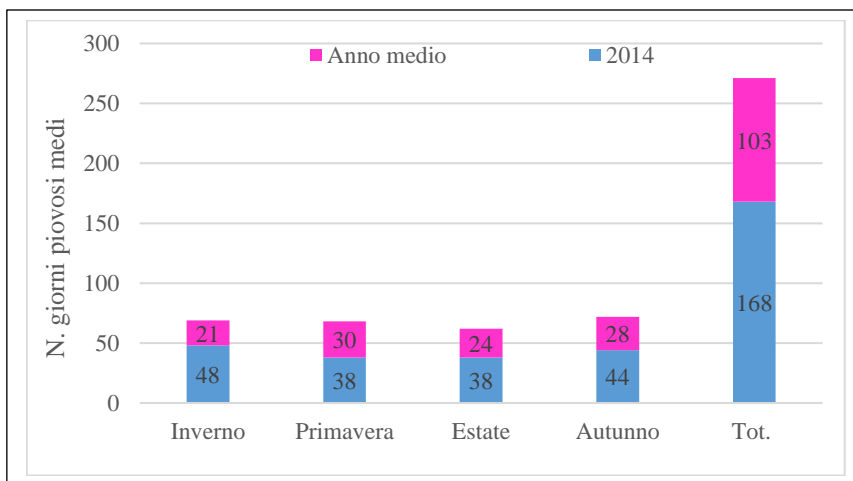


Figura 71-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2014

#### 4.2.2.16 ANNO: 2015

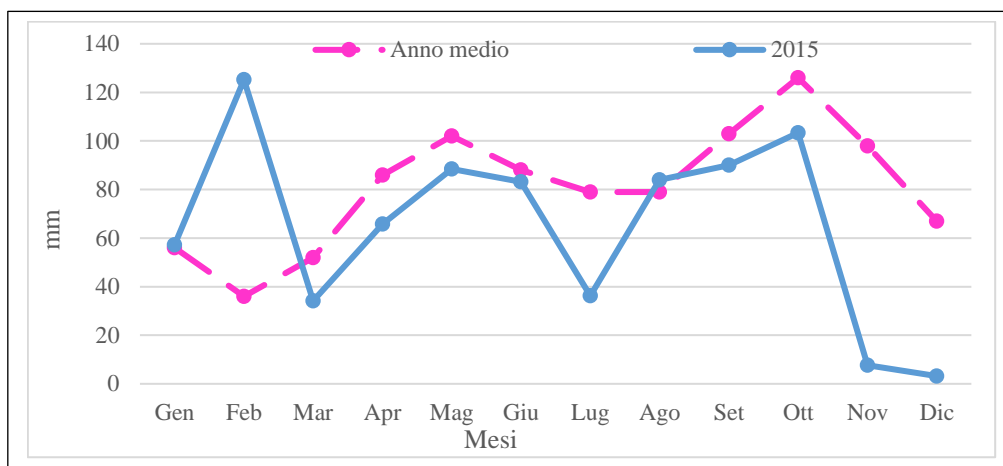


Figura 72-Precipitazione cumulata a Milano nell'anno 2015

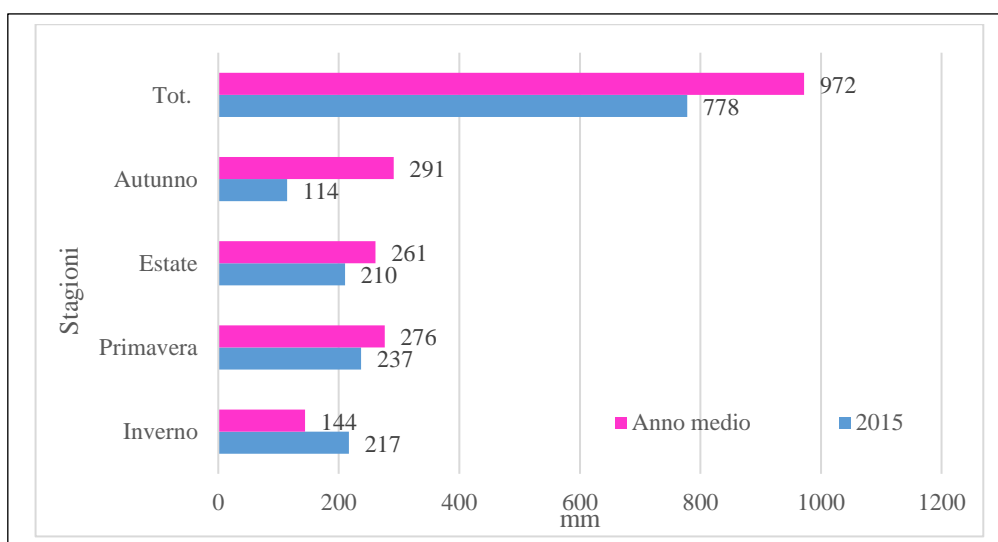


Figura 73-Precipitazione stagionale a Milano nell'anno 2015

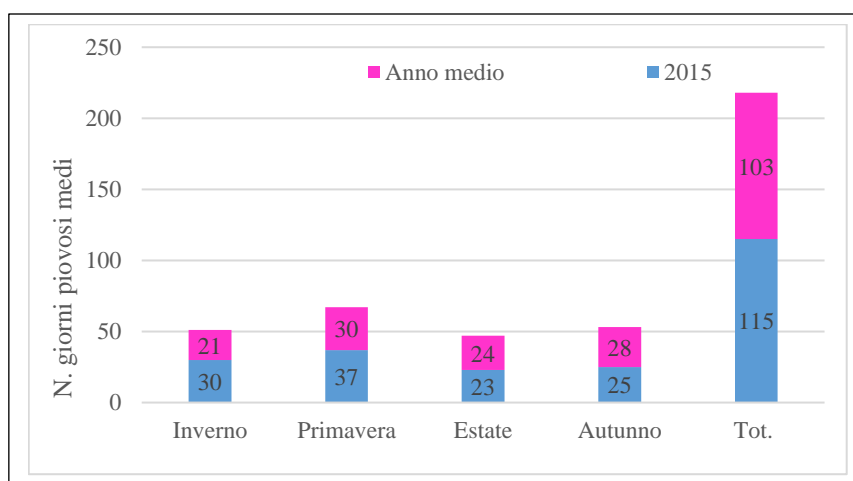


Figura 74-Numero di giorni piovosi stagionali a Milano nell'anno 2015

#### 4.2.2.17 COMMENTO

L'entità della precipitazione caduta al suolo, nel periodo 2000-2015, e registrata presso la stazione di Milano-Linate, è stata irregolare e definita da oscillazioni molto forti e variabili di anno in anno.

Le precipitazioni cumulate annuali, nei quindici anni in studio, presentano un aspetto preoccupante che si concretizza nell'alternanza di anni a forte piovosità e anni di carenza d'acqua.

L'alternanza di anni molto piovosi e poco piovosi è presumibilmente accidentale e gli anni sembrano scorrelati gli uni agli altri in termini di quantitativi pluviometrici annuali.

Dalle tabelle a seguire si osserva che l'andamento della precipitazione nei singoli mesi non rispecchia l'andamento medio, valutato sul periodo 1984-1999, né come valore quantitativo di precipitazione né in termini di massimi e minimi stagionali.

Quanto riassunto lo si osserva meglio dai grafici della precipitazione cumulata nei singoli anni: si nota che lo scostamento tra i massimi ed i minimi, di mese in mese, è aumentato, rispetto all'andamento medio 1984-1999.

Si conclude che la precipitazione cumulata a livello mensile presenta una persistente anomalia nella sua distribuzione, definibile "quasi casuale".

A seguire viene riportato un confronto tra i valori medi mensili, stagionali ed annuali delle due serie temporali 1984-1999 e 2000-2015.

2000												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
2	2	52	127	138	108	94	102	70	60	196	84	1035
2001												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
89	28	15	37	90	56	88	77	76	85	135	1	778
2002												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
35	161	57	55	194	66	151	129	105	53	179	0	1182
2003												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
30	0	0	0	0	0	0	0	7	122	106	87	351
2004												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
53	109	156	156	86	9	58	34	43	74	155	58	991.2
2005												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
9	0	0	60	62	16	95	86	94	125	66	68	679
2006												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
29	62	29	76	43	9	74	143	115	46	23	82	730
2007												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
46	14	29	8	101	28	10	80	72	21	59	82	550
2008												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
133	48	23	136	155	117	94	56	82	175	222	5	1245
2009												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
77	133	106	190	25	67	94	25	66	62	111	171	1128.6
2010												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
53	155	67	74	169	71	35	129	122	138	253	158	1425
2011												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
134	82	121	10	36	29	18	21	96	1	0	0	549
2012												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
20	20	12	166	141	131	37	20	145	62	188	67	1010
2013												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
78	54	200	175	188	60	16	60	70	122	113	114	1250
2014												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
260	188	90	103	26	157	184	107	13	58	385	69	1639
2015												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
57	125	34	66	88	83	36	84	90	103	8	3	778
Anno medio 1984-1999												
56	36	52	86	102	88	79	79	103	126	98	67	972

Tabella 7-Valori cumulati mensili di precipitazione a Milano, negli anni dal 2000 al 2015. In rosa: valori medi mensili del periodo 1984-1999.

### 4.2.3 CONFRONTO TRA LE PRECIPITAZIONE MEDIA DEL PERIODO 2000-2015 CON L'ANNO PLUVIOMETRICO MEDIO 1984-1999

Di seguito vengono riportati i grafici ed i valori calcolati più significativi per identificare le analogie e le anomalie pluviometriche tra le due serie.

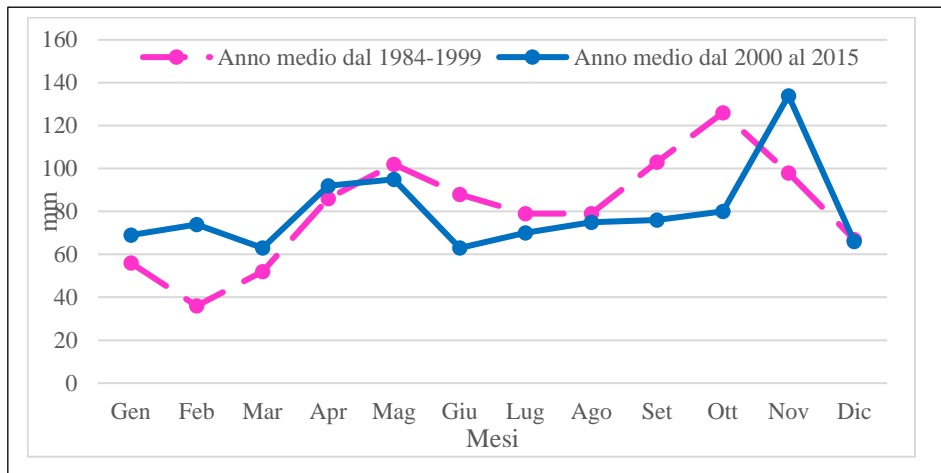


Figura 75-Confronto tra la precipitazione dell'anno pluviometrico medio e la precipitazione del periodo 2000-2015

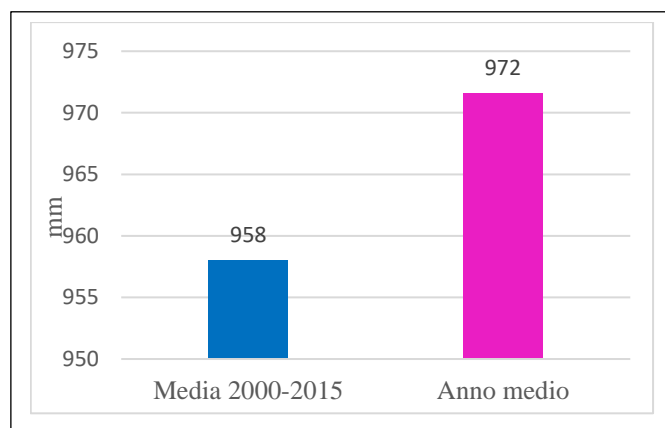


Figura 76-Istogramma rappresentante la precipitazione cumulata media annuale nell'anno pluviometrico medio e nel periodo 2000-2015

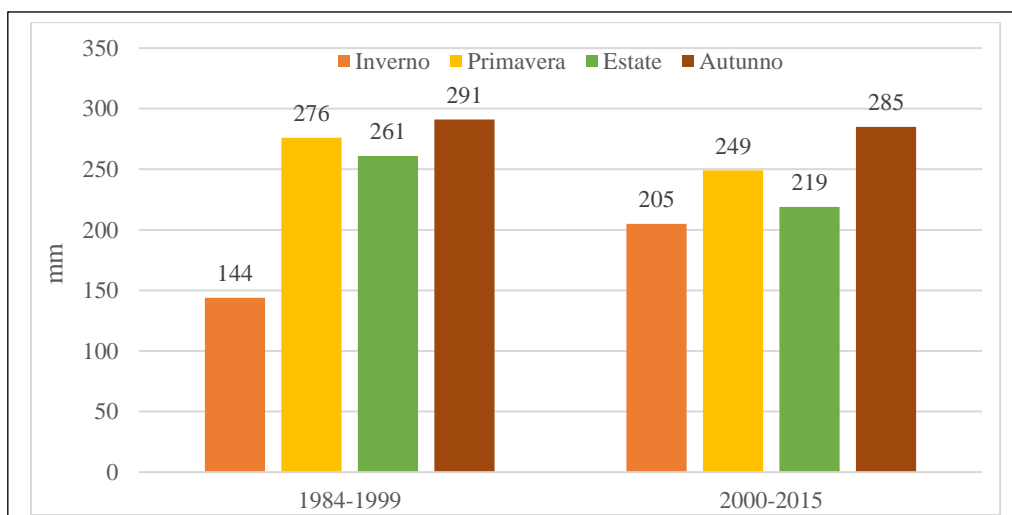


Figura 77-Confronto tra il regime pluviometrico dell'anno medio e quello valutato sul periodo 2000-2015

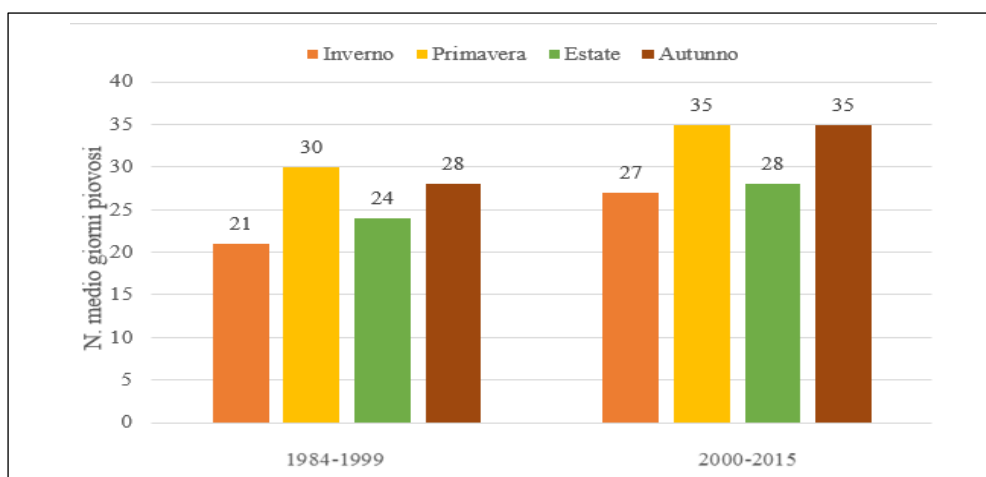


Figura 78-Confronto tra il numero di giorni piovosi stagionali dell'anno medio e del periodo 2000-2015

La precipitazione media annua nel periodo 2000-2015 è diminuita di 15 mm, cioè di circa 1 mm in media all'anno. Tale diminuzione è accompagnata non solo da un valore medio quantitativo ma anche da una distribuzione mensile che si discosta da quella dell'anno pluviometrico medio.

Seppur la precipitazione media annua nei due periodi sia quantitativamente paragonabile, essa è frutto di risultati differenti: mentre il valor medio sul periodo 1984-1999 è frutto di valori cumulati annuali distribuiti attorno al valor medio, la precipitazione media sul periodo 2000-2015 deriva da una media di anni con valore massimi e minimi pluviometrici.

Negli ultimi quindici anni è dunque aumentata la dispersione della precipitazione annuale attorno al proprio valor medio. La tabella seguente ben illustra quanto appena discusso.

Anni	Tot. Annuo (mm)	Anni	Tot. Annuo (mm)
1984	973	2000	1035
1985	885	2001	778
1986	935	2002	1182
1987	968	2003	351
1988	1026	2004	991
1989	949	2005	680
1990	972	2006	730
1991	681	2007	550
1992	1035	2008	1245
1993	937	2009	1129
1994	1089	2010	1425
1995	885	2011	549
1996	1156	2012	1010
1997	845	2013	1250
1998	919	2014	1639
1999	1298	2015	778
<b>Media annua (mm)</b>	<b>972</b>	<b>Media annua (mm)</b>	<b>958</b>

Tabella 8-Aumento della dispersione attorno al valor medio della serie 2000-2015, rispetto all'anno pluviometrico medio



Dai contributi pluviometrici annui se ne deduce che il periodo 2000-2015 ha avuto anni che si sono presentati come molto piovosi o come poco piovosi, rendendo poco significativo il concetto di valor medio annuale.

I giorni piovosi sono superiori in tutte e quattro le stagioni su Milano, rispetto al periodo 1984-1999. Non vi è corrispondenza tra l'aumento dei giorni piovosi sulla città e il contributo pluviometrico quantitativo.

Per comprendere meglio la dispersione della precipitazione annuale nel periodo 2000-2015 attorno alla propria media viene riportato di seguito un istogramma che contiene i valori annuali di precipitazione cumulata dal 1984 al 2015, disposta in ordine decrescente, dunque dagli anni più piovosi a quelli con scarsità di precipitazione.

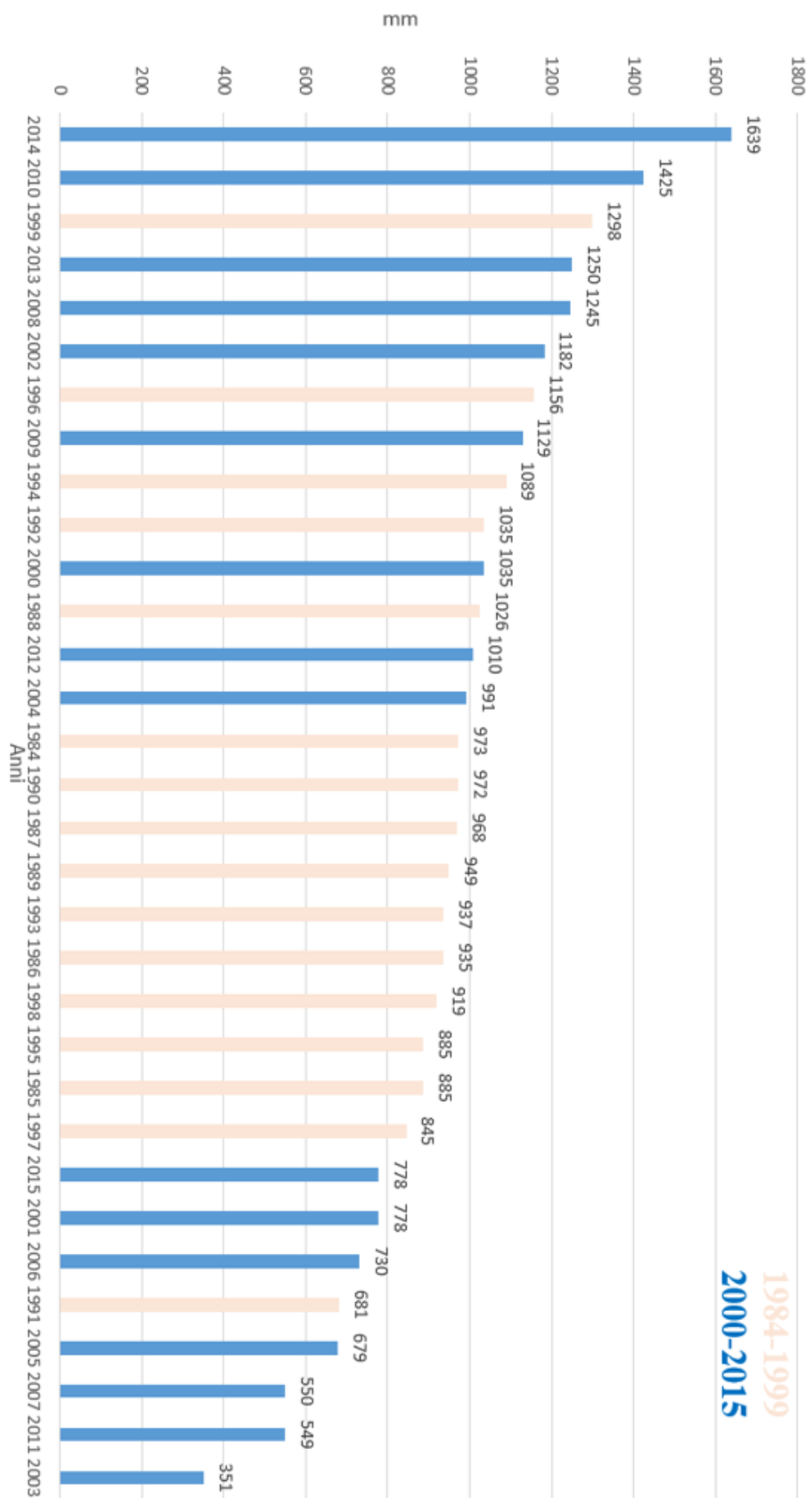


Figura 78-Istogramma rappresentativo dell'estremizzazione della precipitazione annuale del periodo 2000-2015, rispetto all'anno pluviometrico medio

Gli anni dal 2000 al 2015 si collocano prevalentemente alle due estremità del grafico, mentre gli anni dal 1984-1999 sono disposti nella parte centrale dell'istogramma.

In particolare risulta che:

- il 2014 è stato l'anno più piovoso degli ultimi trent'anni;
- il 2003 è stato l'anno più asciutto degli ultimi trent'anni.

Nel periodo 2000-2015, rispetto alla serie 1984-1999, si ha un'estremizzazione degli eventi di precipitazione. Tale estremizzazione del contributo pluviometrico annuale dipende dalla pioggia cumulata a livello stagionale, che conferma il carattere anomalo precipitativo del periodo 2000-2015.

Anni	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Tot. Annuo
2000	56	373	266	340	1035
2001	132	184	241	221	778
2002	252	314	385	231	1182
2003	30	0	7	315	351
2004	318	251	136	286	991
2005	9	138	274	258	680
2006	120	127	332	151	730
2007	89	137	162	162	550
2008	204	408	232	402	1245
2009	316	282	185	345	1129
2010	275	315	286	549	1425
2011	337	75	136	1	549
2012	52	438	202	317	1010
2013	332	423	146	349	1250
2014	537	287	303	512	1639
2015	217	237	210	114	778
<b>Media 2000-2015</b>	<b>205</b>	<b>249</b>	<b>219</b>	<b>285</b>	<b>958</b>
<b>Media 1984-1999</b>	<b>144</b>	<b>276</b>	<b>261</b>	<b>291</b>	<b>972</b>

Tabella 9-Precipitazione cumulata stagionale nel periodo 2000-2015. Confronto tra i valori medi stagionali del periodo 2000-2015 e quelli dell'anno pluviometrico medio

La stagione principalmente anomala è l'inverno che presenta valori di precipitazione ben al di sopra del valore medio, pari a 144mm tipici della stagione invernale. È questo il caso di anni come il 2002, 2004, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015.

L'inverno ha in media aumentato la sua precipitazione media nel periodo 2000-2015 di 61mm/anno.

Le restanti tre stagioni hanno diminuito la propria precipitazione a favore dell'inverno.

In particolare è l'estate che ha ridotto in media la propria precipitazione di un valore non trascurabile, pari a circa 42mm/anno.

A livello medio il periodo 2000-2015 mantiene come massimi di precipitazione annuali l'autunno e la primavera. L'estate e l'inverno, che nel periodo medio 1984-1999, erano distanti di ben 117mm, ora tendono a pareggiarsi, discostandosi di soli 14mm.

Dai valori di precipitazione media mensile si osserva come i mesi responsabili dell'anomalia invernale siano gennaio e febbraio, mentre il mese di novembre prende il posto di ottobre nel classificarsi come massimo annuale-autunnale.

<b>Valori medi mensili 1984-1999</b>												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	<b>Tot</b>
56	36	52	86	102	88	79	79	103	126	98	67	<b>972</b>
<b>Valori medi mensili 2000-2015</b>												
Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	<b>Tot</b>
69	74	63	92	95	63	70	75	76	80	134	66	<b>958</b>

Tabella 10-Valori cumulati medi mensili nei periodi 1984-1999 e 2000-2015

L'anomalia invernale è considerata significativa e degna di approfondimento: mentre le restanti tre stagioni mantengono il loro ordine di grandezza pluviometrico, l'inverno ha aumentato la propria precipitazione. Dai risultati tabulati esso non è più definibile come una stagione secca e di minimo assoluto nel regime pluviometrico di Milano.

Nei paragrafi successivi si approfondiscono le anomalie qui discusse a livello annuale, stagionale e mensile con l'obiettivo di identificare quali siano stati gli anni, le stagioni ed i mesi che più si sono allontanati dall'andamento medio e di caratterizzare un nuovo regime pluviometrico.

Si introdurranno delle classi pluviometriche a livello annuale, stagionale e mensile che verranno rappresentate su un diagramma a cerchi concentrici, per evidenziare al meglio la dispersione dei quindici anni studiati dalla propria media, che risulta quindi poco significativa a causa dell'estremizzazione degli eventi di pioggia.

#### 4.2.4 CLASSI PLUVIOMETRICHE ANNUALI

Gli anni dal 1984 al 2015, rappresentati nell'istogramma, vengono suddivisi in tre classi di piovosità. Le classi pluviometriche annuali sono state individuate come scostamento del 20% dal valor medio annuale pari a 972 mm/anno. I valori medi considerati sono quelli riferiti al 1984-1999.

Classi pluviometriche annuali			
Anni molto piovosi	1166mm	+20% di 972 mm	+
Anni mediamente piovosi	972mm	medio	+/-
Anni poco piovosi	778mm	-20% di 972mm	-

Tabella 11-Classi pluviometriche annuali

#### 4.2.4.1 PRECIPITAZIONE CUMULATA ANNUALE

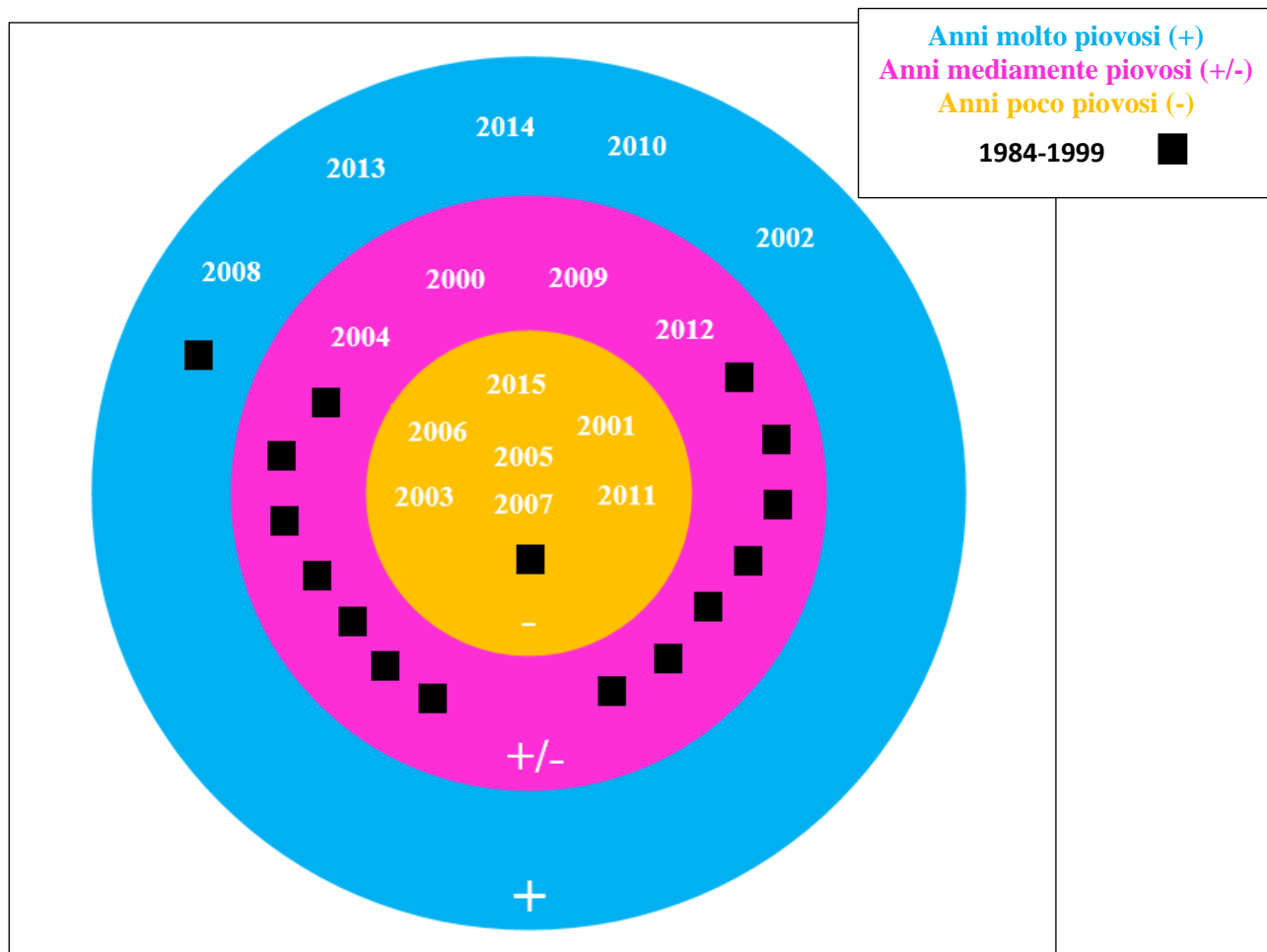


Figura 79-Diagramma a cerchi concentrici, rappresentante la collocazione degli anni dal 1984-2015 nelle tre classi di piovosità annuali

Risulta di immediata visualizzazione come la serie 1984-1999 sia distribuita con 14 anni su 16 nella zona degli anni mediamente piovosi.

Al contrario gli anni del nuovo millennio sono dispersi nei due cerchi, esterno ed interno, ovvero nella zona degli anni classificati come molto piovosi e poco piovosi.

Con l'introduzione delle classi pluviometriche, nel periodo 2000-2015, risulta che:

- 5 anni su 16 sono stati molto piovosi;
- 4 anni su 16 sono stati mediamente piovosi;
- 7 anni su 16 sono stati poco piovosi.

Ben 12 anni su un totale di 16 sono collocati al di fuori della classe pluviometrica intermedia, discostandosi dal valor medio di oltre il 20%.

Questo consente di confermare l'evidenza osservata nel paragrafo precedente, riguardante l'estremizzazione degli eventi di pioggia su Milano.

All'interno del periodo 2000-2015 vi sono poi 5 anni che si discostano dal valor medio per più del 40%.

Classi di piovosità annuali				
<b>Anni estremamente piovosi</b>	<b>1361mm</b>	+ 40% di 972mm	<b>++</b>	<b>2014, 2010</b>
<b>Anni scarsamente piovosi</b>	<b>583mm</b>	- 40% di 972mm	<b>--</b>	<b>2003,2011,2007</b>

Tabella 12-Classi pluviometriche annuali, che si discostano dal valor medio per più del 40%

Si distinguono dunque il 2014 ed il 2010 che presentano più del 40% di precipitazione cumulata a livello annuale (1639mm, 1425mm) rispetto al valor medio, e tre anni, 2003-2007-2011 classificati come scarsamente piovosi (351mm, 549mm, 550mm).

#### 4.2.5 CLASSI PLUVIOEMETRICHE STAGIONALI

A seguire si analizza la precipitazione cumulata nelle varie stagioni del periodo 2000-2015, suddividendo la precipitazione all'interno di ogni stagione in classi di piovosità.

Le classi pluviometriche stagionali sono state individuate come scostamento del 20% dal valor medio delle quattro stagioni. I valori medi considerati sono quelli riferiti al 1984-1999.

##### 4.2.5.1 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN INVERNO

Classi di piovosità invernali				
Inverno molto piovoso	173mm	+20% di 144mm	+	
Inverno mediamente piovoso	144mm	medio	+/-	
Inverno poco piovoso	115mm	-20% di 144mm	-	

Tabella 13-Classi pluviometriche invernali

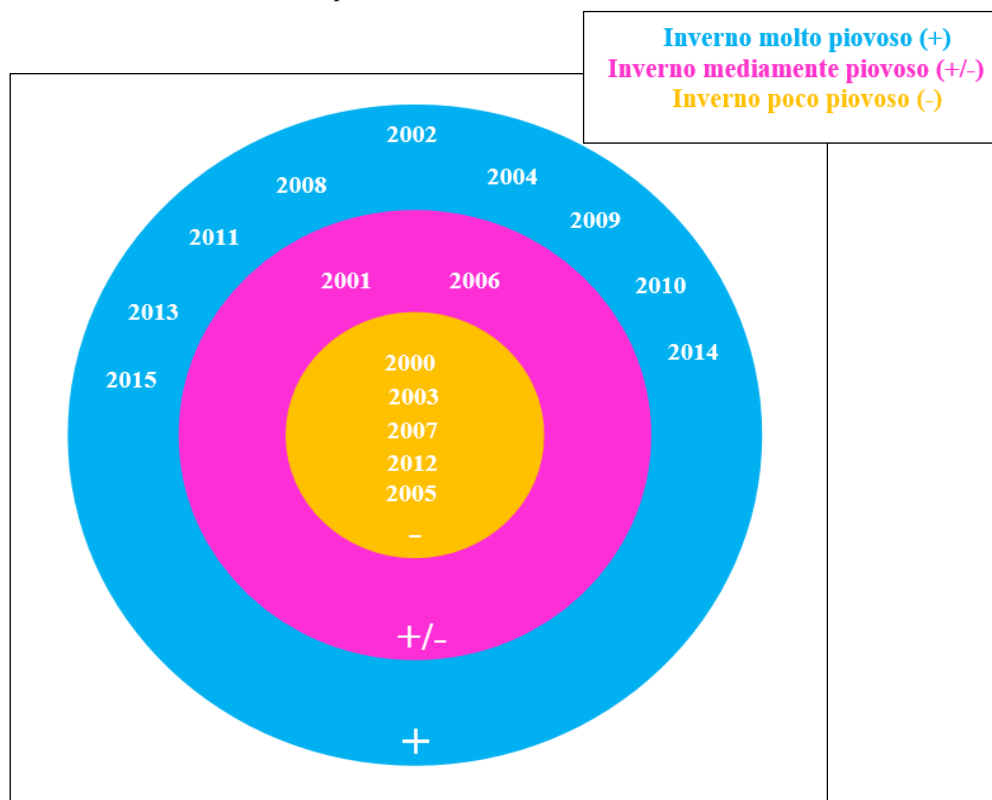


Figura 80-Diagramma a cerchi concentrici rappresentante la distribuzione degli inverni degli anni 2000-2015 all'interno delle tre classi di piovosità invernali

Complessivamente dal 2000 al 2015 9 anni su 16 sono hanno avuto inverni molto piovosi e 5 anni su 16 hanno avuto inverni asciutti. Solo due inverno su 16 si sono classificato come inverni medi.

Tutti gli inverni classificati come molto piovosi in realtà eccedono addirittura il 40% del valor medio invernale pari a 144mm. Quattro dei 5 inverni asciutti si collocano nella classe degli inverni scarsamente piovosi.

Classi di piovosità invernali				
Inverno estremamente piovoso	202mm	+ 40% di 144mm	++	9 inverni
Inverno scarsamente piovoso	86mm	- 40% di 144mm	--	4 inverni

Tabella 14-Classi pluviometriche invernali, che si discostano dal valor medio per più del 40%

L'inverno in 13 anni su 16 è risultato eccedere il valor medio di più del 40%.

La maggior parte degli inverni ha aumentato il proprio carattere piovoso.

Si ha dunque un'estremizzazione del carattere invernale, dovuto ad un netto aumento della piovosità.

#### 4.2.5.2 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN PRIMAVERA

Classi di piovosità primaverili				
Primavera molto piovosa	331mm	+20% di 276mm	+	
Primavera mediamente piovosa	276mm	medio	+/-	
Primavera poco piovosa	221mm	-20% di 276mm	-	

Tabella 15-Classi pluviometriche primaverili

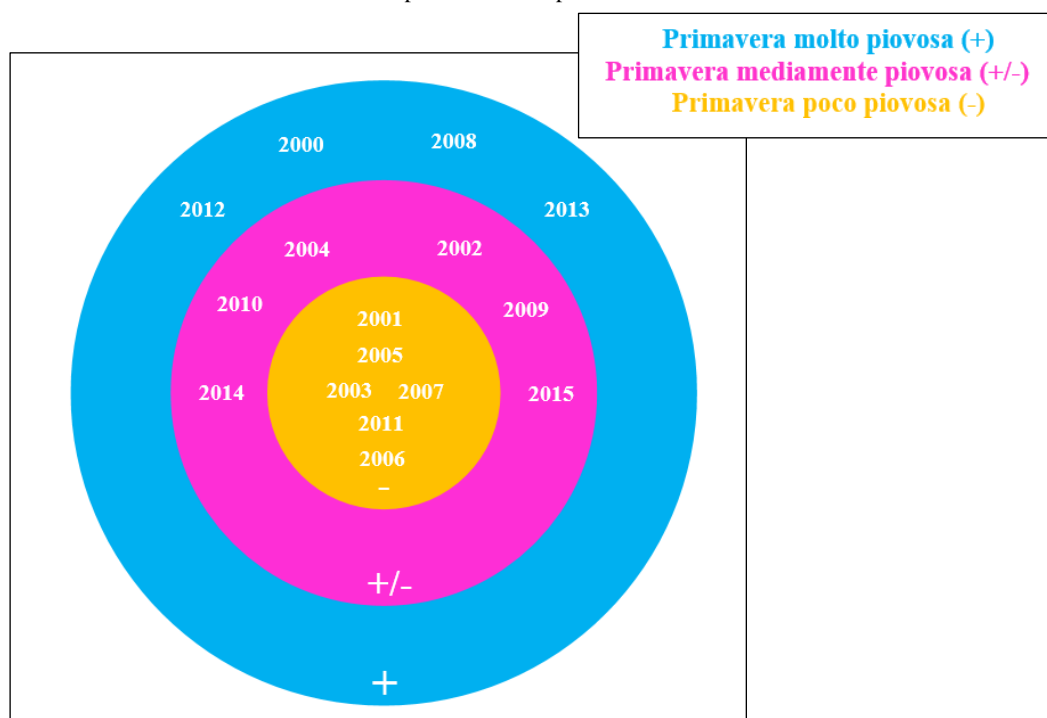


Figura 81-Diagramma a cerchi concentrici rappresentante la distribuzione della primavera degli anni 2000-2015 all'interno delle tre classi di piovosità primaverili



La stagione primaverile ha avuto precipitazioni molto abbondanti solo in 4 anni, mentre 6 anni su 16 hanno avuto una primavera poco piovosa.

Gli anni con precipitazione primaverile prossima al valor medio sono 6.

Attraverso le classi di piovosità primaverili introdotte si osserva che la primavera sta tendendo prevalentemente ad abbassare il proprio regime pluviometrico, seppur non discostandosi di molto dal valor medio di 276mm, valutati sul periodo 1984-1999.

Classi di piovosità primaverili				
<b>Primav. estremamente piovosa</b>	<b>386mm</b>	+ 40% di 276mm	<b>++</b>	<b>3 primav.</b>
<b>Primav. scarsamente piovosa</b>	<b>166mm</b>	- 40% di 276mm	<b>--</b>	<b>5 primav.</b>

Tabella 16-Classi pluviometriche primaverili, che si discostano dal valor medio per più del 40%

Nelle classi pluviometriche estreme si collocano 8 stagioni primaverili su 16.

La primavera non è considerata come una stagione particolarmente anomala poiché mantiene più di un terzo delle proprie manifestazioni nella classe media di piovosità.

#### 4.2.5.3 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN ESTATE

Classi di piovosità estive			
<b>Estate molto piovosa</b>	<b>313mm</b>	+20% di 261mm	<b>+</b>
<b>Estate mediamente piovosa</b>	<b>261mm</b>	medio	<b>+/-</b>
<b>Estate poco piovosa</b>	<b>209mm</b>	-20% di 261mm	<b>-</b>

Tabella 17-Classi pluviometriche estive

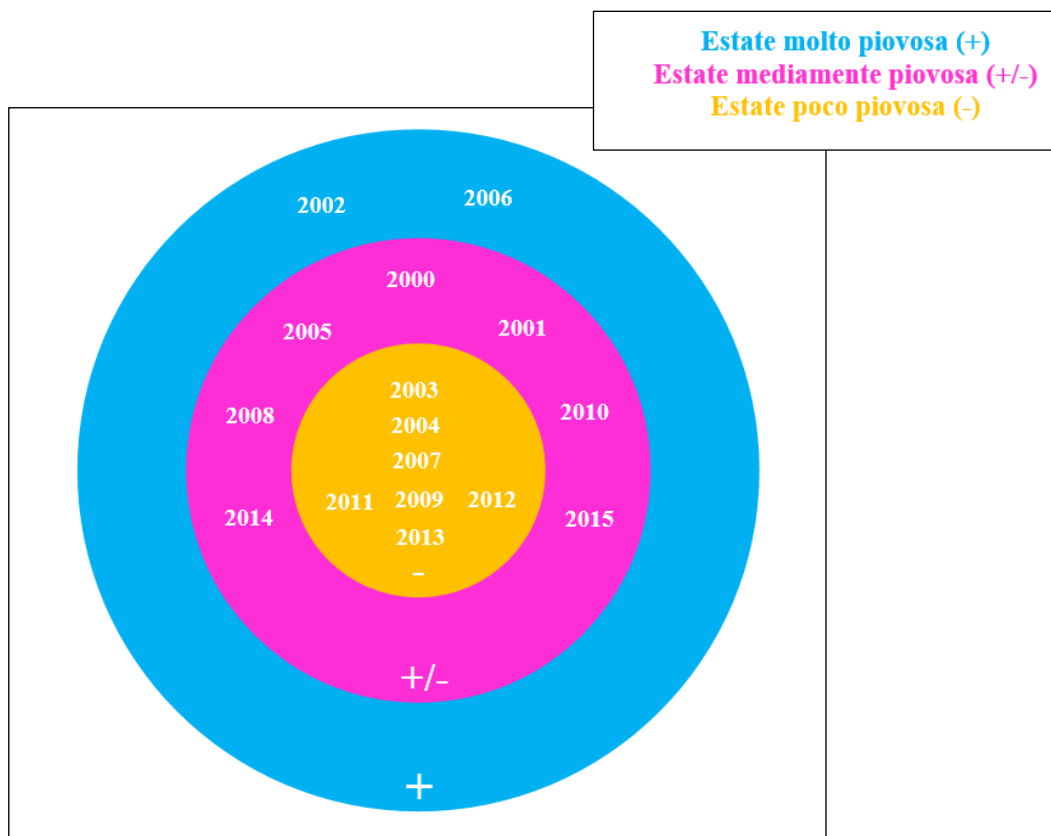


Figura 82-Diagramma a cerchi concentrici rappresentante la distribuzione dell'estate degli anni 2000-2015 all'interno delle tre classi di piovosità estive

La stagione estiva ha avuto precipitazioni molto abbondanti solo in 2 anni, mentre 7 anni su 16 hanno avuto un'estate poco piovosa. Gli anni con estate prossima al valor medio sono 7.

La maggior parte delle estati sono state anomale, prevalentemente spinte verso una riduzione del proprio carattere piovoso.

Classi di piovosità estive				
<b>Estate estremamente piovosa</b>	<b>365mm</b>	+ 40% di 261mm	<b>++</b>	<b>1 estate</b>
<b>Estate scarsamente piovosa</b>	<b>157mm</b>	- 40% di 261mm	<b>--</b>	<b>4 estati</b>

Tabella 18-Classi pluviometriche estive, che si discostano dal valor medio per più del 40%

Un terzo delle sedici estati considerate si colloca nelle classi pluviometriche estreme, superando e riducendo il proprio valore di precipitazione di oltre il 40% del valor medio, pari a 261mm.

L'estate si configura su Milano come una stagione da sempre molto variabile, poiché caratterizzata dalla formazione di nuclei temporaleschi che aumentano il bilancio pluviometrico stagionale con eventi intensi ma di breve durata, a cui si alternano quindi periodi di secco, tipici del caldo afoso milanese.

L'estate presenza una caratterizzazione verso una riduzione del proprio quantitativo stagionale di precipitazione cumulata.

#### 4.2.5.4 PRECIPITAZIONE CUMULATA IN AUTUNNO

Classi di piovosità autunnali			
Autunno molto piovoso	349mm	+20% di 291mm	+
Autunno mediamente piovoso	291mm	medio	+/-
Autunno poco piovoso	233mm	-20% di 291mm	-

Tabella 19-Classi pluviometriche autunnali

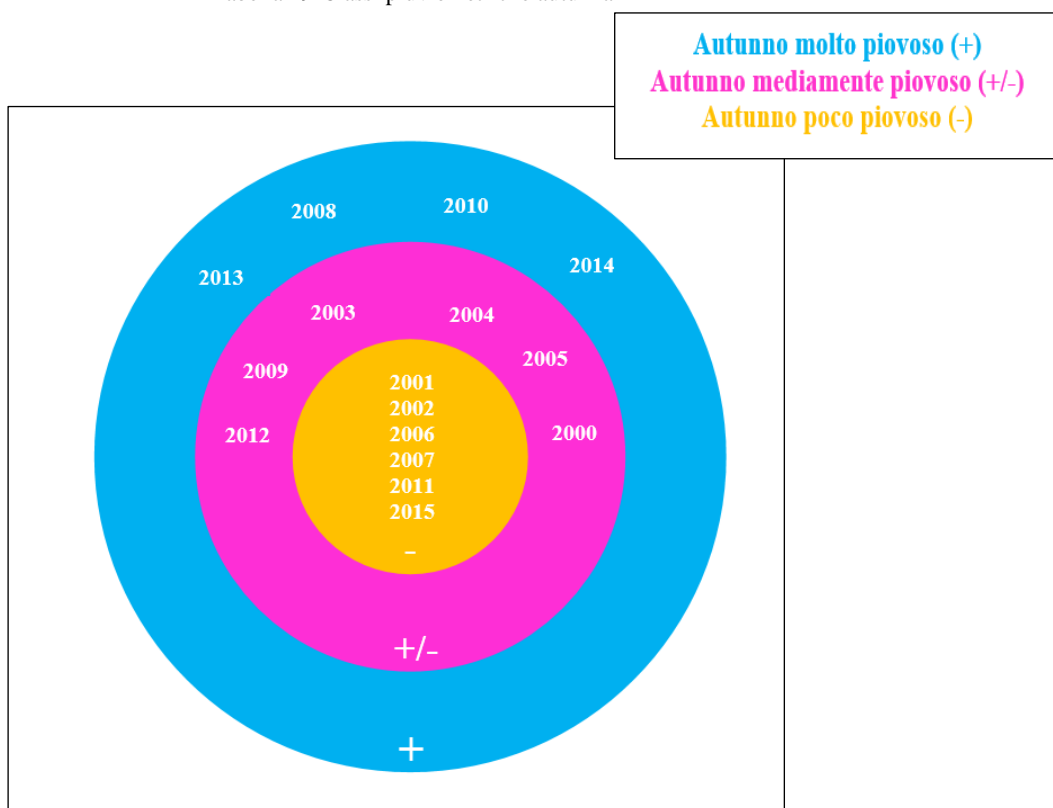


Figura 83-Diagramma a cerchi concentrici rappresentante la distribuzione dell'autunno degli anni 2000-2015 all'interno delle tre classi di piovosità autunnali

La stagione autunnale ha avuto precipitazioni molto abbondanti in 4 anni, mentre 6 anni su 16 hanno avuto un autunno poco piovoso. Gli anni con autunno prossimo al valor medio sono stati 6.

Un terzo delle stagioni autunnali si sono configurate come stagioni di media in termini di precipitazione totale stagionale.

### Classi di piovosità autunnali

<b>Autunno estremamente piovoso</b>	<b>407mm</b>	+ 40% di 291mm	<b>++ 2 aut.</b>
<b>Autunno scarsamente piovoso</b>	<b>175mm</b>	- 40% di 291mm	<b>-- 4 aut.</b>

Tabella 20-Classi pluviometriche autunnali, che si discostano dal valor medio per più del 40%

Sei stagioni autunnali su 16 appartengono alle classi estreme di piovosità: in particolare, anche l'autunno mostra una tendenza prevalente nel diminuire il proprio carattere precipitativo, poiché in sedici anni sono prevalsi gli autunni con piovosità minore del 20% rispetto alla media, in confronto con quelli più piovosi.

#### 4.2.6 CLASSI PLUVIOMETRICHE MENSILI

A seguire si analizza la precipitazione cumulata nei singoli mesi del periodo 2000-2015, suddividendo la precipitazione all'interno di ogni mese in classi di piovosità.

Le classi pluviometriche mensili sono state individuate come scostamento del 20% dal valor medio.

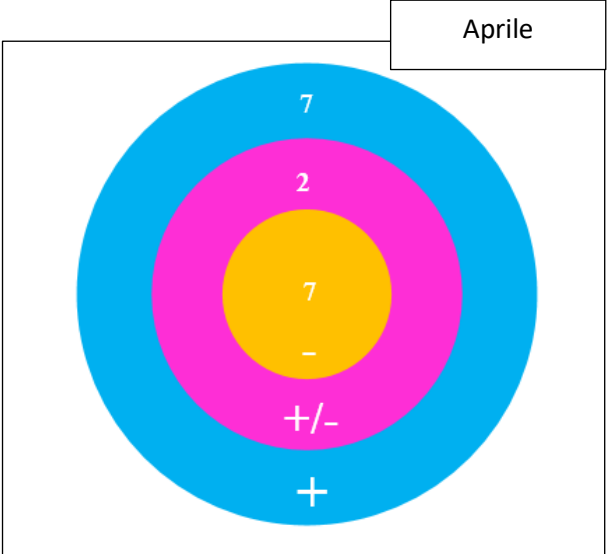
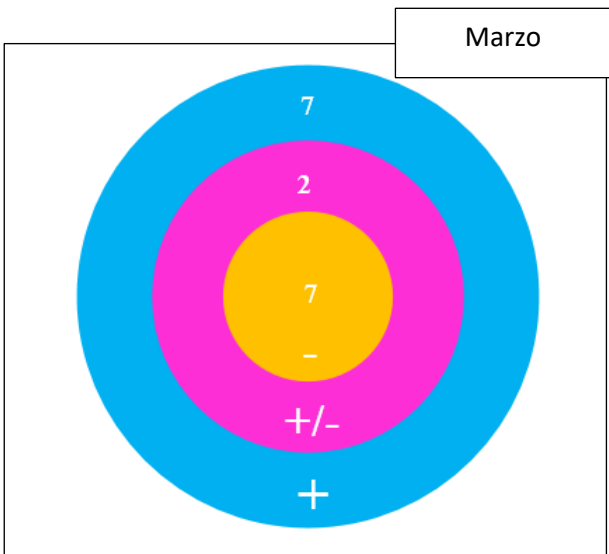
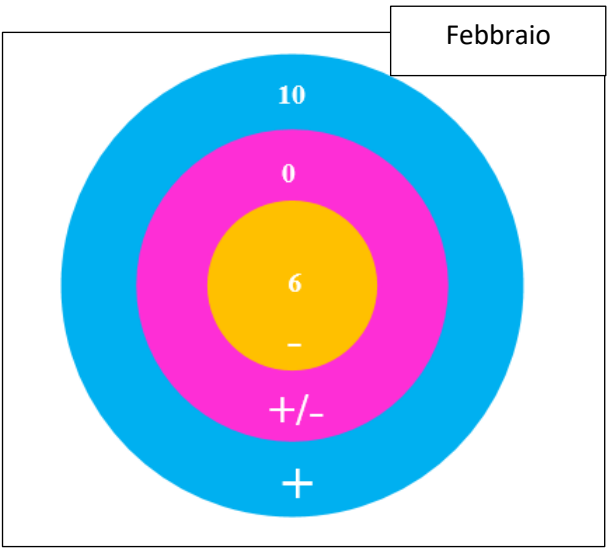
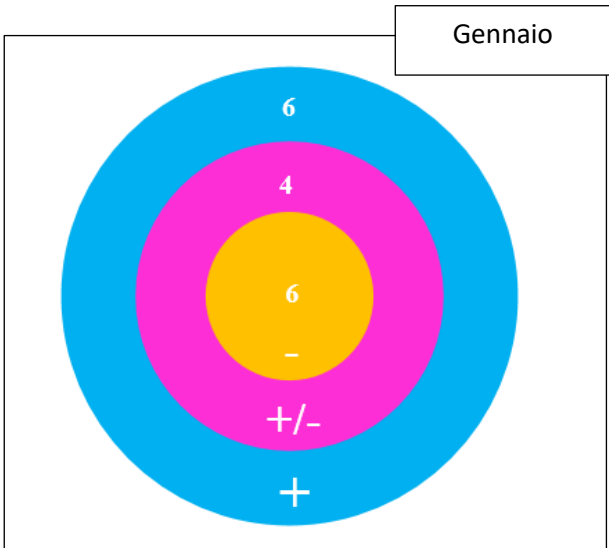
I valori medi considerati sono quelli riferiti al 1984-1999.

Mesi	<b>Mese molto piovoso (+)</b> +20% del valor medio mensile	<b>Mese mediamente piovoso (+/-)</b> Valor medio	<b>Mese poco piovoso (-)</b> -20% del valor medio mensile
Gennaio	67	56	45
Febbraio	43	36	29
Marzo	62	52	42
Aprile	103	86	69
Maggio	122	102	82
Giugno	106	88	70
Luglio	95	79	63
Agosto	95	79	63
Settembre	124	103	82
Ottobre	151	126	101
Novembre	118	98	78
Dicembre	80	67	54

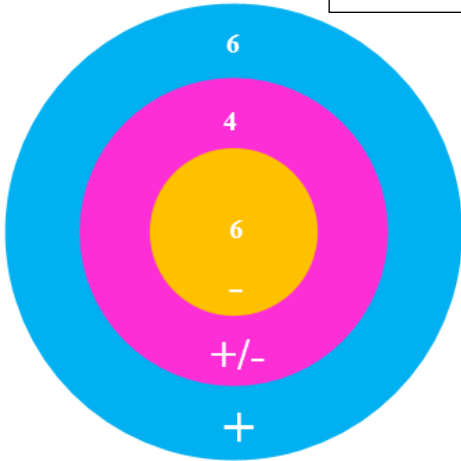
Tabella 21-Classi pluviometriche mensili

**LEGENDA**

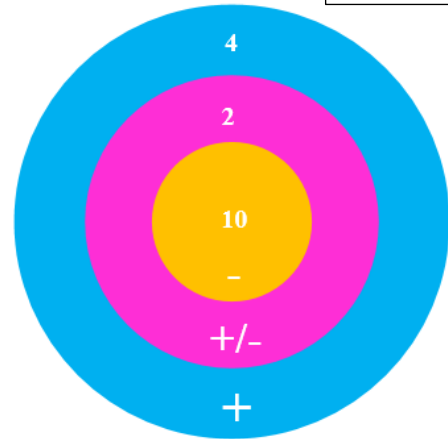
**Mese molto piovoso (+)**  
**Mese mediamente piovoso (+/-)**  
**Mese poco piovoso (-)**



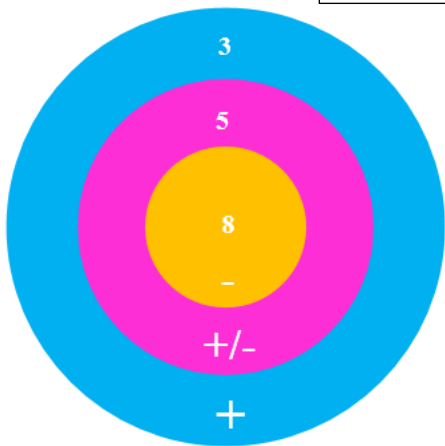
Maggio



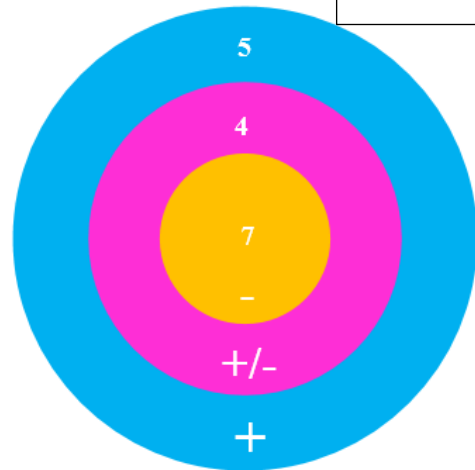
Giugno



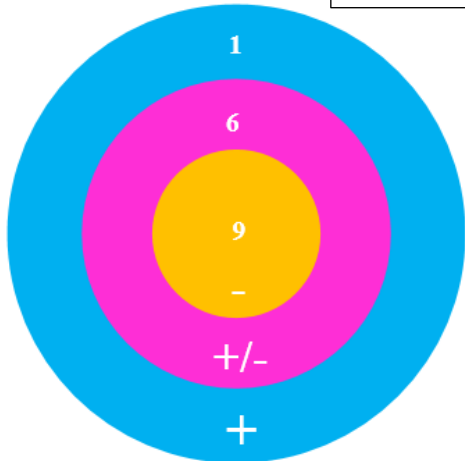
Luglio



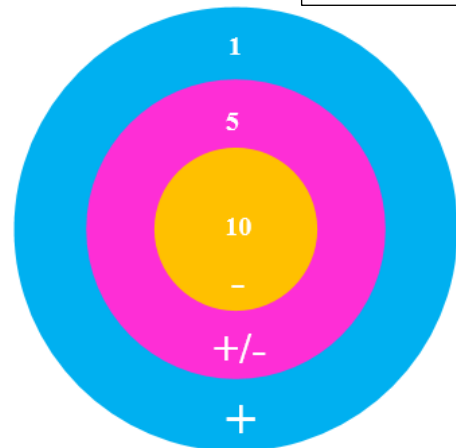
Agosto



Settembre



Ottobre



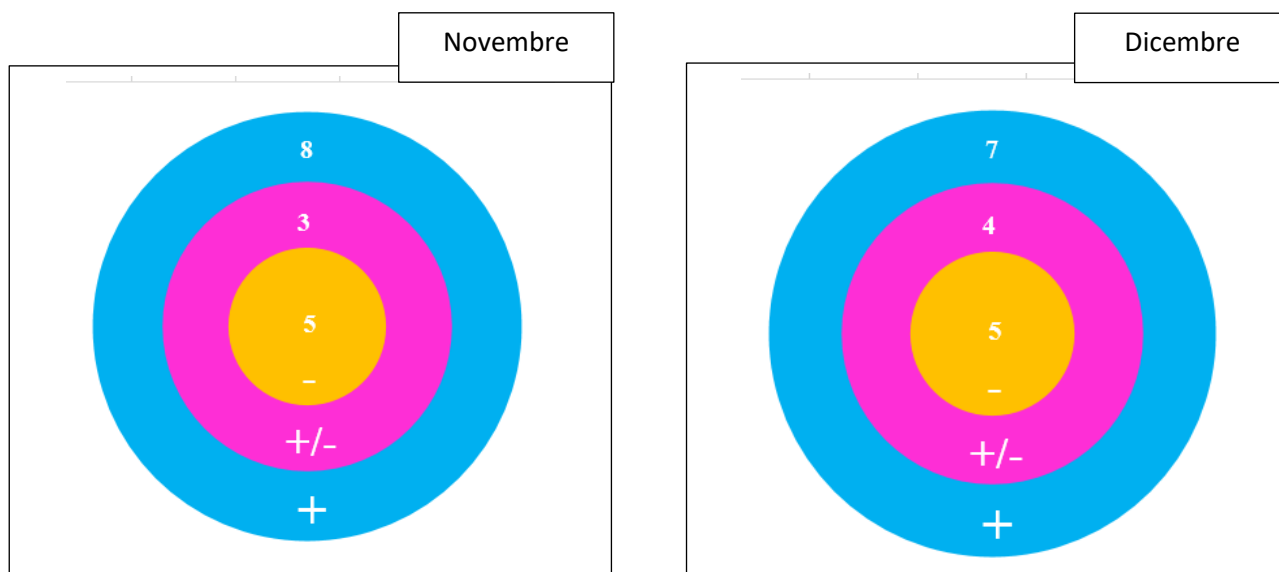


Figura 13 Diagramma a cerchi concentrici rappresentante la distribuzione dei mesi degli anni 2000-2015 all'interno delle tre classi di piovosità mensili

Attraverso l'uso dei diagrammi a cerchi concentrici si comprende quale sia stata la dispersione pluviometrica mensile (2000-2015) all'interno delle tre classi pluviometriche istituite.

Si osserva che la maggior parte dei mesi presenta una propensione nel classificarsi agli estremi pluviometrici: nessun mese si è presentato in sedici anni prevalentemente con il suo regime pluviometrico storico.

Risaltano in particolare il mese di febbraio che presenta una spiccata tendenza nel classificarsi come mese molto piovoso (10 anni su 16), il mese di novembre che nel 50% dei casi si è presentato come molto piovoso, al contrario di ottobre che ha drasticamente ridotto il proprio quantitativo pluviometrico.

I mesi di gennaio, marzo, aprile e maggio sono stati anch'essi al di fuori del range di piovosità medio mensile ma non hanno mostrato una evidenza marcata nell'aumentare o diminuire le proprie precipitazioni.

Da giugno a settembre si nota invece una predominanza di tali mesi nel diminuire le proprie precipitazioni.

Il mese di dicembre ha in media aumentato le proprie precipitazioni, presentandosi in 7 anni su 16 come mese molto piovoso.

Interessante è la tabella sotto riportata che mostra come la maggioranza dei mesi in questi ultimi sedici anni non solo ha superato in più o in meno il 20% del proprio regime mensile storico ma addirittura lo eccede del 40%.

	<b>Mese estremamente piovoso (++)</b>	<b>Mese scarsamente piovoso (--)</b>
Gennaio	5	5
Febbraio	9	5
Marzo	5	7
Aprile	6	4
Maggio	4	6
Giugno	2	6
Luglio	2	7
Agosto	3	7
Settembre	1	3
Ottobre	0	9
Novembre	7	4
Dicembre	3	5

Tabella 22-Classi pluviometriche mensili, che si discostano dal valor medio per più del 40%

In ultimo si riporta una tabella riassuntiva che evidenzia quali siano state le stagioni ed i mesi principalmente concorrenti alla classificazione pluviometrica degli anni. Con i colori rosso, blu e verde si vogliono indicare i tre anni che sono risultati come il più asciutto del periodo 2000-2015 (2003), il più piovoso (2014) ed un anno la cui distribuzione pluviometrica viene considerata “media” (2008).

<b>Classe di piovosità annuale</b>		<b>Stagione anomala</b>	<b>Mesi determinanti all'anomalia annuale</b>
<b>2000</b>	+/-	Autunno	Novembre
<b>2001</b>	-	Autunno	Ottobre/ novembre
<b>2002</b>	+	Inverno	Febbraio
<b>2003</b>	-	<b>Tutte</b>	<b>Tutti</b>
<b>2004</b>	+/-	Inverno	Febbraio/ marzo
<b>2005</b>	-	Primavera	Aprile
<b>2006</b>	-	Autunno	Ottobre/ novembre
<b>2007</b>	-	Autunno	Ottobre
<b>2008</b>	+	Autunno/ Inverno	Novembre/gennaio
<b>2009</b>	+/-	Inverno	Febbraio
<b>2010</b>	+	Autunno/ Inverno	Novembre/ febbraio
<b>2011</b>	-	Autunno	Ottobre
<b>2012</b>	+/-	Primavera	Aprile
<b>2013</b>	+	Inverno	Febbraio
<b>2014</b>	+	Autunno/Inverno	Novembre/ febbraio
<b>2015</b>	-	Autunno	Ottobre/ novembre

Tabella 23-Stagioni e mesi principalmente responsabili delle anomalie pluviometriche annuali riscontrate nel periodo 2000-2015



Nei paragrafi a seguire verranno proposte ulteriori considerazioni ed analisi di approfondimento sulla stagione invernale, poiché è risultata la stagione principalmente responsabile della piovosità anomala di questi ultimi sedici anni.

L'inverno si è configurato come l'unica delle quattro stagioni che ha totalmente cambiato il proprio regime pluviometrico.

#### 4.2.7 L'INVERNO COME PREDITTORI DELLA PIOVOSITA' ANNUALE

Durante le analisi condotte è stato osservato che il trimestre invernale ha avuto un'evidente influenza sulla precipitazione cumulata annuale, nel periodo 2000-2015.

Dalla tabella sotto riportata si nota come gli anni classificati come molto piovosi, siano stati preceduti da un inverno di abbondanti precipitazioni. Viceversa gli anni con scarsità d'acqua sono iniziati con una stagione invernale particolarmente secca.

Le definizioni qui usate di anni molto piovosi o poco piovosi si riferiscono sempre alle classi pluviometriche introdotte nei paragrafi precedenti.

<b>Anni molto piovosi</b>	<b>1166</b>	<b>+20%di972</b>	<b>+</b>
<b>Anni mediamente piovosi</b>	<b>972</b>	<b>medio</b>	<b>+/-</b>
<b>Anni poco piovosi</b>	<b>778</b>	<b>-20%di972</b>	<b>-</b>

Tabella 24-Classi pluviometriche annuali

<b>Inverno molto piovoso</b>	<b>173mm</b>	<b>+20%di144mm</b>	<b>+</b>
<b>Inverno mediamente piovoso</b>	<b>144mm</b>	<b>medio</b>	<b>+/-</b>
<b>Inverno poco piovoso</b>	<b>115mm</b>	<b>-20%di144mm</b>	<b>-</b>

Tabella 25-Classi pluviometriche invernali

Gli anni nella tabella seguente sono stati disposti dagli inverni più piovosi a quelli meno piovosi.

Sette inverni dei 9 che si sono classificati come molto piovosi sono stati predittore di anni con precipitazione abbondante. Tutti gli inverni poco piovosi sono stati predittore di anni con scarsità d'acqua. Gli inverni del 2001 e del 2006, che rientrano nel range medio di piovosità, sono stati considerati ugualmente come predittori della piovosità annuale, poiché, seppur non siano inferiori al 20% del valor medio invernali, ne sono comunque inferiori del 15%.

In più del 50% dei casi tale evidenza ha trovato conferma.

Si ritiene dunque che l'inverno abbia avuto un'influenza sull'andamento pluviometrico del periodo 2000-2015 e che ne sia stato un buon predittore al 75%.

Anni 2000-2015					
Anni	Tot. Inverno (mm)	Cl. pluviom. Invernale	Tot. Annuo (mm)	Cl. pluviom. Annua	Corrispondenza Inverno-Anno
2014	537	molto piovoso	1639	molto piovoso	Sì
2011	337	molto piovoso	549	poco piovoso	No
2013	332	molto piovoso	1250	molto piovoso	Sì
2004	318	molto piovoso	991	medio	Sì
2009	316	molto piovoso	1129	medio	Sì
2010	275	molto piovoso	1425	molto piovoso	Sì
2002	252	molto piovoso	1182	molto piovoso	Sì
2015	217	molto piovoso	778	poco piovoso	No
2008	204	molto piovoso	1245	molto piovoso	Sì
2001	132	medio	778	poco piovoso	Sì
2006	120	medio	730	poco piovoso	Sì
2007	89	poco piovoso	550	poco piovoso	Sì
2000	56	poco piovoso	1035	medio	No
2012	52	poco piovoso	1010	medio	No
2003	30	poco piovoso	351	poco piovoso	Sì
2005	9	poco piovoso	679	poco piovoso	Sì

Tabella 26-L'inverno come predittore della piovosità annuale

#### 4.2.8 CONFRONTO TRA TRIMESTRE INVERNALE ASTRONOMICICO E METERELOGICO

Nelle analisi condotte fino ad ora l'inverno è stato considerato come stagione astronomica, ovvero costituito dal trimestre "gennaio, febbraio e marzo". A seconda della teoria di riferimento, l'inverno può anche essere considerato come stagione meteorologica e dunque formato dal trimestre "dicembre, gennaio e febbraio", e in conseguenza le altre tre stagioni.

Esiste un'ulteriore definizione stagionale che è la definizione idrologica, dove il mese invernale di partenza è ottobre. Quest'ultima definizione non verrà approfondita in questo elaborato.

Per completezza e per verificare che variando la definizione teorica della stagione il risultato rimane invariato, si riportano delle tabelle di confronto delle due definizioni dell'inverno, preso a titolo di esempio anche per le altre stagioni.

<b>Inverno: Gennaio, Febbraio, Marzo</b>				
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Tot.
<b>MEDIA 1984-1999 (mm)</b>	60	34	50	<b>144</b>
<b>MEDIA 2000-2015 (mm)</b>	69	74	62	<b>205</b>
<b>Inverno: Dicembre, Gennaio, Febbraio</b>				
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Tot.
<b>MEDIA 1984-1999 (mm)</b>	57	60	34	<b>151</b>
<b>MEDIA 2000-2015 (mm)</b>	69	69	74	<b>211</b>

Tabella 27-Confronto tra il trimestre invernale meteorologico ed astronomico

<b>Inverno: Dicembre , Gennaio, Febbraio (mm)</b>				
Anni	Tot. Invernale	Molto piovoso	Medio	Poco piovoso
2000	56	No	Sì	Sì
2001	132	No	No	No
2002	252	Sì	No	No
2003	30	No	No	Sì
2004	318	Sì	No	No
2005	9	No	No	Sì
2006	120	No	No	Sì
2007	89	No	No	Sì
2008	204	Sì	No	No
2009	316	Sì	No	No
2010	275	Sì	No	No
2011	337	Sì	No	No
2012	52	No	No	Sì
2013	332	Sì	No	No
2014	537	Sì	No	No
2015	217	Sì	No	No

Tabella 28-Applicazione delle classi di piovosità al trimestre invernale "dicembre gennaio e febbraio"

Dal confronto riportato si osserva che, variando la definizione teorica dell'inverno, il risultato rimane invariato: la differenza tra i valori medi dei due periodi è ancora di 60mm.

La seconda tabella invece evidenzia quali e quanti anni abbiano o meno superato il 20% del valor medio di precipitazione, nel caso in cui si consideri l'inverno come stagione astronomica o meteorologica. Gli anni molto piovosi rimangono 9 su 16, gli anni poco piovosi sono diventati 6 al posto di 5 su 16.

Questo confronto è stato applicato anche alle restanti stagioni ed è particolarmente significativo poiché si conferma il carattere transitorio dei mesi di dicembre e marzo, che sono mesi traghettatori da una stagione alla successiva. E questo supporta i risultati fino ad ora individuati, che dipendono strettamente dalle anomalie nei mesi di gennaio e febbraio.

Nelle analisi a seguire le stagioni sono sempre considerate come astronomiche.

## 4.2.9 APPLICAZIONE DELLA STATISTICA DESCRITTIVA ALLA STAGIONE INVERNALE

Obiettivo di questo paragrafo è la valutazione della significatività dei trend delle anomalie di precipitazione sul trimestre invernale del periodo 2000-2015.

Sono stati valutati degli indici di statistica descrittiva sui valori di precipitazione invernale e sono state svolte le seguenti operazioni:

- Analisi di regressione lineare, con verifica delle ipotesi di validità;
- Valutazione della significatività dell'analisi tramite la statistica F.

### *Indici statistici*

Dalla valutazione dei massimi pluviometrici per il mese di gennaio, febbraio e marzo si osserva che essi appartengono tutti all'anno 2014, che come già visto, è stato l'anno più piovoso dal 1984. Eliminando dalla serie il 2014 ci si chiede se l'anomalia invernale persista o se essa sia influenzata dai valori di massima di tale anno.

Si conclude che, avendo eliminato il 2014, l'estrema variabilità della serie rimane e la differenza tra la media pluviometrica sul periodo 2000-2015 e il valor medio di confronto 1984-1999, di 144mm/stagionali, è di 39mm.

Applicando alla serie 2000-2015, senza il 2014, le definizioni di classe pluviometriche prima introdotte, si osserva che il valor medio stagionale in questi quindici anni è comunque superiore al 20% della precipitazione media storica, essendo pari a 183mm/stagionali.

Questo vuol dire che il 2014 non influisce sulla tendenza pluviometrica di questi quindici anni, poiché l'anomalia invernale rimane, ed è concentrata nel mese di febbraio.

La stagione invernale conferma la sua definizione di "stagione molto piovosa".

<b>Serie 2000-2015: INVERNO</b>				
	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>	<b>Tot. Stagionale</b>
<b>Media (mm)</b>	69	74	62	205
<b>Mediana (mm)</b>	53	58	43	210
<b>Valore Massimo (mm)</b>	260	188	200	538
<b>Valore Minimo (mm)</b>	2	0	0	9
<b>Campo variazione (mm)</b>	258	188	200	528
<b>Dev. Standard (mm)</b>	64	63	58	145
<b>Varianza (mm<sup>2</sup>)</b>	4085	4016	3407	21131

Tabella 29-Indici di statistica descrittiva Inverno 2000-2015

<b>Serie 2000-2015, senza il 2014 (mm)</b>				
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Tot. Stagionale
<b>2000-2015, senza 2014</b>	56	66	60	183
<b>Media 1984-1999</b>	56	36	52	144
<b>Differenza</b>	0	30	8	39

Tabella 30-Valori medi della precipitazione cumulata nel trimestre invernale 2000-2015, senza il massimo contributo del 2014

### *Analisi di regressione lineare*

Viene ora condotta l'analisi di regressione lineare sul trimestre invernale (gennaio, febbraio e marzo) del periodo 2000-2015.

L'obiettivo è quello di verificare la presenza di un trend pluviometrico nel periodo 2000-2015, che sia significativo non solo dal punto di vista fisico, come riscontrato fino ad ora, ma anche statistico.

L'analisi di regressione applicata è una tecnica usata per analizzare una serie di dati, in questo caso pluviometrici, che consistono in una variabile dipendente e una variabile indipendente.

L'analisi è fondamentale per poter comprendere, anche visivamente, se siano o meno presenti dei trend di precipitazione che, per analisi più approfondite, potrebbero essere il punto di partenza per prevedere l'andamento futuro della stessa, sulla città di Milano.

L'applicazione dell'analisi di regressione deve essere preceduta dalla verifica di due ipotesi di validità, che hanno lo scopo di verificare, tramite l'analisi grafica, l'applicabilità dell'analisi di regressione:

- residui con media zero e varianza omogenea;
- indipendenza dei residui.

La verifica della validità delle ipotesi tramite l'analisi grafica dei residui permette di evidenziare in modo semplice se esistano violazioni delle ipotesi di validità.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per la stagione invernale.

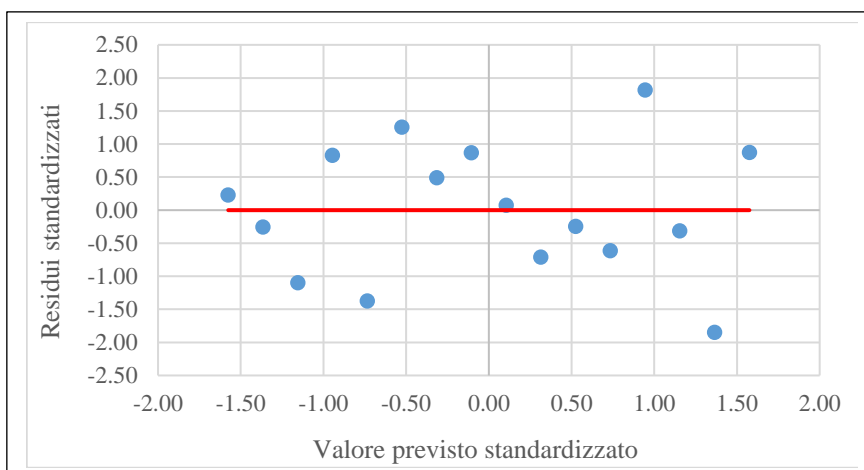


Figura 85-Verifica ipotesi I, trimestre invernale 2000-2015

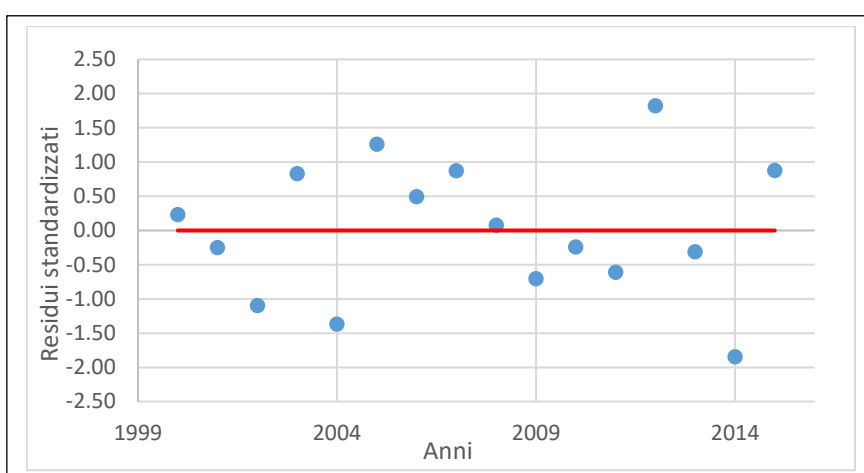


Figura 86-Verifica ipotesi II, trimestre invernale 2000-2015

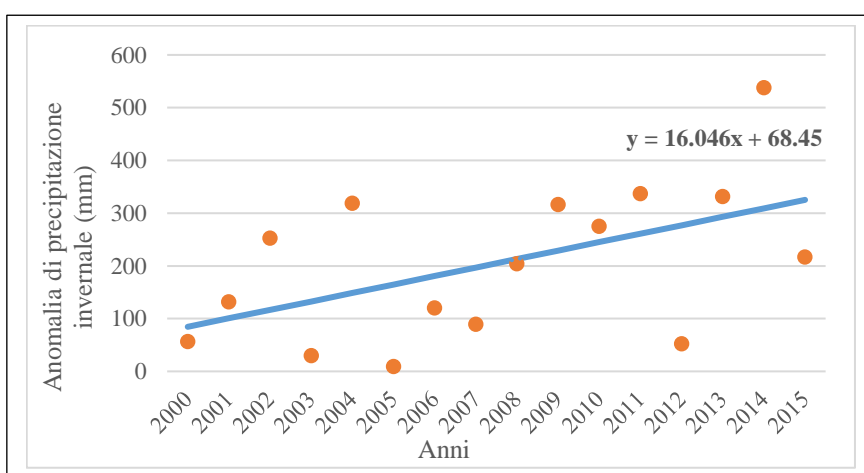


Figura 87-Retta di regressione trimestre invernale 2000-2015

Nella verifica della prima ipotesi è stato rappresentato l'andamento dei residui (differenza tra i valori di anomalia pluviometrica ed i punti della retta di regressione) rispetto ai punti della stessa retta. Entrambi, i residui e i punti della retta di regressione, sono stati standardizzati rispetto alla propria media ed alla propria deviazione standard.



Per la verifica della seconda ipotesi sono stati rappresentati i residui standardizzati in funzione del periodo temporale di riferimento, 2000-2015.

Le ipotesi di validità hanno confermato l'applicabilità dell'analisi di regressione: i residui presentano media nulla, varianza omogenea e non sono autocorrelati.

Osservando l'andamento dell'anomalia di precipitazione invernale rispetto al periodo di riferimento si conferma la presenza di un trend crescente della precipitazione invernale cumulata a Milano.

La retta di regressione, che presenta coefficiente angolare positivo, esprime bene la relazione tra le due variabili considerate: la precipitazione nel trimestre invernale del periodo 2000-2015 si rivela crescente nel tempo.

Si conclude che, anche dal punto di vista statistico, l'anomalia invernale si conferma ed è ritenuta consistente: l'inverno negli ultimi quindici ha presentato una tendenza reale e significativa. È presente un vero trend pluviometrico, orientato verso l'aumento della precipitazione invernale a Milano.

#### *Valutazione della significatività dell'analisi tramite la statistica F*

La valutazione della significatività dell'analisi tramite la statistica F ha lo scopo di valutare se la tendenza di aumento della precipitazione invernale, negli ultimi sedici anni, siano statisticamente significative.

Significatività statistica vuol dire che la relazione che esiste tra le variabili, determinata nel campione, esiste anche nella popolazione e quindi non è effetto probabile di variazioni casuali del campione.

Il test viene preceduto da una verifica per valutarne l'applicabilità. Tale ipotesi consiste nel verificare che i residui siano distribuiti normalmente e per la sua verifica sono stati realizzati dei grafici di confronto tra l'istogramma dei residui e la curva di distribuzione normale, con la stessa media e deviazione standard dei residui. I residui sono stati divisi in 13 classi.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

#### *Inverno-Normalità dei residui*

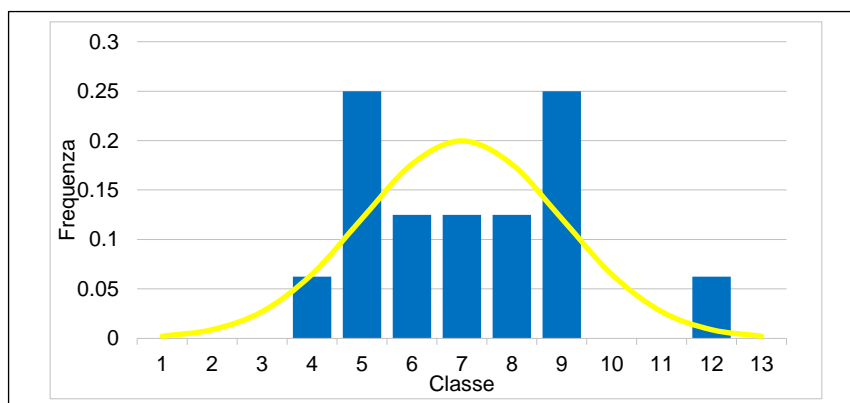


Figura 88-Verifica della normalità dei residui, trimestre invernale 2000-2015

Dalla costruzione grafica dell'istogramma si nota come la distribuzione presenti buona simmetria rispetto alla propria media, e come rispecchi l'andamento della distribuzione normale.

L'inverno presenta una buona simmetria centrale.

Si considera l'ipotesi di normalità soddisfatta e dunque si procede con il test d'ipotesi.

### Statistica F

Il test F è basato sulla scomposizione delle devianze, che rappresentano nient'altro che la somma dei quadrati delle distanze.

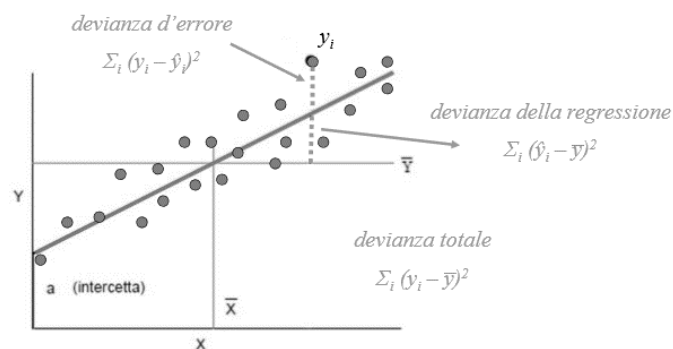


Figura 93-Devianze statistiche

La statistica F è data allora dal rapporto tra la devianza di regressione e la devianza di errore:

$$F = \frac{\text{Devianza della regressione}}{\text{Devianza d'errore}}$$

Per l'applicazione del test è necessario considerare anche i gradi di libertà 1 e 2: i primi sono necessari per il calcolo della devianza della regressione e sono in numero pari ad 1, mentre i secondi, necessari per il calcolo della devianza d'errore sono pari al numero di osservazioni indipendenti meno due.

L'ipotesi su cui si basa il test è la seguente:  $H_0: \text{media} = 0$ ,  $H_a: \text{media} \neq 0$ .

L'ipotesi nulla afferma che non esiste nessun legame tra la variabile dipendente (precipitazione, mm) e la variabile indipendente (anni) e viene rifiutata se:  $F_{calcolata} > F_{critico}$ , assumendo un livello di significatività  $\alpha = 0.05$ .

In particolare l'ipotesi nulla è rappresentativa del fatto che il coefficiente angolare della retta di regressione sia uguale a zero: questo vorrebbe dire che al variare degli anni, la precipitazione resta costante e uguale al valore di intercetta e dunque non esiste alcun legame tra precipitazione ed anni.

Al contrario il rifiuto dell'ipotesi nulla implica che al variare degli anni si ha una corrispondente variazione sistematica della precipitazione.

Test F: $\alpha=0.05$ , $H_0$ : media=0						
Periodo temporale	Mesi considerati	Gradi di libertà 1	Gradi di libertà 2	F <sub>calcolata</sub>	F <sub>critico</sub>	H <sub>0</sub> rifiutata?
<b>2000-2015 INVERNO</b>	Gennaio, Febbraio, Marzo	1	14	5.35	0.0041	Sì

Tabella 31-Statistica F e applicazione del test

L'ipotesi nulla viene rifiutata e dunque è necessario affermare che al variare degli anni considerati si ha una corrispondente variazione sistematica della precipitazione. Questo vuol dire che la varianza spiegata dal modello di regressione, qui utilizzato, non è casuale e che la tendenza stagionale, supposta fino ad ora, sia significativa, con una probabilità di aver rifiutato erroneamente  $H_0$  pari a 0.05.

Il risultato della stagione invernale non desta alcun dubbio: la statistica F calcolata è nettamente superiore a quella critica, di circa 3 ordini di grandezza.

In conclusione si afferma che l'aumento di precipitazione nella stagione invernale degli ultimi sedici anni è significativa al livello prefissato di significatività.

#### *Considerazioni aggiuntive*

Vista l'importanza dei risultati prodotti a riguardo dell'anomalia invernale, di cui non si aveva sospetto, si è pensato di andare a verificare su una serie storica estremamente lunga se le estremizzazioni degli eventi di pioggia degli ultimi sedici anni confermino il loro carattere anomalo o se siano frutto di una ciclicità pluviometrica.

In particolare recuperando i valori pluviometrici a partire dal 1764, tramite gli archivi dell'osservatorio di Brera, si è avuta una conferma dell'anomalia esclusiva di quest'ultimo periodo. Tale confronto viene però condotto solo sulla base della distribuzione pluviometrica della precipitazione invernale e autunnale e non verrà approfondita né a livello fisico né a livello statistico in questo elaborato.

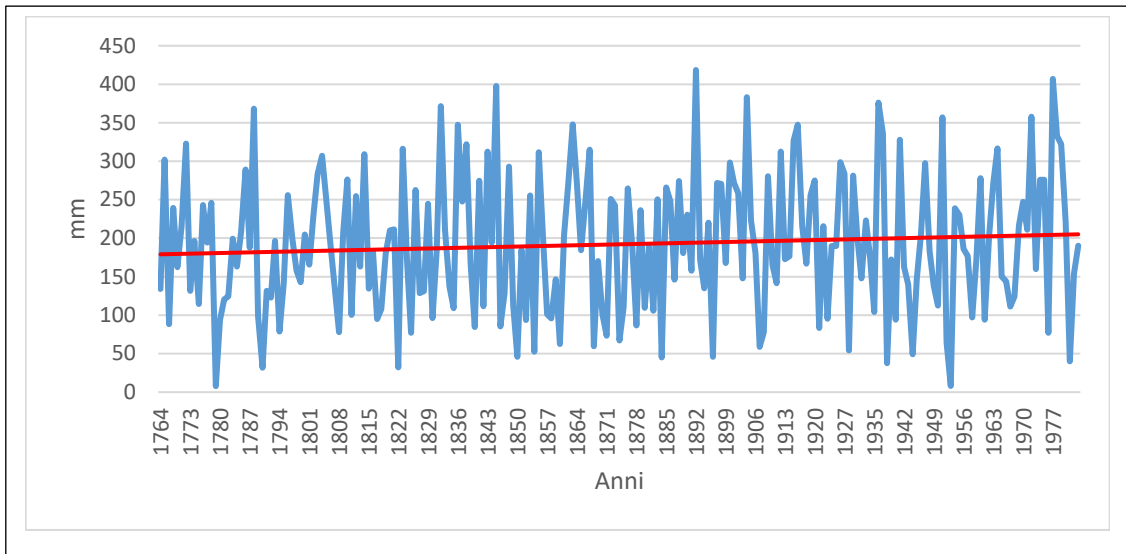


Figura 89-Precipitazione cumulata invernale, 1764-1983

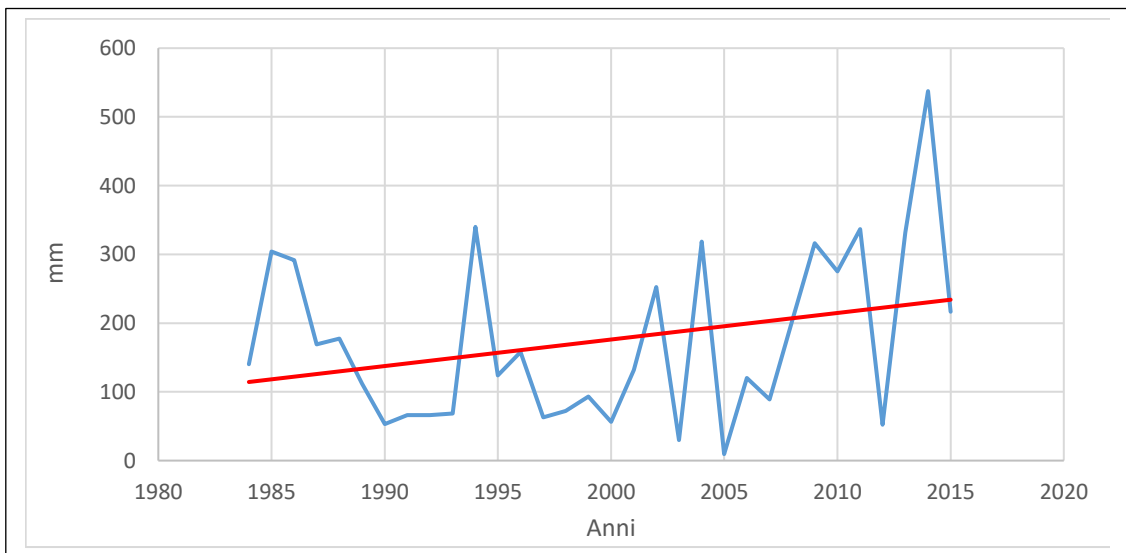


Figura 90-Precipitazione cumulata invernale, 2000-2015

L'anomalia invernale risulta particolarmente significativa: guardando la precipitazione cumulata nel trimestre invernale a partire dal 1764 si può affermare, tramite analisi grafica, che si tratti di una serie stazionaria. A partire dall'anno 2000 si ha un vero trend di incremento della precipitazione invernale.

<b>Inverno</b>				
<b>Periodo</b>	<b>Valore massimo (mm)</b>	<b>Valore minimo (mm)</b>	<b>Campo variazione (mm)</b>	<b>Dev. Standard (mm)</b>
1764-1983	419	8	411	89
1984-2015	538 (2014)	9	528	124
<b>Precipitazione annuale</b>				
<b>Periodo</b>	<b>Valore massimo (mm)</b>	<b>Valore minimo (mm)</b>	<b>Campo variazione (mm)</b>	<b>Dev. Standard (mm)</b>
1764-1983	1578	427	1151	196
1984-2015	1639 (2014)	351 (2003)	1288	261

Tabella 32-Valore massimo, minimo, Campo variazione e Dev. standard dei periodi 1764-1983 e 1984-2015

La seguente tabella mostra in sintesi alcune osservazioni che sono risultate evidenti.

Dal 1764 al 2015 il massimo valore cumulato invernale di precipitazione appartiene agli ultimi sedici anni, ed in particolare coincide con il 2014, che già era stato notato nei paragrafi precedenti, per essere stato un anno estremamente piovoso.

In termini di precipitazione annuale gli anni di massima e di minima sono risultati di nuovo appartenenti agli ultimi sedici anni, 2014 e 2003.

La differenza tra il massimo ed il minimo è nettamente maggiore nel periodo 2000-2015.

Non è dunque possibile andare a effettuare confronti statistici tra serie temporali di lunghezza differente, ma si conclude che a livello visivo e fisico gli ultimi trentadue anni, ed in particolare il nuovo millennio, si configurino estremamente interessanti e ricchi di anomalie, che non trovano conferma nei periodi precedenti. Si consideri inoltre un margine d'errore più ampio per il periodo 1764-1983, poiché i dati derivano da indagini storiche e strumentazione con livelli di precisione inferiore.

#### **4.2.10 CONCLUSIONE PARTE DI ANALISI I**

L'andamento della precipitazione negli ultimi quindici anni è stato anomalo e non presenta una precisa correlazione tra un anno ed il successivo.

Le distribuzioni di precipitazione sono differenti da anno in anno e gli anni di questo intervallo temporale presentano un'estremizzazione degli eventi di pioggia, o in termini di abbondanza o di scarsità.

Il valore medio con cui sono stati confrontati gli ultimi quindici anni è relativo al periodo 1984-1999. L'analisi degli anni dal 1984 al 1999 ha evidenziato come questi abbiano presentato in media un andamento pluviometrico in perfetto accordo con il regime pluviometrico transizionale storico di Milano. Infatti la serie 1984-1999 (16 anni) è considerata rappresentativa del regime pluviometrico di Milano poiché:

- il valore cumulato annuo è compreso tra i 900 ed i 1000mm;
- i massimi annuali sono, come da teoria, autunno e primavera;
- i due mesi più piovosi sono ottobre e maggio;
- l'inverno è un minimo assoluto, sia come valori mensili sia stagionale.

Per questo motivo è stato possibile utilizzare tali valori come valori medi storici con cui confrontare l'andamento pluviometrico nel periodo 2000-2015, al fine di identificarne eventuali affinità ed anomalie.

Analizzando i valori cumulati di pioggia della serie 2000-2015 (16 anni) si è osservato che questa non è assolutamente in accordo con il regime pluviometrico medio.

Il nuovo regime pluviometrico di Milano si è ridotto quantitativamente rispetto alla media di un valore trascurabile ma la distribuzione stagionale è variata.

In particolare è risultato che a livello quantitativo il regime medio di questi sedici anni è prossimo a quello medio: 958mm contro i 972mm della serie precedente. Il valore medio di 958mm/annuali non è però il risultato di una serie di anni con regime pluviometrico prossimo a quello medio bensì deriva da una media di anni con abbondanti precipitazioni e anni con scarsità d'acqua. È aumentata la variabilità della precipitazione di questi anni.

In questi ultimi sedici anni si è avuta un'estremizzazione degli eventi di pioggia, che rende privo di significato il valor medio, sia esso annuale o stagionale, poiché è aumentata la dispersione attorno alla media.

Tale osservazione è stata confermata attraverso l'introduzione delle classi di piovosità, riferite al superamento o al decremento del 20% della precipitazione a livello annuo o stagionale. A livello annuale 12 anni su 16, nel periodo 2000-2015, si sono allontanati dal valor medio annuale di oltre il 20%. Si è riscontrata una maggioranza di anni con scarsità d'acqua.

A livello stagionale è risultato che:

- i massimi sono sempre autunno e primavera, ma hanno ridotto i propri valori cumulati;
- il massimo autunnale si è spostato a novembre;
- l'estate ha ridotto la propria precipitazione di circa 42mm;
- l'inverno ha bruscamente aumentato la pioggia cumulata stagionale di oltre 61mm.

Autunno, primavera, estate hanno ridotto la propria precipitazione a scapito dell'inverno che l'ha aumentata. In particolare, mentre i massimi stagionali mantengono il loro primato, la differenza tra estate e inverno si è ridotta a tal punto da non poter più parlare di minimo assoluto invernale su Milano.

A livello mensile è aumentato lo scarto tra i mesi molto piovosi e poco piovosi, rispetto all'andamento mensile medio del periodo di sedici anni precedente: i mesi piovosi hanno nettamente aumentato il proprio carattere, mentre quelli con scarsa precipitazione lo hanno ulteriormente ridotto.

Gennaio, marzo, aprile e maggio sono stati anch'essi al di fuori del range di piovosità medio mensile ma non hanno mostrato un'evidenza marcata nell'aumentare o diminuire le proprie precipitazioni.

Da giugno a settembre le precipitazioni si sono ridotte sensibilmente.

Il mese di dicembre, a chiusura dell'anno, ha in media aumentato le proprie precipitazioni.

In ultimo si è osservato che l'andamento invernale è correlato con quello annuale: ad inverni molto piovosi sono seguiti anni di abbondante precipitazione, ad inverni asciutti sono corrisposti anni di scarsità d'acqua. L'inverno si è rivelato un buon predittore della precipitazione annuale al 75%.

L'evidenza osservata consente di sfruttare le caratteristiche stagionali per previsioni annuali.

L'anomalia invernale è considerata significativa e degna di approfondimento, poiché presenta la singolarità quantitativa e qualitativa più evidente, accompagnata anche da un abbondante aumento di giorni piovosi rispetto alla media. Le altre tre stagioni hanno sempre avuto un carattere pluviometrico marcato a Milano, mentre l'inverno da minimo assoluto annuale sta assumendo caratteri evidentemente più autunnali che invernali.

L'anomalia invernale osservata è stata verificata non solo considerando l'inverno come stagione astronomica (gennaio, febbraio e marzo) ma anche meteorologica. Se si considera dicembre al posto di marzo, come mese del trimestre invernale, l'anomalia, rimane ed anzi conferma che è innegabile. Per il trimestre dicembre-febbraio, i valor medio di precipitazione è pari a 151mm nel periodo 1984-1999 e quello relativo al quindicennio 2000-2015 è superiore di 60mm.

Il fatto che, considerando dicembre al posto di marzo, la differenza tra i due periodi si confermi dello stesso ordine di grandezza è un'ulteriore conferma del fatto che marzo e dicembre, siano mesi “di

transizione”, poiché di passaggio tra una stagione e l’altra, e che l’anomalia invernale è imputabile ai mesi di gennaio e febbraio.

Variando la definizione teorica dell’inverno, il risultato rimane invariato e si conferma forte.

L’anomalia invernale è stata approfondita attraverso un’analisi di regressione lineare per renderle consistente anche dal punto di vista statistico.

L’analisi di regressione ha evidenziato e confermato la presenza di un innegabile trend pluviometrico sul trimestre invernale.

A seguire è stato applicato un test, sfruttando la statistica F, per valutare se il trend osservato sia stato o meno consistente dal punto di vista statistico: il test ha prodotto risultati positivi e dunque l’anomalia è risultata significativa al livello di significatività applicato.

Si conclude che, ad ora, il regime medio annuo degli ultimi sedici anni ha mantenuto le caratteristiche del regime pluviometrico delle medie latitudini, ma ha perso il carattere prettamente transizionale per acquistare un regime di tipo oceanico. Quest’ultimo prevede piogge sparse in tutte le stagioni, portate dai venti marittimi di origine atlantica con massimo in autunno.

Considerando separatamente invece gli anni di massima e di minima, nel periodo 2000-2015, si osserva che i primi tendono ad avere piogge sparse in tutte le stagioni (regime oceanico) e che i secondi seguano un regime sub-tropicale, dove si ha assenza di precipitazione ad eccezione che in un’unica stagione, nei casi in questione l’autunno.

I risultati discussi presentano un aspetto preoccupante: l’alternanza di anni a forte piovosità e anni di carenza d’acqua procurano alla città di Milano crisi alluvionali più frequenti del passato e crisi siccitose impegnative, con conseguenze sociali, economiche ed ambientali.

Di seguito si approfondiscono le anomalie pluviometriche invernali dei tre anni identificati come il più piovoso (2014), l’anno medio (2008) ed il più asciutto (2003) dal 1984. Questi tre anni sono stati approfonditi dal punto di vista climatologico.



## **CAP. 5 DATI – 5.1 ANALISI DEI DATI II**

In questa seconda parte di analisi vengono approfondite le anomalie circolatorie invernali riferite agli anni 2014, 2008 e 2003.

Essendosi classificati come l'anno più piovoso, mediamente piovoso e più asciutto dal 1984 questi tre anni vengono approfonditi a "esempio" di tutti quelli che hanno avuto la loro stessa classificazione pluviometrica nelle analisi sopra.

In particolare l'anno 2014 e l'anno 2003 sono risultati il più piovoso ed il più asciutto a Milano dal 1764.

Lo scopo di questo approfondimento è arrivare a valutare quale sia stata la relazione tra la precipitazione tipica caduta in questi trimestri invernali con le circolazioni atmosferiche di passaggio su Milano e che sono state responsabili delle anomalie di precipitazione.

I parametri utilizzati per svolgere questa seconda parte di analisi sono precipitazione, temperatura e pressione atmosferica. Si è associata la definizione di giorno piovoso a quella di bassa pressione. Dall'andamento della pressione atmosferica nei trimestri invernali è stato possibile identificare quali siano stati i giorni in cui si sono verificate le anomalie pluviometriche più consistenti.

A partire da tali giorni sono state analizzate le mappe dei geo-potenziali a 500hPa ed 850hPa, che sono le più indicate per il tipo di analisi che si vuole condurre.

La prima, essendo ubicata nella media troposfera, si presta molto bene a descrivere le caratteristiche del moto medio d'insieme dei sistemi troposferici responsabili dell'evoluzione del tempo a scala sinottica: direzione e velocità dei fronti e dei sistemi nuvolosi, depressioni mobili, gocce fredde, anticicloni dinamici, anticicloni di blocco. La seconda, essendo la più vicina al suolo, descrive abbastanza bene i fenomeni dinamici termici che avvengono in prossimità del terreno: depressioni orografiche, fronti, avvezioni orizzontali di aria fredda o calda e loro ubicazione.

Alle mappe del geo-potenziale sono state abbinare altre due mappe: la mappa di precipitazione e le traiettorie delle circolazioni che hanno insistito su Milano nei giorni anomali individuati.

Quest'ultime sono state individuate con il programma Hi-split, impostando le coordinate di Milano.

Al termine delle analisi circolatorie è stata proposta un'interpretazione che correla la precipitazione anomala con le circolazioni che si sono verificate.

## 5.2 ANALISI CLIMATOLIGICA DEGLI ANNI 2014, 2008, 2003

Il 2003 e 2014 rappresentano, sulla base della analisi prima condotte, l'anno più asciutto e più piovoso dal 1984.

Il 2003 presenta un'anomalia negativa di precipitazione che lo associa alla definizione di anno "siccitoso", con soli 351 mm di pioggia caduti su Milano, dal primo gennaio al 31 dicembre 2003. Con tale valore il 2003 è stato l'anno più asciutto a Milano dal 1984 ad oggi.

Il 2014 presenta un'anomalia positiva di precipitazione, con un valore cumulato totale ed annuale pari a 1639 mm caduti su Milano, dal primo gennaio al 31 dicembre 2014. Il 2014 è stato l'anno più piovoso a Milano dal 1985 ad oggi.

L'anno 2008 viene analizzato poiché è stato valutato come quell'anno, all'interno del quindicennio, che più si avvicina all'anno pluviometrico medio. Il 2008 è stato il quinto anno più piovoso dal 1984: in termini quantitativi esso presenta un valore quantitativo di precipitazione superiore alla media ma l'andamento qualitativo della stessa rispecchia i massimi ed i minimi annuali di precipitazione. Il valore di precipitazione cumulata nel 2008 a Milano è pari a 1245 mm, ovvero circa 250 mm in più rispetto al valore medio di 972mm.

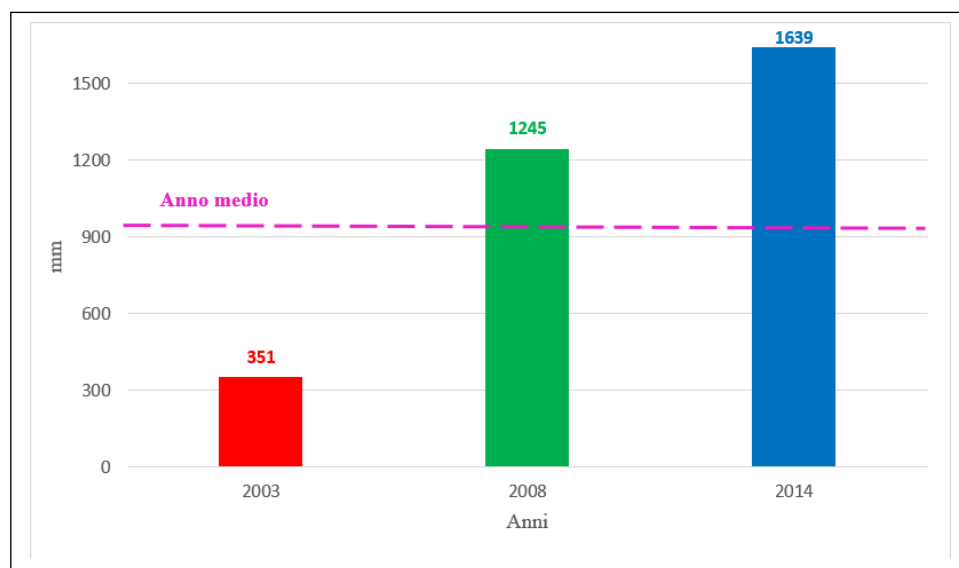


Figura 91-Precipitazione cumulata annuale (2014,2008,2003) e scostamento dal valor medio

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Tot.
mm					
<b>Anno medio</b>	<b>144</b>	<b>276</b>	<b>261</b>	<b>291</b>	<b>972</b>
<b>2014</b>	<b>537</b>	<b>287</b>	<b>303</b>	<b>512</b>	<b>1639</b>
<b>2008</b>	<b>204</b>	<b>408</b>	<b>232</b>	<b>402</b>	<b>1245</b>
<b>2003</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>315</b>	<b>351</b>

Tabella 33-Contributi stagionali alla precipitazione cumulata (2014,2008,2003 ed anno pluviometrico medio)

Di tali anni viene approfondita l'anomalia invernale con un'analisi climatologica e circolatoria. Tutti e tre gli anni hanno presentato una correlazione tra la piovosità invernale ed annuale: si considera che la stagione invernale sia stata predittore delle anomalie annuali. Questi anni vengono presi come campioni degli anni molto piovosi, medi e poco piovosi per identificare quali possano essere state le circolazioni atmosferiche che hanno determinato le anomalie pluviometriche fin qui discusse.

## 5.3 ANALISI CLIMATOLOGICA DELL'ANNO 2014

### 5.3.1 INTRODUZIONE

L'anno 2014 è ricordato come “anno tutto alla rovescia”. La definizione deriva dal fatto che il 2014 ha presentato condizioni meteo-climatiche anomale in tutte le sue quattro stagioni, in Italia, ma soprattutto nell'Italia del Nord e con protagonista la stessa Pianura Padana.

Il 2014 ha esordito con un inizio d'anno mite e molto piovoso in cui la città di Milano è stata colpita da intensa precipitazione. È continuato proponendo una primavera piovosa e un'estate fresca ed estremamente piovosa, in cui il 15 agosto non sono mancati i fiocchi di neve alle porte dei rifugi alpini. L'autunno è stato ancora estremamente piovoso ma caldo. Complessivamente il 2014 è stato precedentemente classificato come anno estremamente piovoso, ovvero con una precipitazione cumulata annuale superiore del 40%.

Per giorni in pianura padana non si è avvertito il ciclo diurno e a volte le temperature minime hanno superato i valori climatici delle massime.

L'inizio dell'inverno ha messo a dura prova gli operatori turistici alpini, con temperature molto miti, specie in quota, che hanno reso il paesaggio alpino più autunnale che invernale. Un anno quindi molto caldo e con evidenti anomalie pluviometriche in tutte le stagioni, a eccezione della primavera, e nel quale numerosi eventi meteorologici estremi hanno contribuito a destabilizzare la città, rendendo più acute le situazioni di dissesto idrogeologico e alluvioni mettendo ancora più a nudo le molte criticità del territorio. Tra gli eventi che hanno colpito Milano nel 2014 si ricordano l'esondazione del fiume Seveso e del fiume Lambro tra il 14/15 novembre e l'esondazione del fiume Seveso 8/9 luglio.

L'eccezionalità dell'anno non ha colpito solo Milano ma tutto il Nord Italia.

Per completezza si ricordano alcuni eventi estremi sparsi nel Nord Italia come l'alluvione ligure del 9-10 ottobre, i ripetuti eventi alluvionali di novembre, il violentissimo temporale che si è abbattuto tra il 2 ed il 3 agosto in provincia di Treviso hanno unito l'eccezionale intensità e l'estensione molto ridotta a caratteristiche di intrinseca difficoltà predittiva.

A fronte quindi di condizioni di elevata destabilizzazione dei versanti e di grave dissesto idrogeologico legato alle continue piogge, si sono unite le maggiori difficoltà dei servizi meteorologici a fornire informazioni previsionali in grado di permettere un adeguato allertamento della popolazione, delle istituzioni preposte alla protezione civile e del territorio in corrispondenza di eventi estremamente intensi, in grado di provocare danni alle persone e alle infrastrutture.

Nel Nord Italia più che di un inverno si è trattato di un prolungamento dell'autunno, situazione dominata da caratteri di mitezza e di precipitazioni straordinarie.

L'inverno 2013-2014 è stato dunque caratterizzato da un'anomalia pluviometrica in cui a Milano il mese di gennaio è stato il più piovoso della stagione ed è stato il più piovoso da oltre un secolo.

In Italia ne è conseguita una stagione invernale tiepida, estremamente piovosa, con frequenti burrasche di scirocco, mareggiate, inconsueti temporali invernali anche in Pianura Padana, e straordinarie quantità di neve sulle Alpi, ma solo oltre i 1000-1200m, mentre sotto quota 500m è quasi sempre piovuto.

Viene riportata una sintesi delle principali anomalie invernali termo-pluviometriche registrate presso alcuni osservatori dell'Italia settentrionale.

Città	Torino	Genova	Milano	Varese	Modena	Parma	Piacenza
<b>T media (°C)</b>	6.1	10.6	6.5	5	7.1	6.8	5.8
<b>Scarto da 1969-1999 (°C)</b>	1.6	1.4	2	1.5	2.8	2.6	3.5
<b>Precipitazione (mm)</b>	310	744	537	806	216	263	357.2
<b>Precipitazione media 1984-1999 (mm)</b>	280	220	144	340	186	185	200

Tabella 34-Anomalie termo-pluviometriche inverno 2013-2014 nel Nord Italia, trimestre gennaio-marzo

La quantità trimestrale tipica del regime pluviometrico in queste località è stato dalle due alle tre volte il normale. Brevissime le pause asciutte tra una perturbazione e l'altra: se si eccettuano le prime due decadi di dicembre 2013 non sono mai passati più di 3/4 giorni tra un fronte piovoso e il successivo.

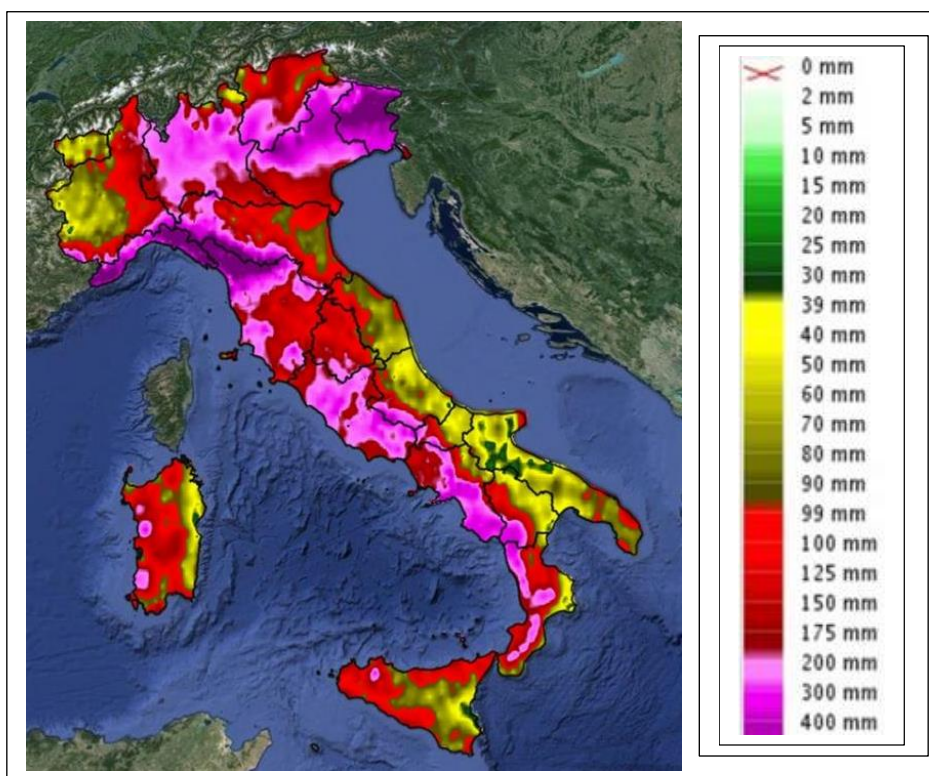


Figura 92- Precipitazione cumulata, 31 gennaio 2014, dipartimento protezione civile

Altra particolarità dell'inverno 2013-14 sono stati i ricorrenti temporali, non solo sui mari intorno alla penisola ma anche in pianura padana, probabilmente favoriti dai maggiori moti ascensionali dell'aria, dovuti alle temperature elevate oltre che dall'estrema dinamicità dell'atmosfera.

Come esempio si ricorda il temporale con grandine piccola ma abbondante, assolutamente straordinario per la stagione, che ha colpito Milano la sera del 26 febbraio 2014, al passaggio di un attivo fronte freddo da Ovest.

### 5.3.2 ANALISI DEI DATI INVERNO 2014 – Precipitazione, Pressione, Temperatura

Si riporta di seguito la distribuzione della precipitazione cumulata relativa al trimestre invernale dell'anno 2013/2014, a partire dal mese di ottobre 2013, e una tabella riassuntiva che evidenzia, per il trimestre invernale 2014 la correlazione tra i giorni piovosi e la pressione atmosferica.

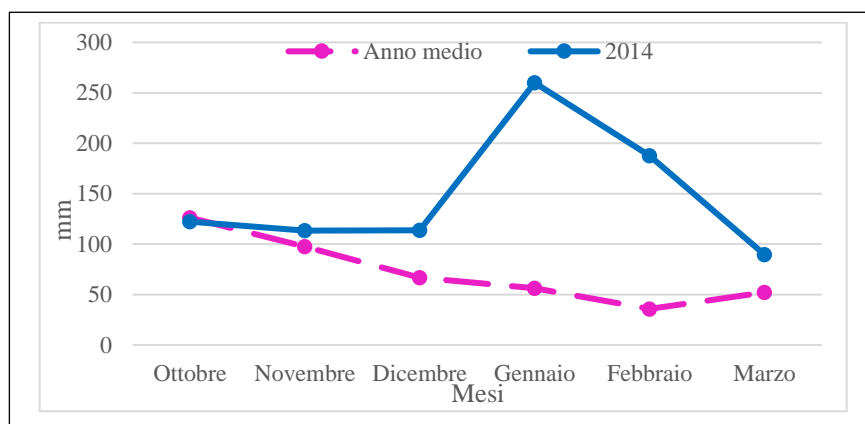


Figura 92-Confronto tra la precipitazione invernale media e quella del 2014

La fine dell'anno 2013 non ha presentato anomalie pluviometriche tali da lasciar presagire un inizio 2014 estremamente piovoso.

Il 2014 ha totalizzato da gennaio a dicembre ben 1639mm di precipitazione, di cui il solo inverno ha contribuito fornendo 537mm distribuiti in 48 giorni piovosi invernali.

L'inverno si è così aggiudicato il titolo di stagione più piovosa del 2014 con 390mm di precipitazione in più rispetto al valor medio della serie 1984-1999 e con ben 27 giorni piovosi in più rispetto alla media invernale.

Non si è dunque configurato come una stagione di ristagno con scarsità di precipitazione come dovrebbe essere in accordo con i massimi annuali autunnali e primaverili, tipici della città.

Dalla tabella successiva risulta che il mese di gennaio ha avuto ben 17 giorni di pioggia confronto ad un valore medio del mese pari a soli 7 giorni, rapporto che lascia intuire l'anomalia pluviometrica di questo anno. Gennaio è stato il mese più piovoso in termini quantitativi apportando al trimestre invernale 260mm. Febbraio è stato meno piovoso in termini quantitativi ma ha presentato un maggior numero di giorni piovosi, pari a 20 giorni piovosi su 28 giorni del mese.

I giorni di precipitazione sono strettamente correlati con l'andamento della pressione atmosfera in loco, sotto l'ipotesi semplificativa di identificazione del giorno piovoso come giorno di bassa pressione.

I giorni di alta pressione sono stati pochi e dunque pochi sono stati i giorni con condizioni meteorologiche serene. Al contrario i giorni di bassa pressione e dunque con condizioni meteorologiche peggiori sono stati decisamente persistenti. Tra un fronte piovoso e il successivo, nei mesi di gennaio e febbraio, non sono passati più di  $\frac{3}{4}$  giorni e questo ben evidenzia la situazione barica anomala del trimestre, dettata da una prevalente alternanza di basse ed alte pressioni.

La piovosità è stata accompagnata da temperature medie superiori alle medie mensili su Milano con anomalie positive di circa 1.5-2°C. L'anomalia di temperatura è stata tale da determinare una non presenza di valori termici al di sotto degli 0°C, in nessun giorno del mese di febbraio 2014 e solo 4 giorni negativi a gennaio. Le temperature minime e massime hanno avuto valori sempre superiori alla media del trentennio 1969-1999 ed addirittura le minime si sono discostate dal loro valore medio con un'anomalia positiva di 2.4-2.7°C.

Le temperature minime hanno quindi avuto un ruolo determinante: tenuto conto della copertura nuvolosa eccezionalmente prolungata, non si è quasi mai avuta dispersione termica per irraggiamento da cielo sereno e pertanto la brina è stato un fenomeno quasi mai presente. Come conseguenza della temperatura elevata il numero di notti con temperatura minima inferiore a 0°C è stato estremamente basso, si contano appena sei episodi nell'intera stagione del nord Italia, a partire da novembre. Le temperature elevate hanno impedito nevicate significative a bassa quota al Nord, ma sopra i 1000-1200 m le frequenti e abbondanti precipitazioni hanno potuto tradursi in un innevamento straordinario.

L'estrema piovosità invernale è terminata a Milano con un centro di bassa pressione nella metà di marzo a cui è seguita una primavera mediamente piovosa.

°C	Gennaio	Febbraio	Marzo
<b>T.max 1969-1999</b>	5.2	8	13.4
<b>T.max 2014</b>	7.9	9.9	14
<b>T.min 1969-1999</b>	0	1.6	5.4
<b>T.min 2014</b>	2.7	4.3	7.8
<b>T.media 1969-1999</b>	2.6	4.8	9.4
<b>T.media 2014</b>	5.2	7	10.9

Tabella 35-Temperature del trimestre invernale del 2014 (°C)

Giorni del mese	Giorni con precipitazione			Pressione atm			Temperatura media		
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Gennaio	Febbraio	Marzo	Gennaio	Febbraio	Marzo
1	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	2	5	7
2	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	3	6	8
3	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	4	7	8
4	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	5	7	10
5	<i>Si</i>	<i>Si</i>	No	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	Alta	6	7	9
6	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	6	7	9.5
7	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	5	7	11
8	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	5	6	11
9	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	8	5	10
10	<i>Si</i>	<i>Si</i>	No	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	Alta	9	7	10
11	<i>Si</i>	<i>Si</i>	No	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	Alta	9	6	10
12	<i>Si</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	6	5	9
13	<i>Si</i>	No	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	Alta	<i>Bassa</i>	5	8	11
14	<i>Si</i>	No	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	Alta	<i>Bassa</i>	6	5	11
15	No	No	<i>Si</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	5	6	12
16	No	<i>Si</i>	<i>Si</i>	Alta	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	4	7	12
17	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	5	7	16
18	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	3	8	15
19	<i>Si</i>	<i>Si</i>	No	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	Alta	4	9	13
20	<i>Si</i>	<i>Si</i>	No	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	Alta	7	9	16
21	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	6	9	13
22	No	No	No	Alta	Alta	Alta	7	7	14
23	No	No	No	Alta	Alta	Alta	7	9	13
24	No	No	No	Alta	Alta	Alta	8	8	10
25	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	7	9	10
26	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	5	7	10
27	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	5	8	7
28	No	<i>Si</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	6	7	9
29	<i>Si</i>	/	No	<i>Bassa</i>	/	Alta	6	/	10
30	<i>Si</i>	/	No	<i>Bassa</i>	/	Alta	5	/	14
31	<i>Si</i>	/	No	<i>Bassa</i>	/	Alta	5	/	14

Tabella 36-Individuazione dei giorni con anomalia pluviometrica



La piovosità invernale è stata dunque determinata da una persistente alternanza di basse ed alte pressioni, che lasciano presagire una saldatura insistente tra i fronti freddi di origine atlantica ed i fronti più caldi provenienti da sud-est.

### **5.3.3 ANALISI DEI DATI INVERNO 2014 – Mappe del geo-potenziale**

Le carte del geo-potenziale più indicate al tipo di analisi che si vuole condurre sono le carte alle quote di 500 ed 850 hPa.

Vengono inoltre riportate le mappe di precipitazione che esprimono il quantitativo millimetrico espresso nell'arco delle ventiquattro ore.

Dalla tabella alla pagina precedente sono stati individuati tre gruppi barici di lunga estensione temporale che hanno insistito su Milano nell'inverno 2014:

- 1 gennaio 2014-5 gennaio 2014, cinque giorni di precipitazione consecutivi;
- 29 gennaio 2014-11 febbraio 2014, quattordici giorni di precipitazione consecutivi;
- 25 febbraio 2014-4 marzo 2014, otto giorni di precipitazione consecutivi.

Di seguito vengono riportate le mappe del geo-potenziale, alle quote di 500 e 850 hPa, e le mappe di precipitazione ritenute più significative e rappresentative delle basse pressioni individuate.

In particolare si riportano le mappe del geo-potenziale riferite alle ore 00 UTC, dei giorni:

- 02/01/2014;
- 05/01/2014;
- 29/01/2014;
- 06/02/2014;
- 27/02/2014;
- 03/03/2014;
- 15/03/2014.

Di tali giorni sono riportate anche le traiettorie delle circolazioni individuate tramite il programma Hi-Split. Infine si riportano le mappe del geo-potenziale, di precipitazione e le traiettorie relative al fronte freddo che ha causato un'intensa ed anomala grandinata nella sera del 26/02/2016 a Milano.

5.3.3.1 - 2 gennaio 2014

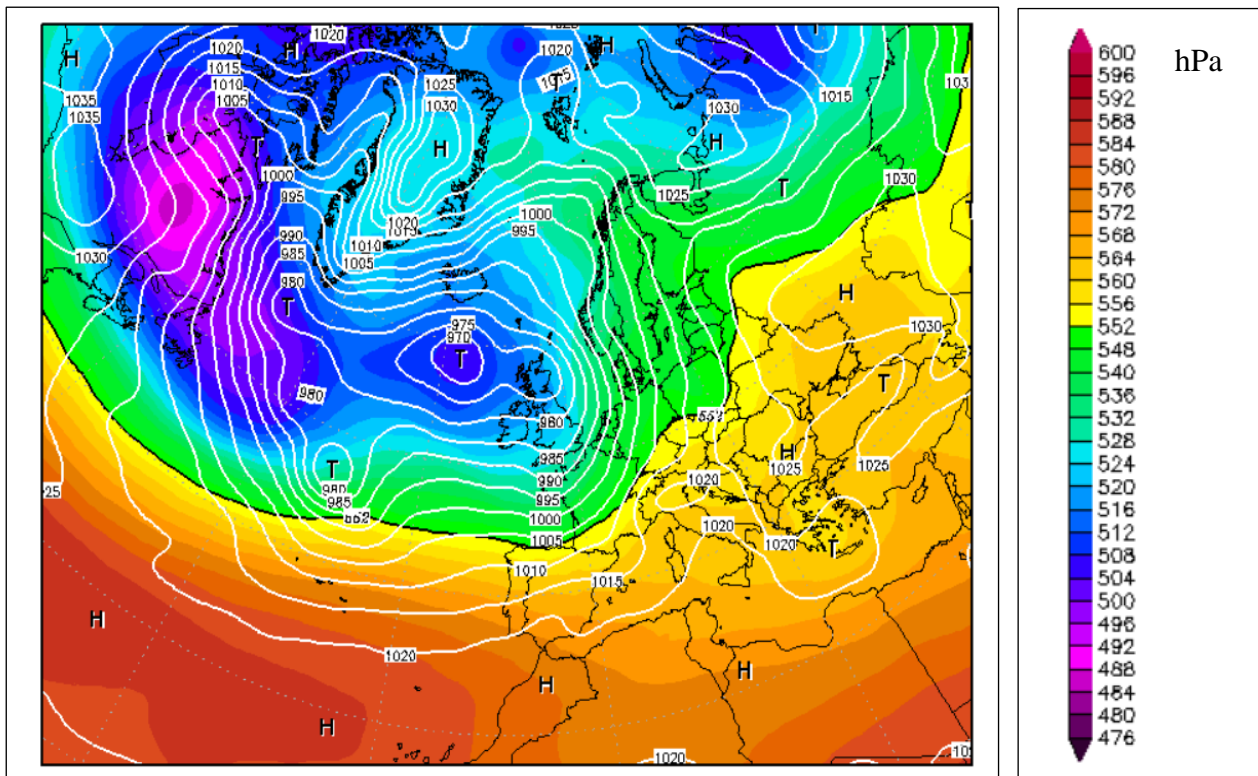


Figura 93-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

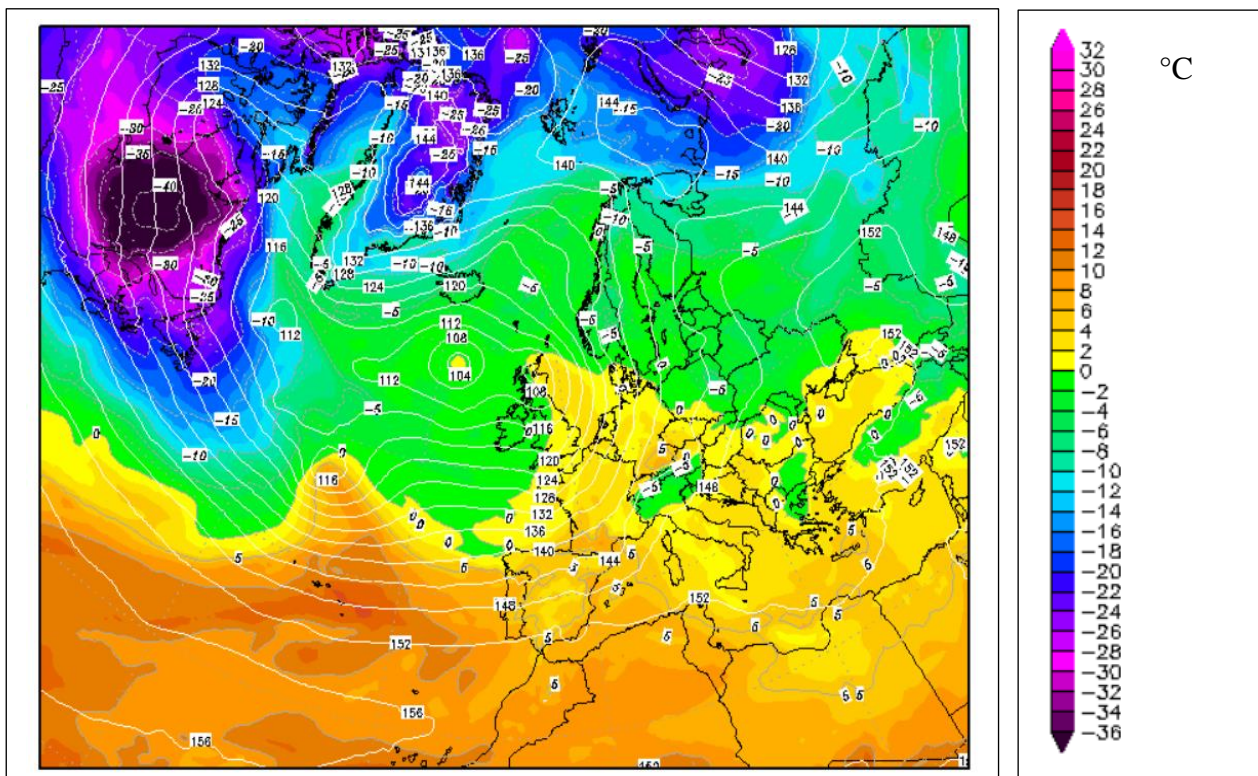


Figura 94-Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

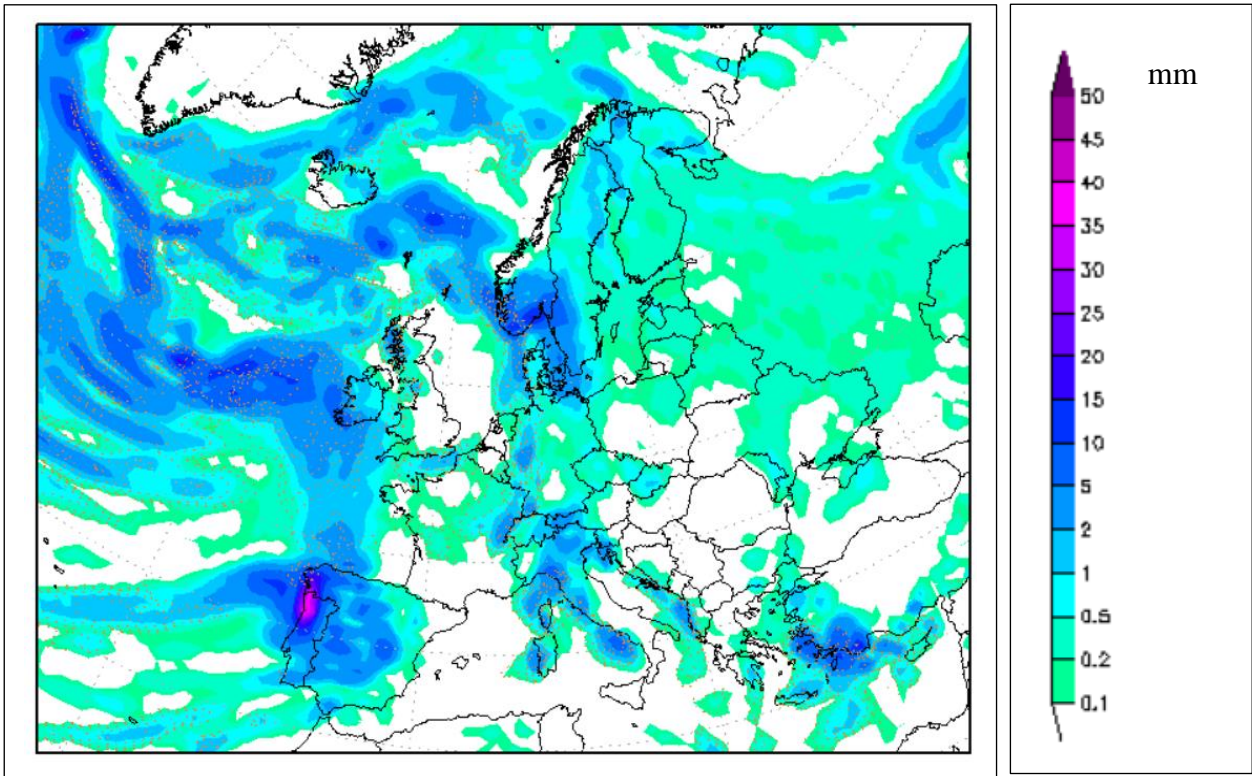


Figura 95-Mappa della precipitazione (mm)

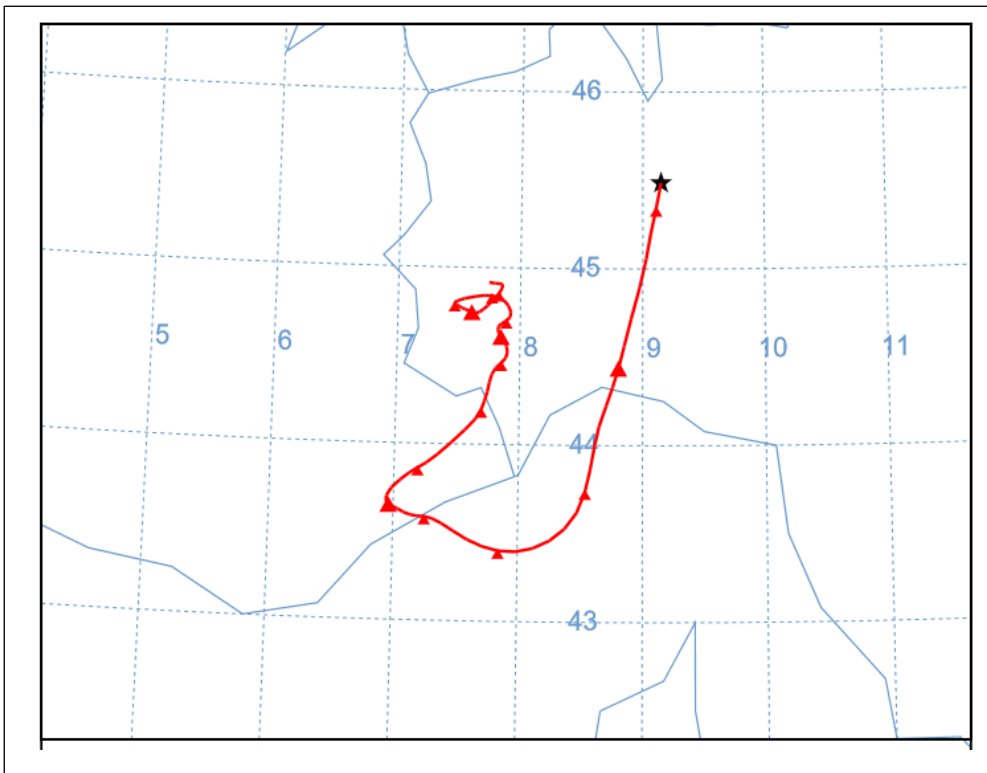


Figura 96- Traiettorie della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.2 - 5 gennaio 2014

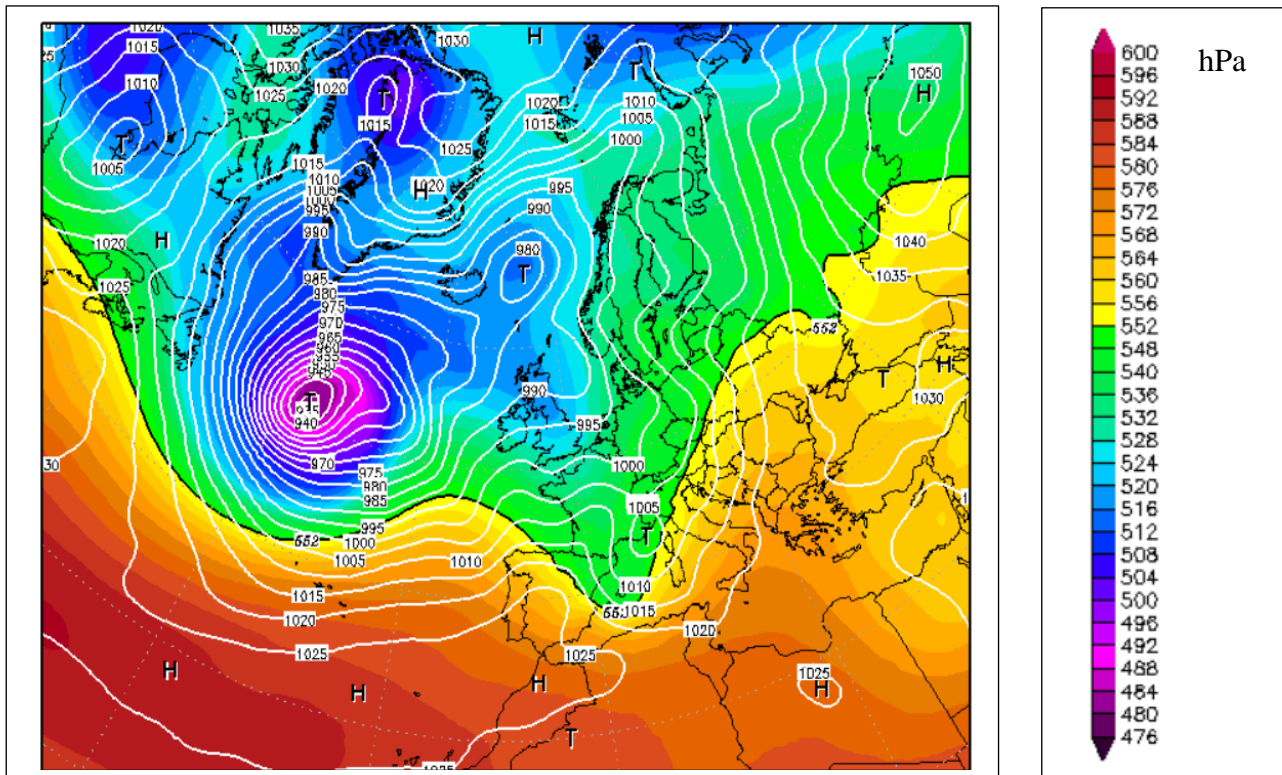


Figura 97- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

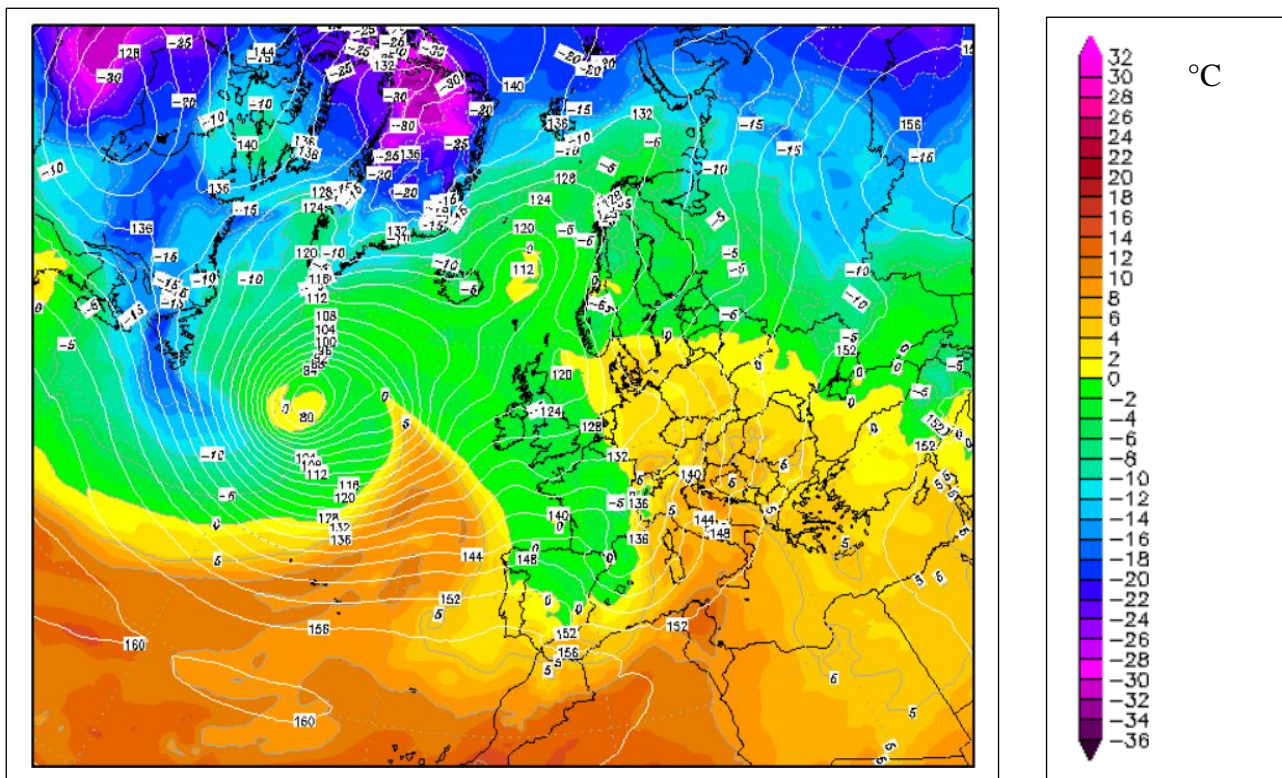


Figura 98- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

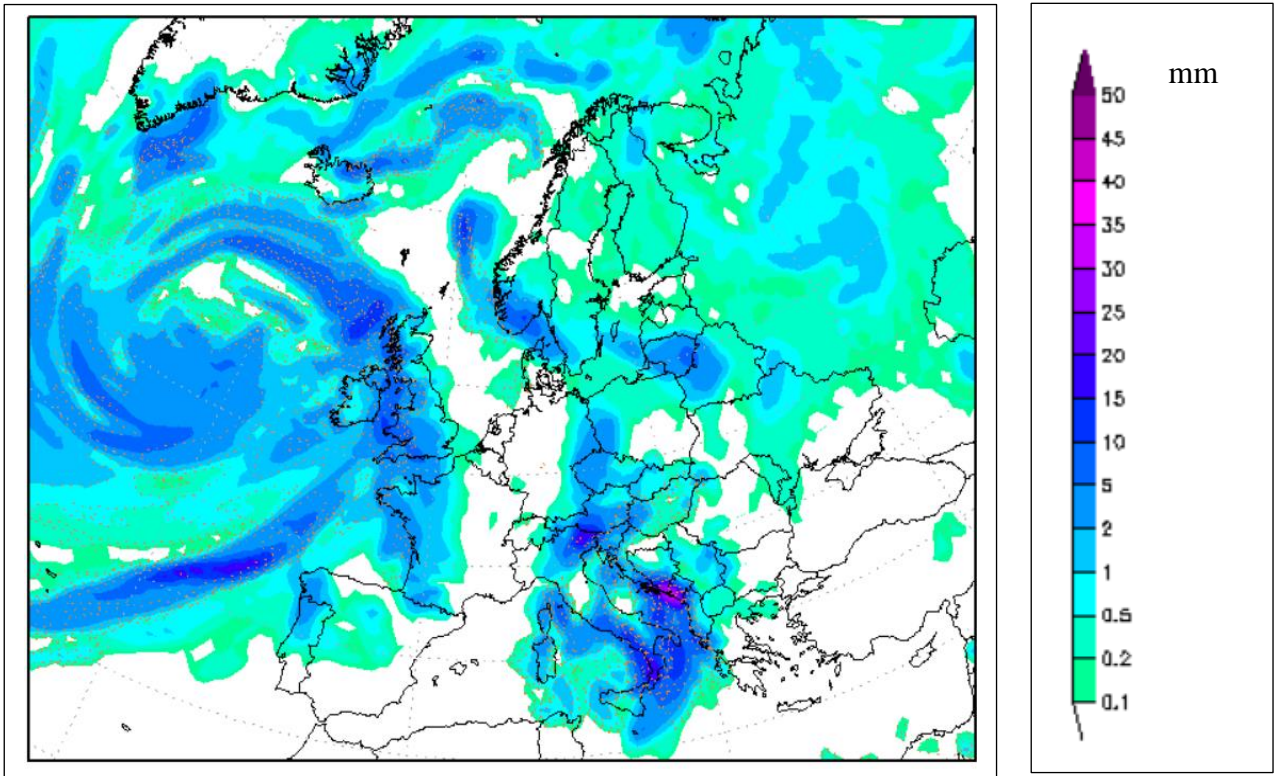


Figura 99- Mappa della precipitazione (mm)

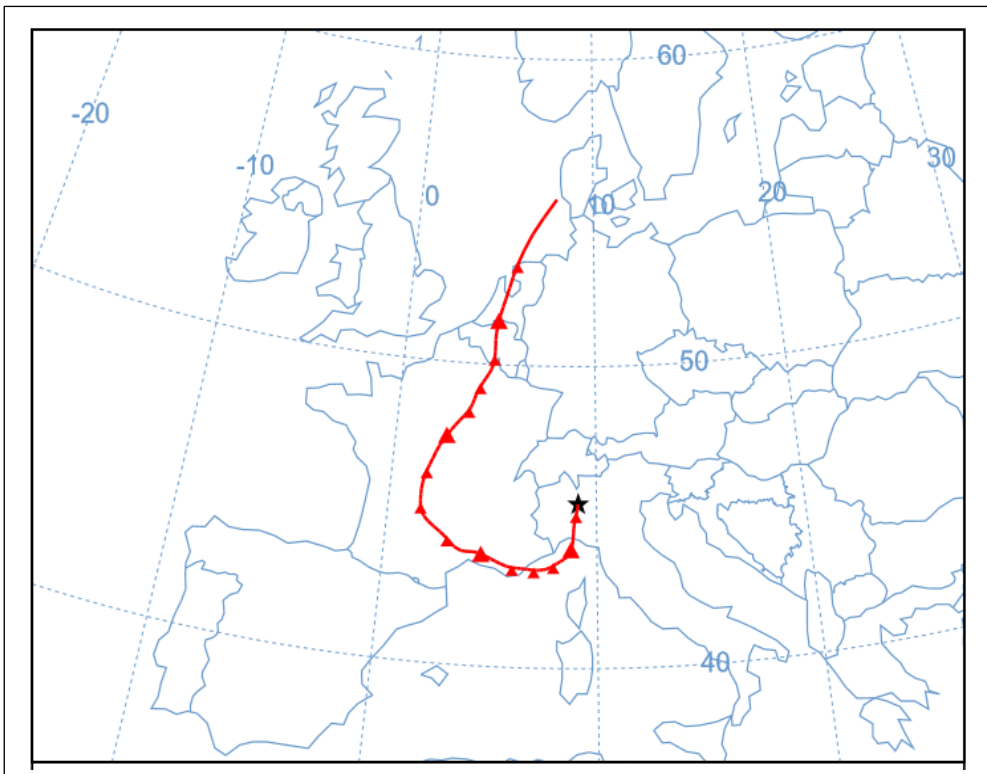


Figura 100- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.3 - 29 gennaio 2014

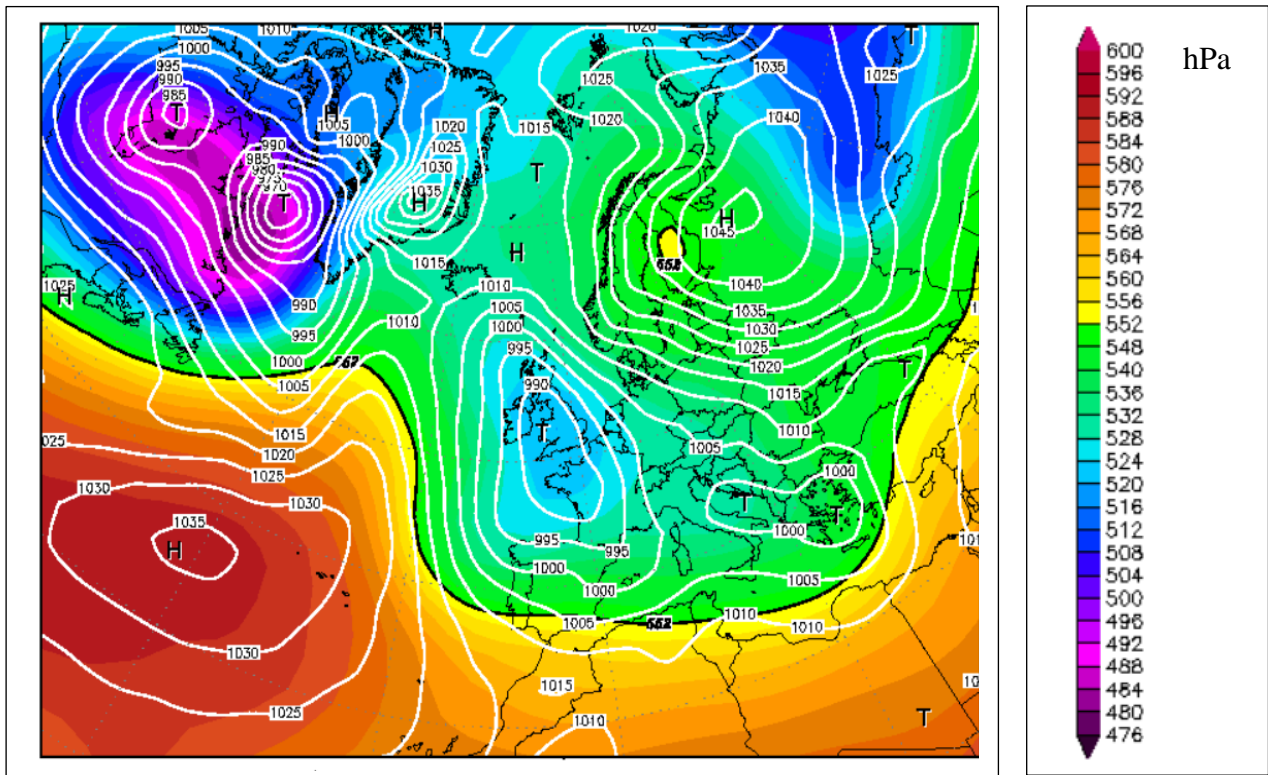


Figura 101- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

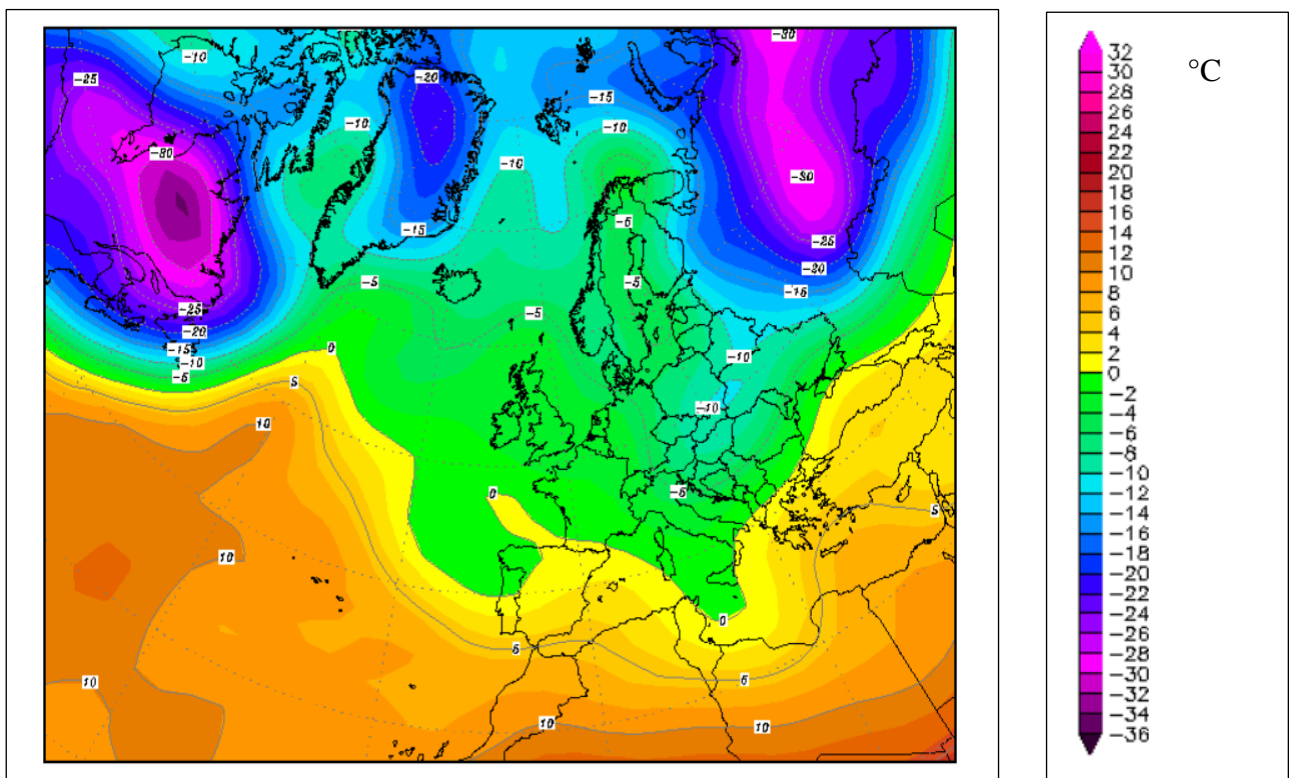


Figura 102- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

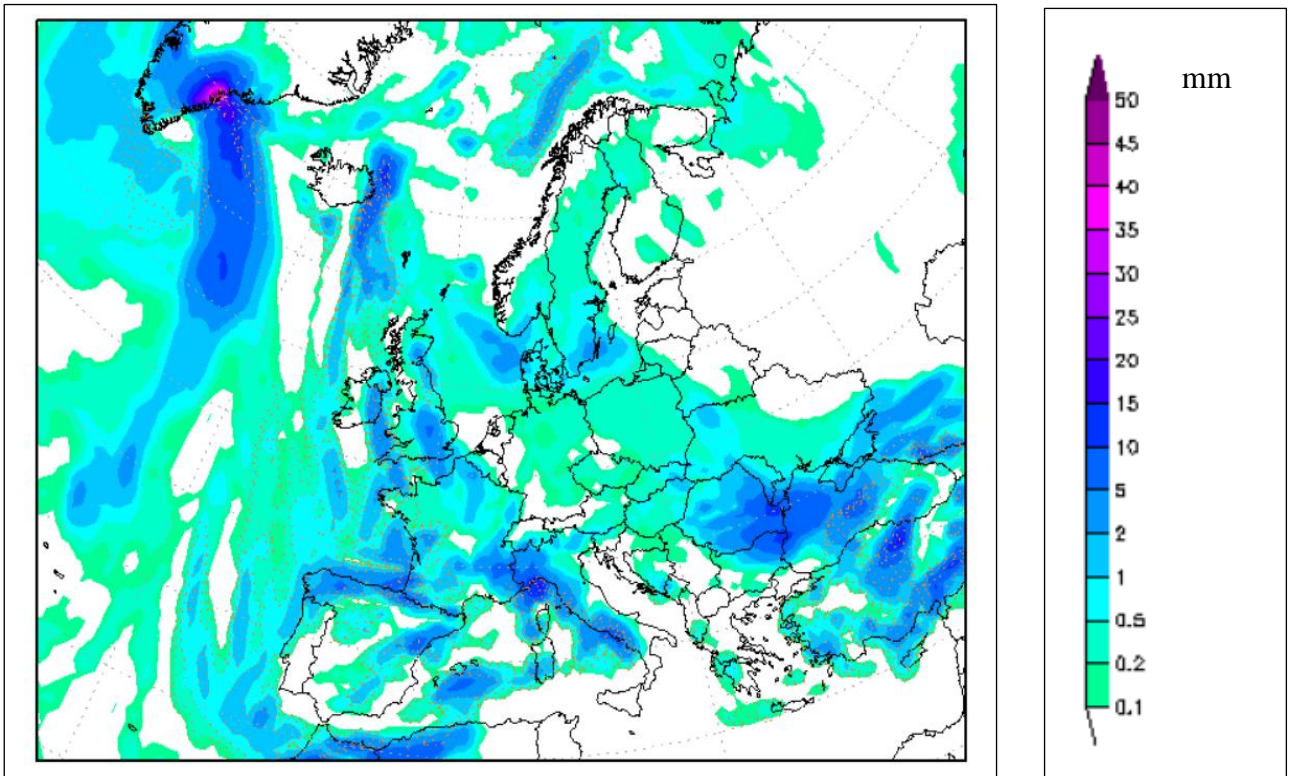


Figura 103- Mappa della precipitazione (mm)

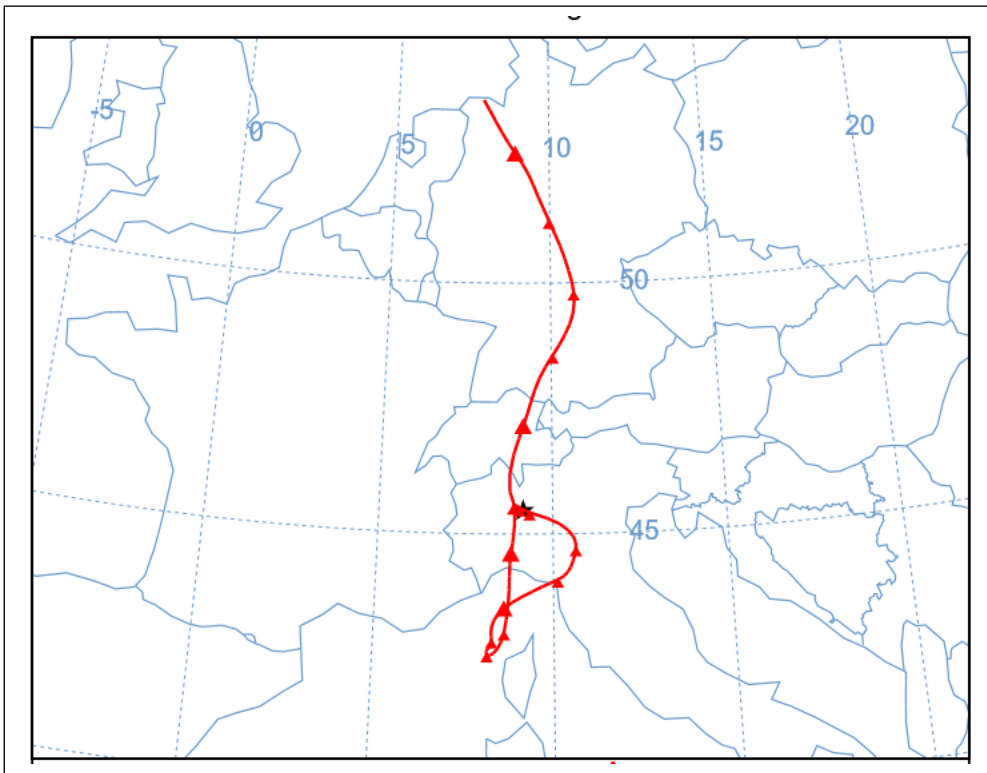


Figura 104- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.4 - 6 febbraio 2014

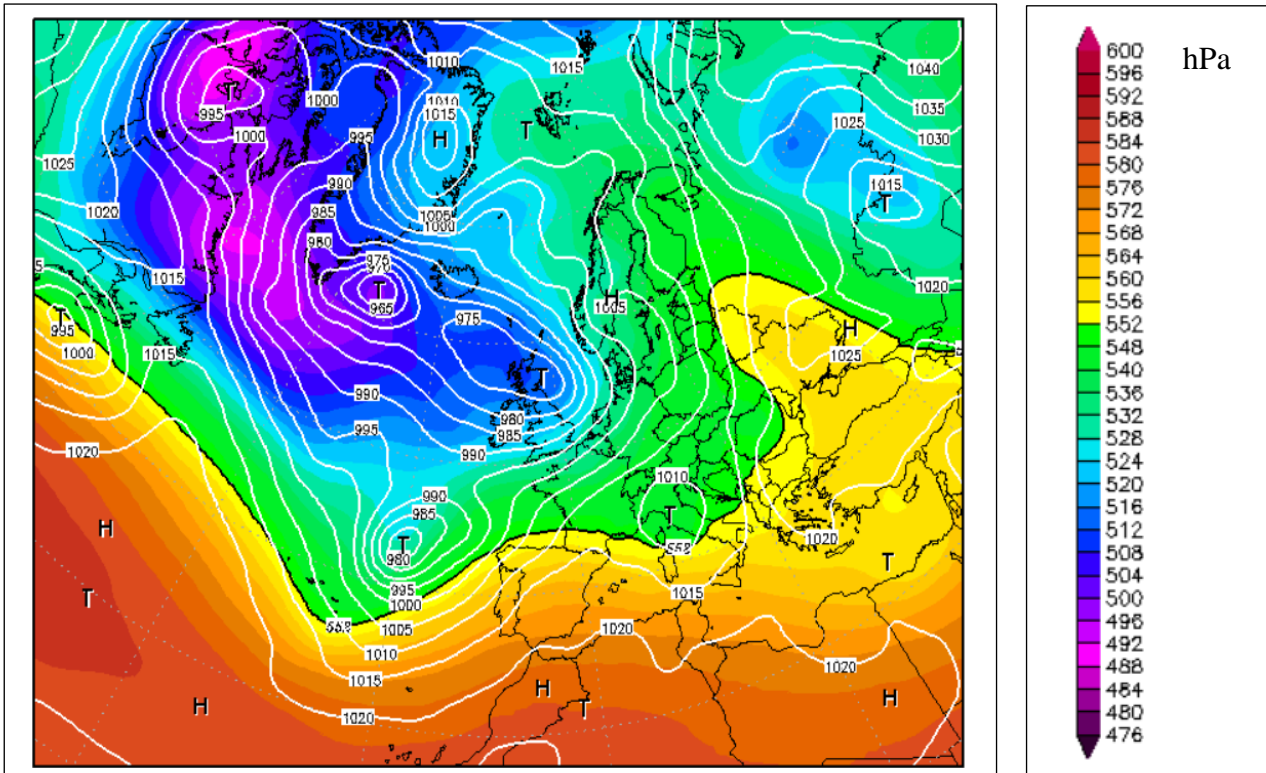


Figura 105- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

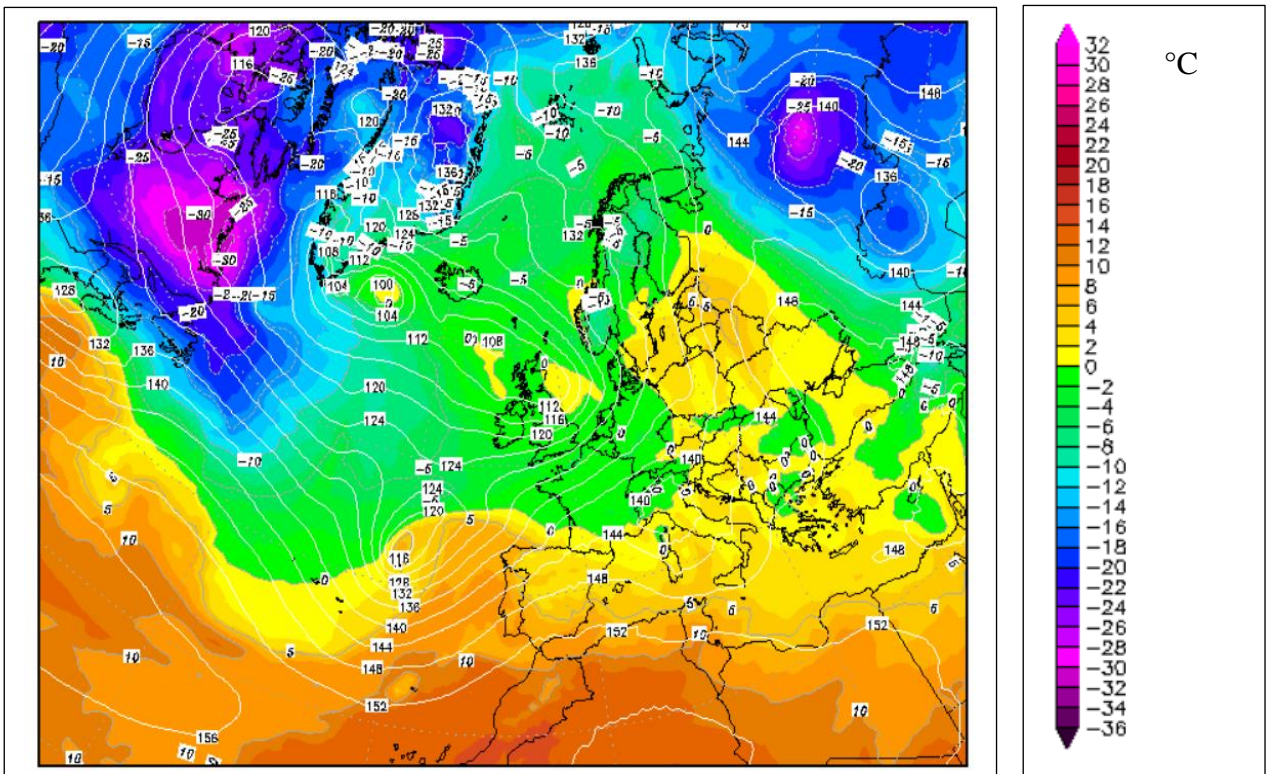


Figura 106- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)



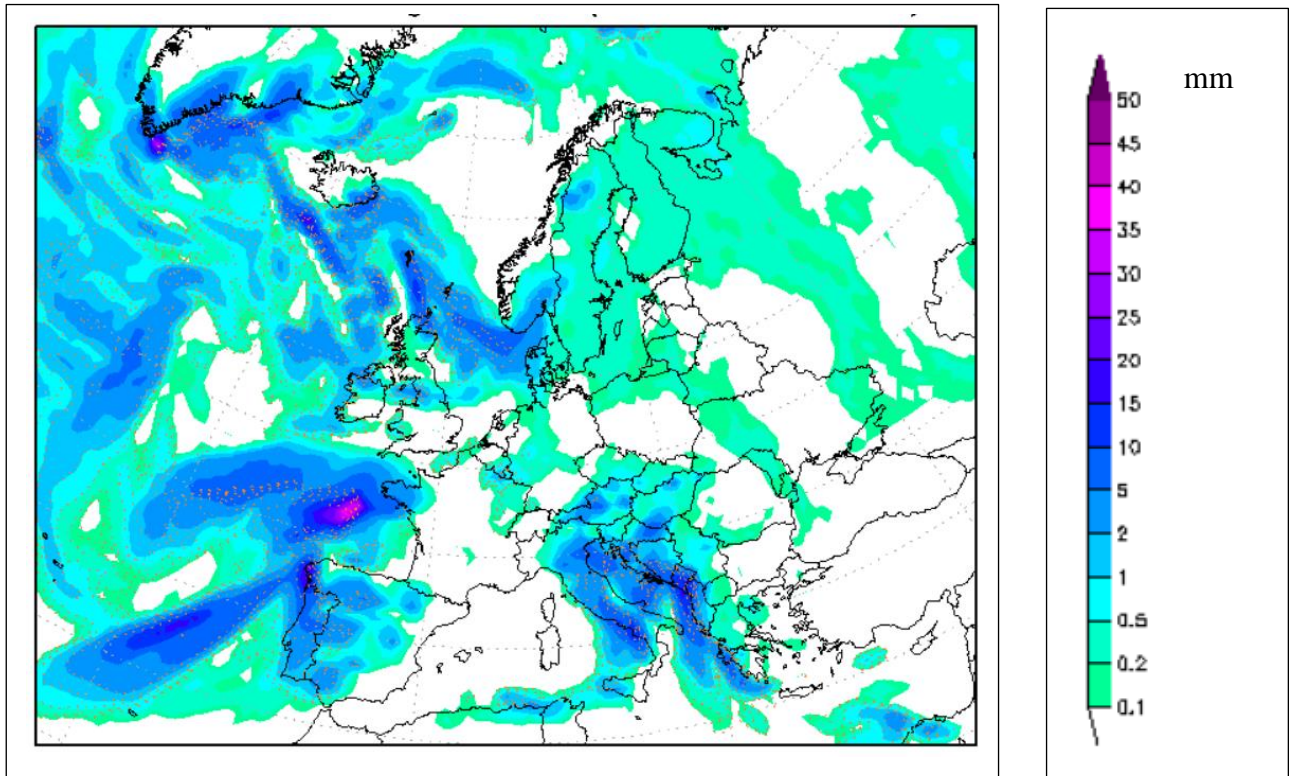


Figura 107- Mappa della precipitazione (mm)



Figura 108- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.5 - 27 febbraio 2014

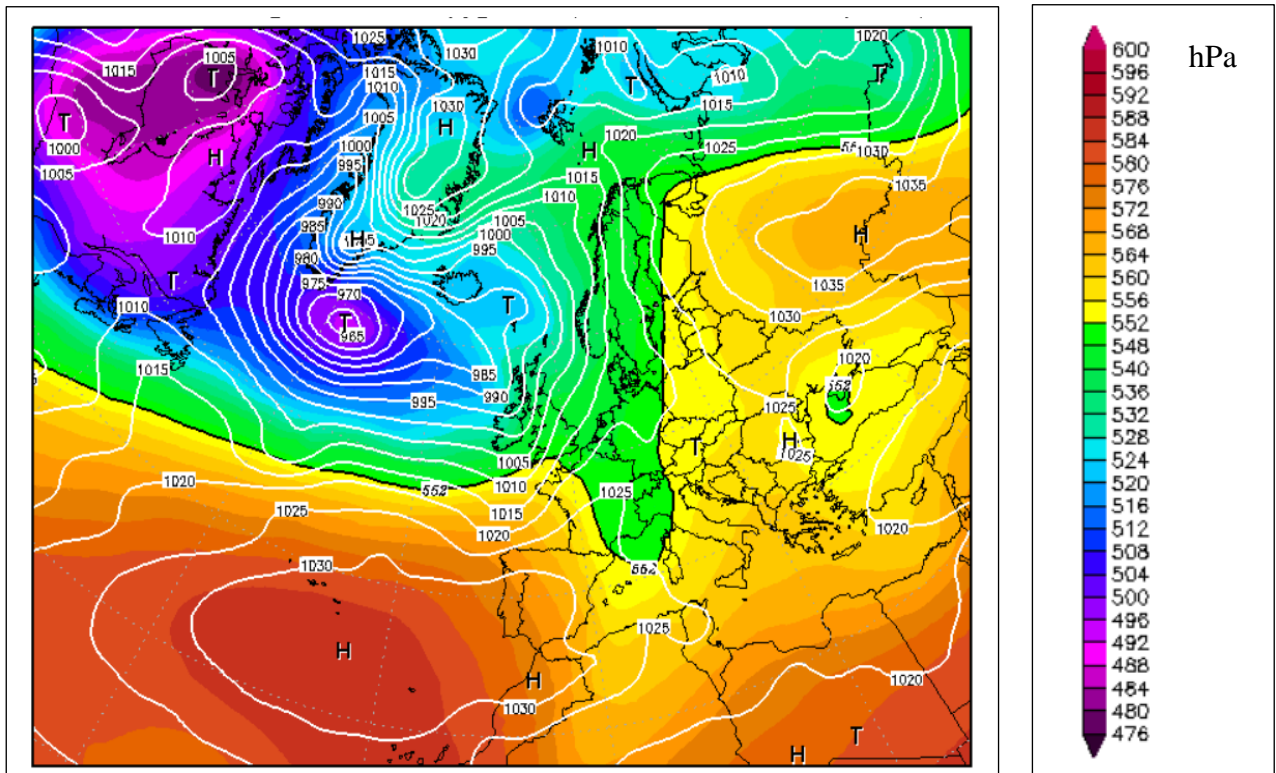


Figura 109- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

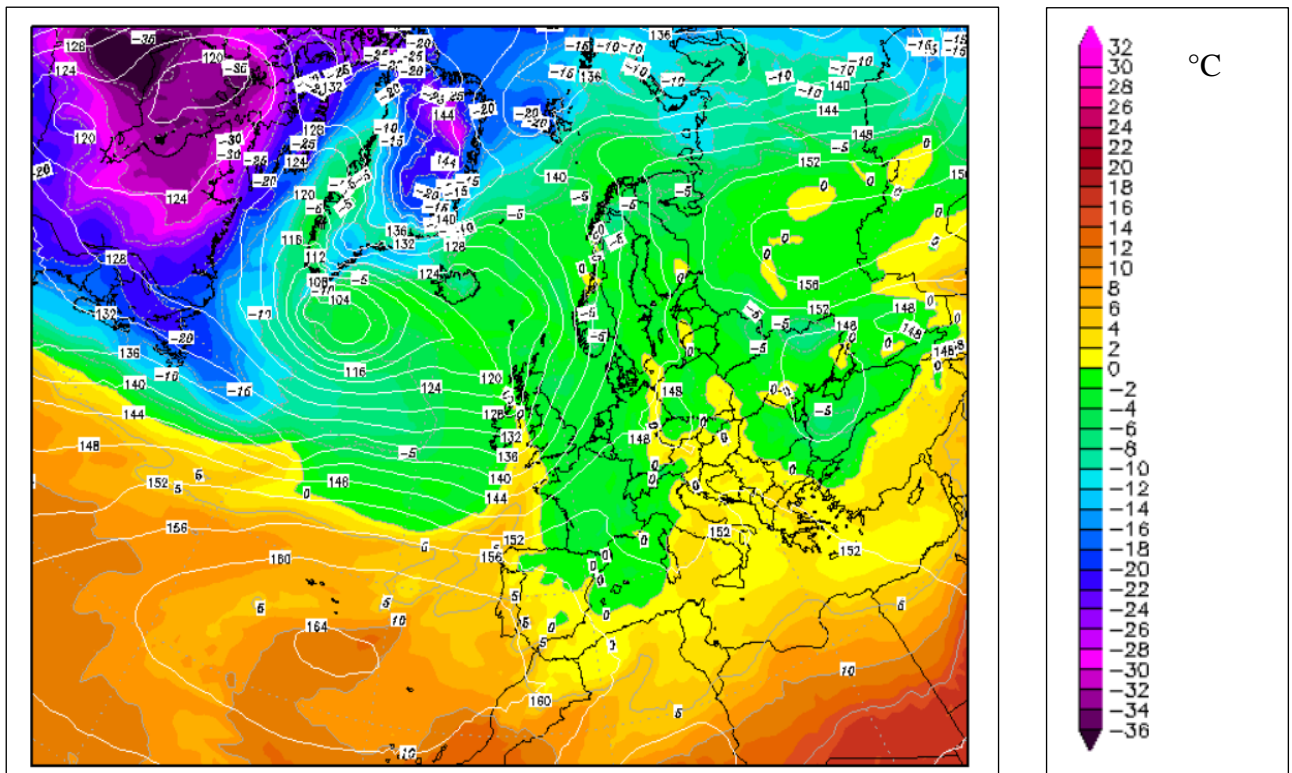


Figura 110- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

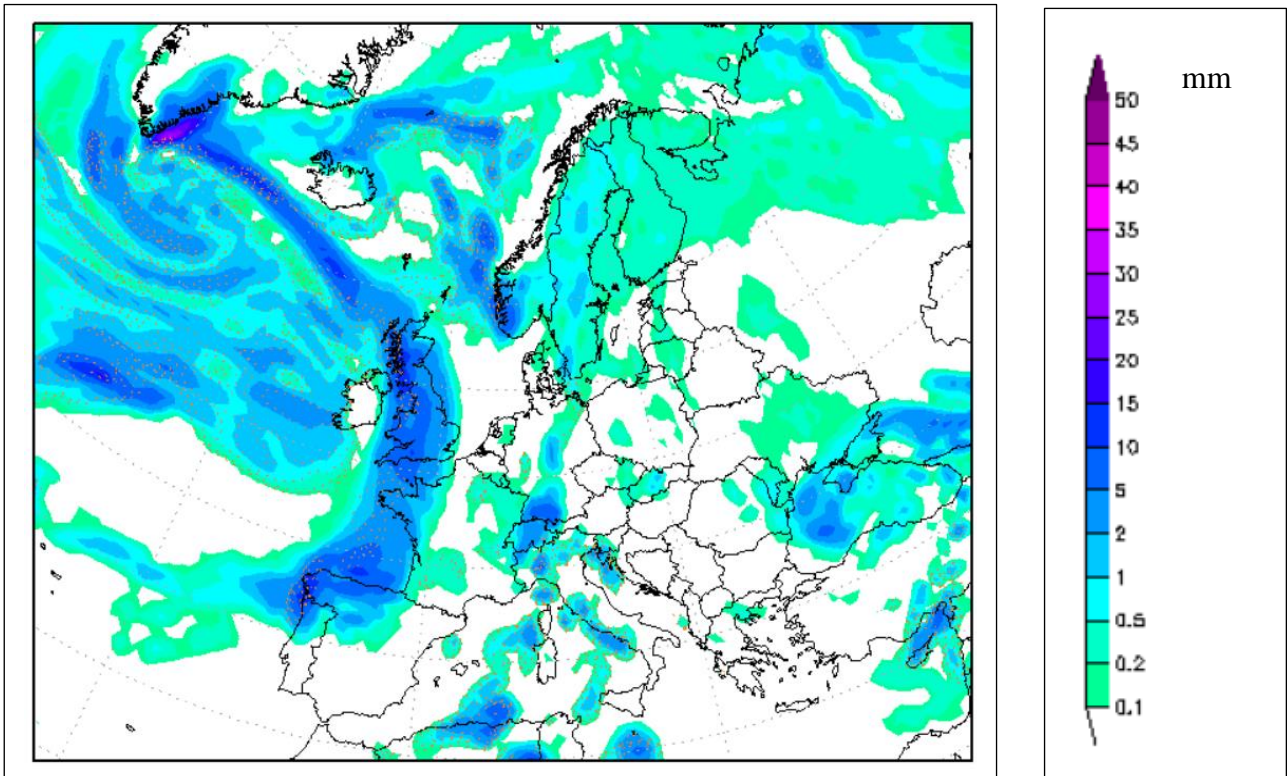


Figura 111- Mappa della precipitazione (mm)

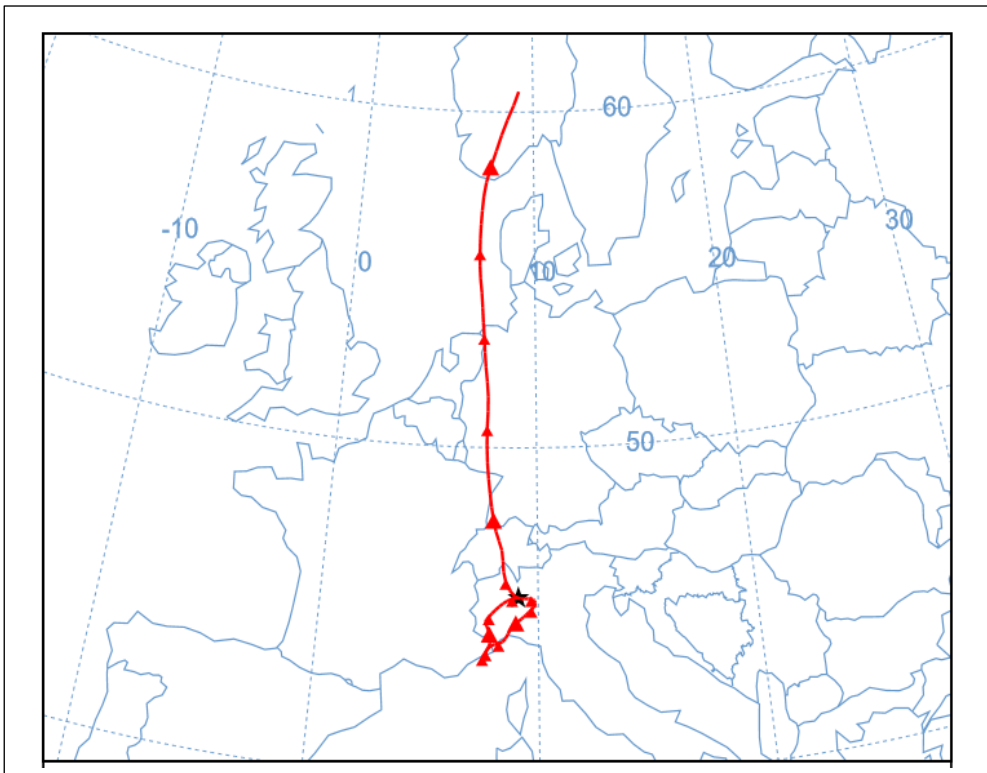


Figura 112- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.6 - 3 marzo 2014

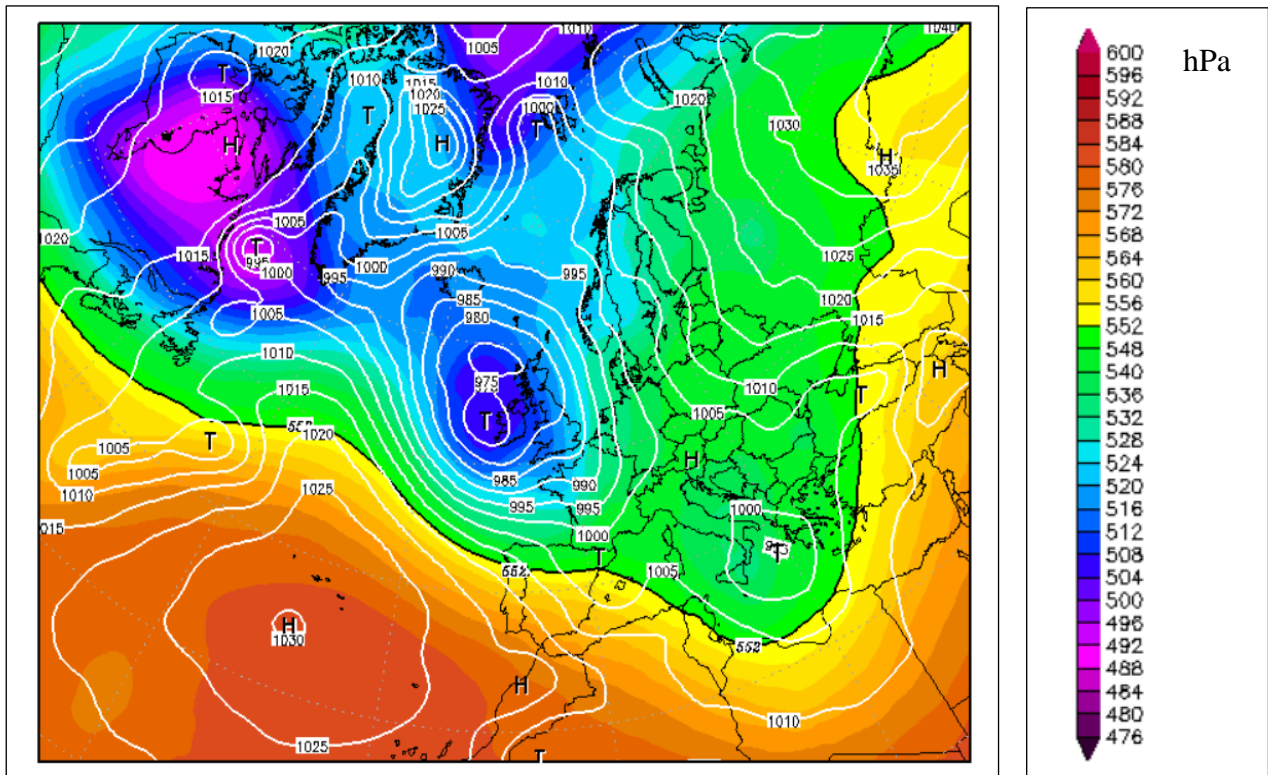


Figura 113- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

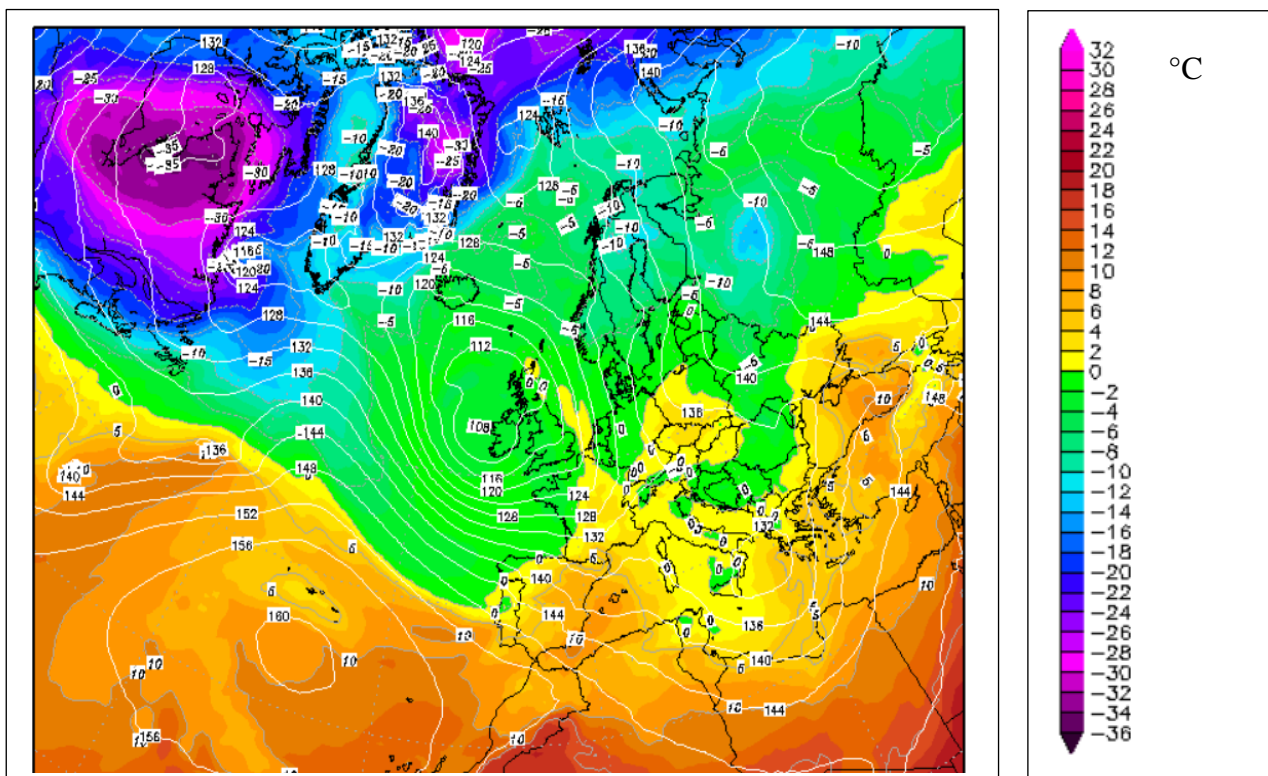


Figura 114- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

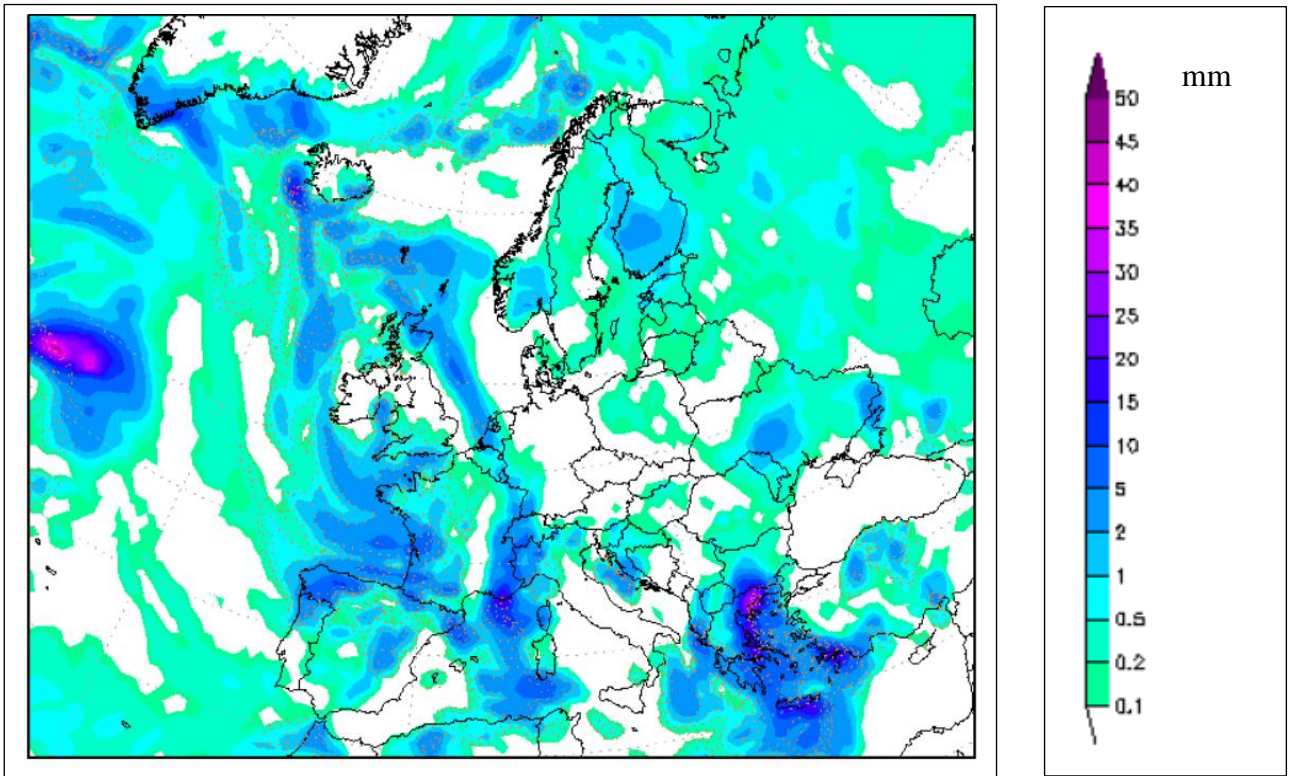


Figura 115- Mappa della precipitazione (mm)

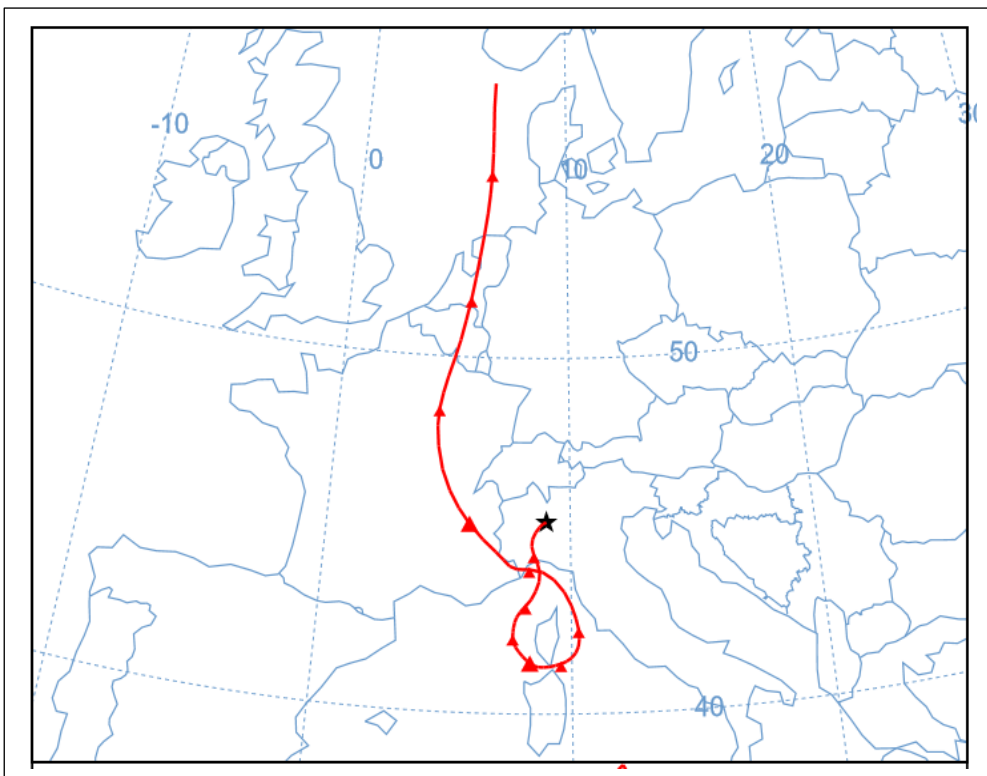


Figura 116- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.7 - 15 marzo 2014

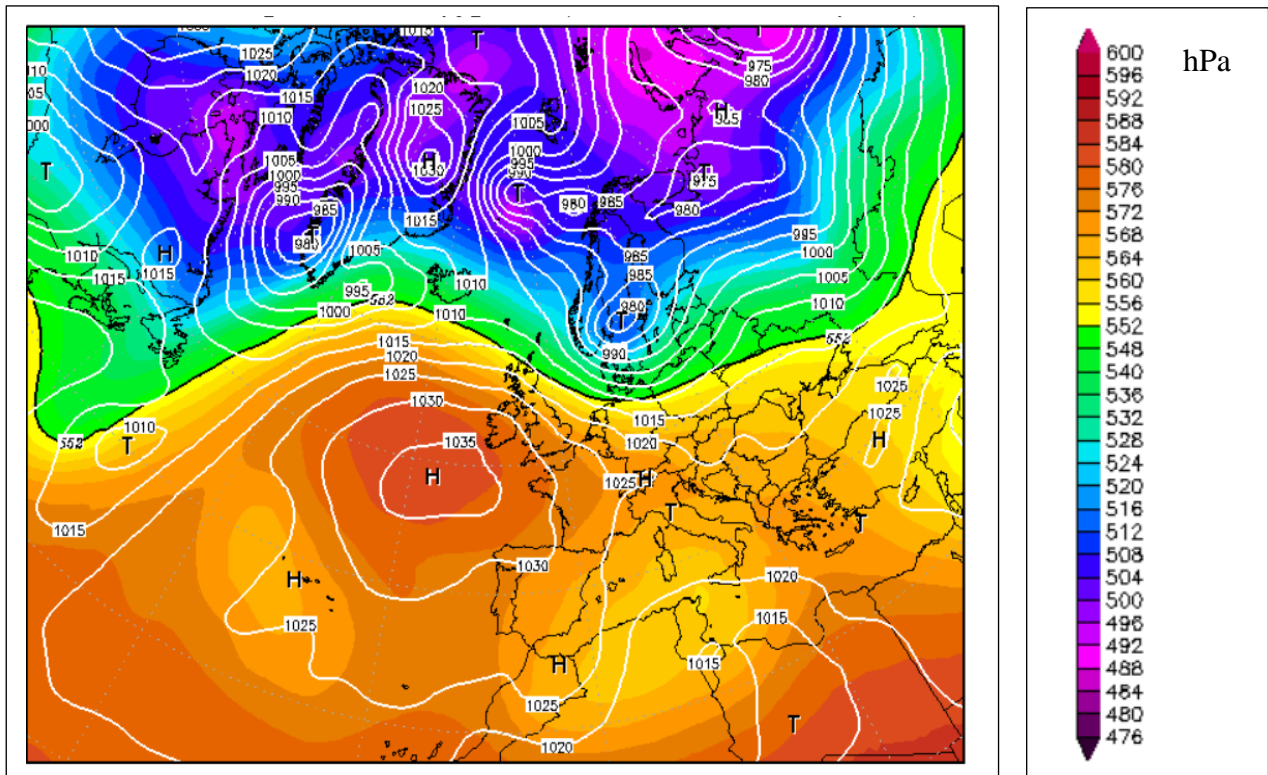


Figura 117- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

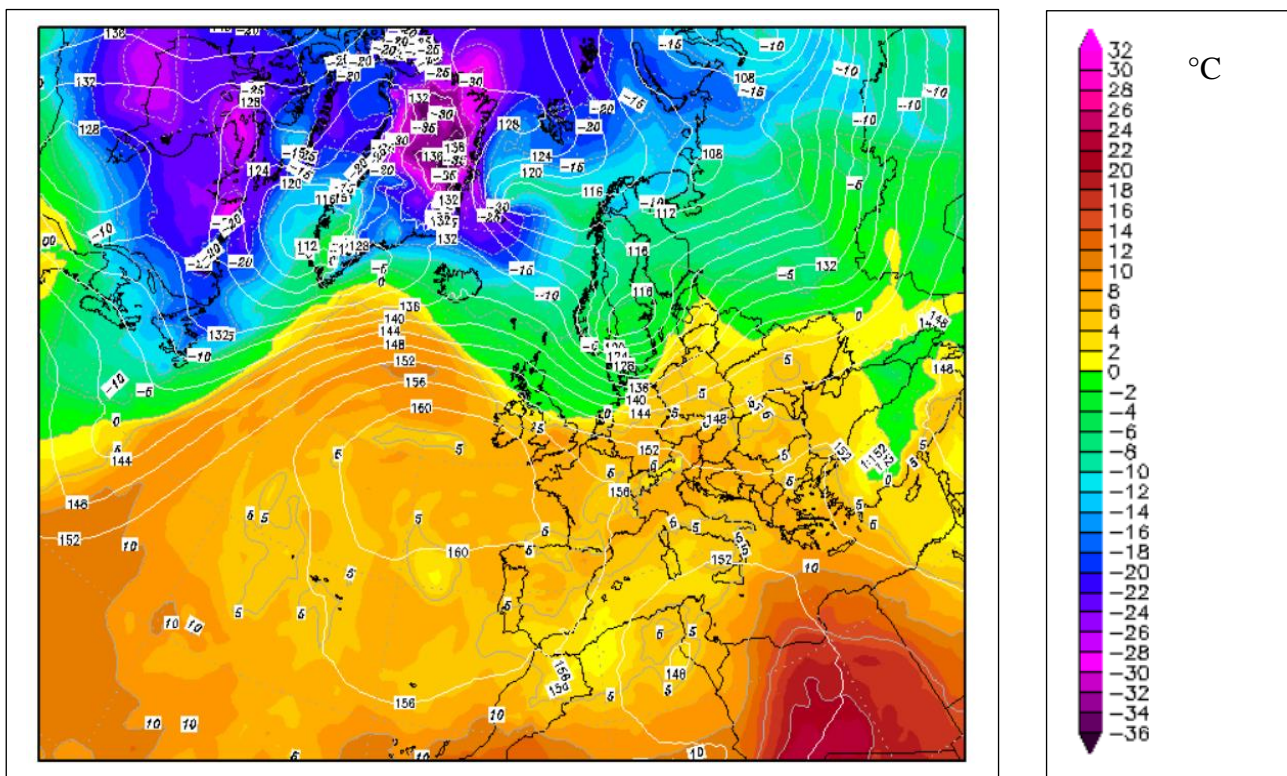


Figura 118- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

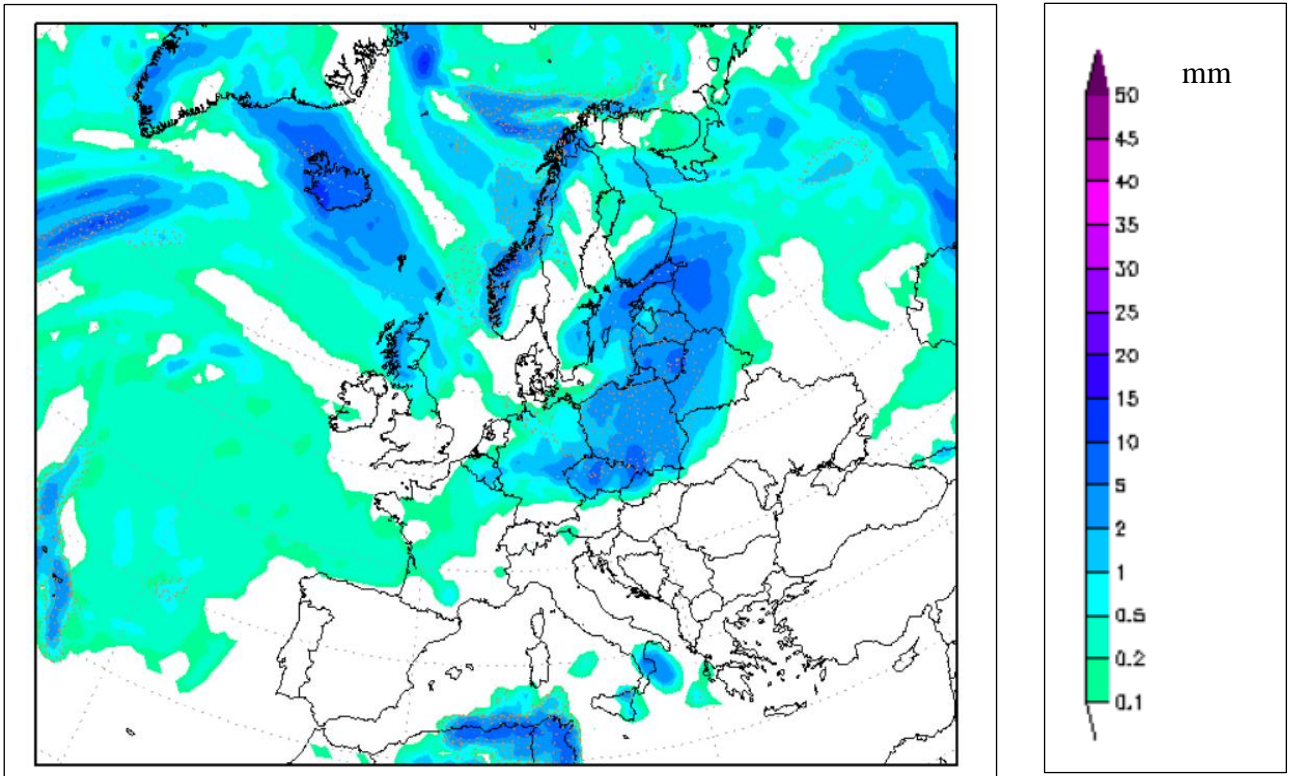


Figura 119 Mappa della precipitazione (mm)

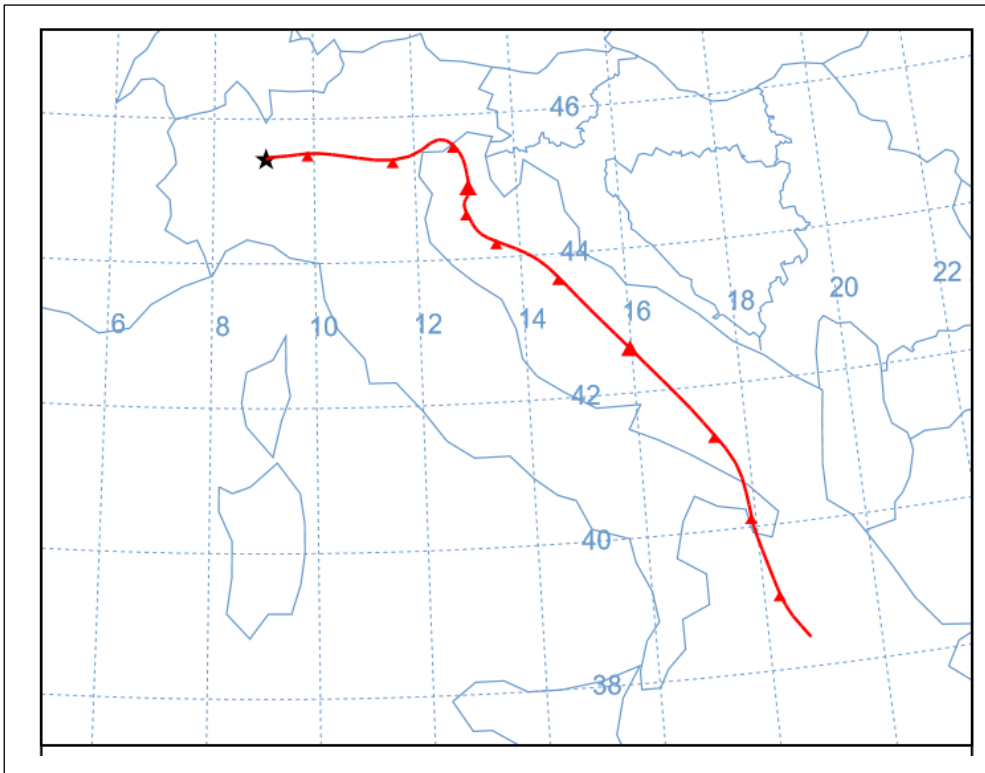


Figura 120- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.3.3.8 - Evento anomalo: grandinata su Milano del 26/02/2014

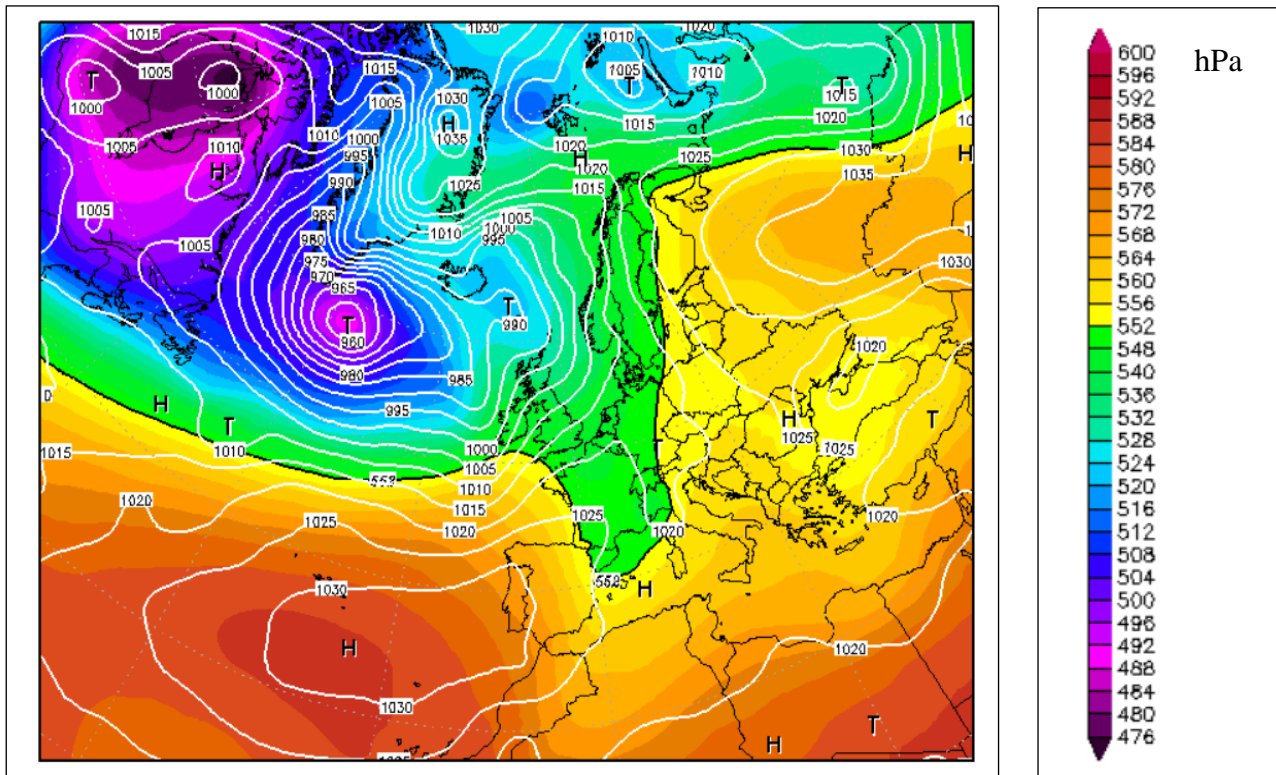


Figura 121- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

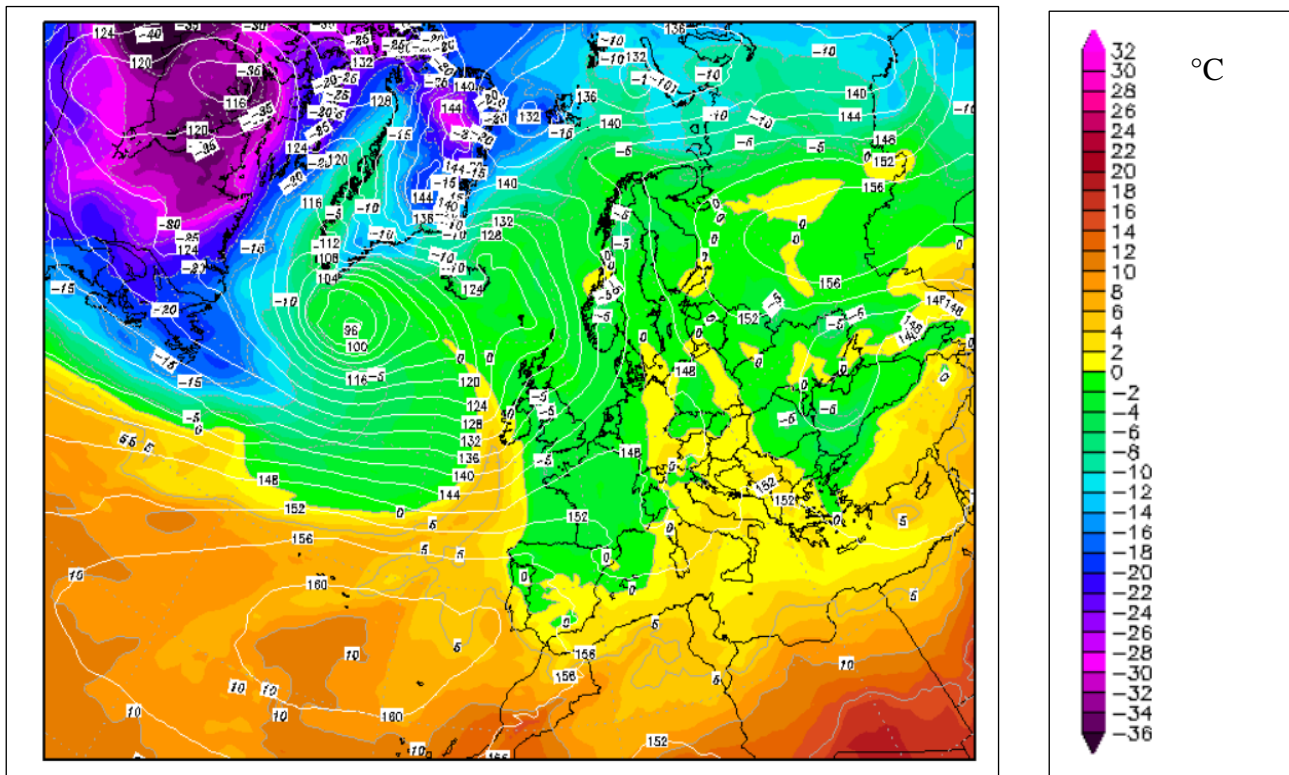


Figura 122- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)



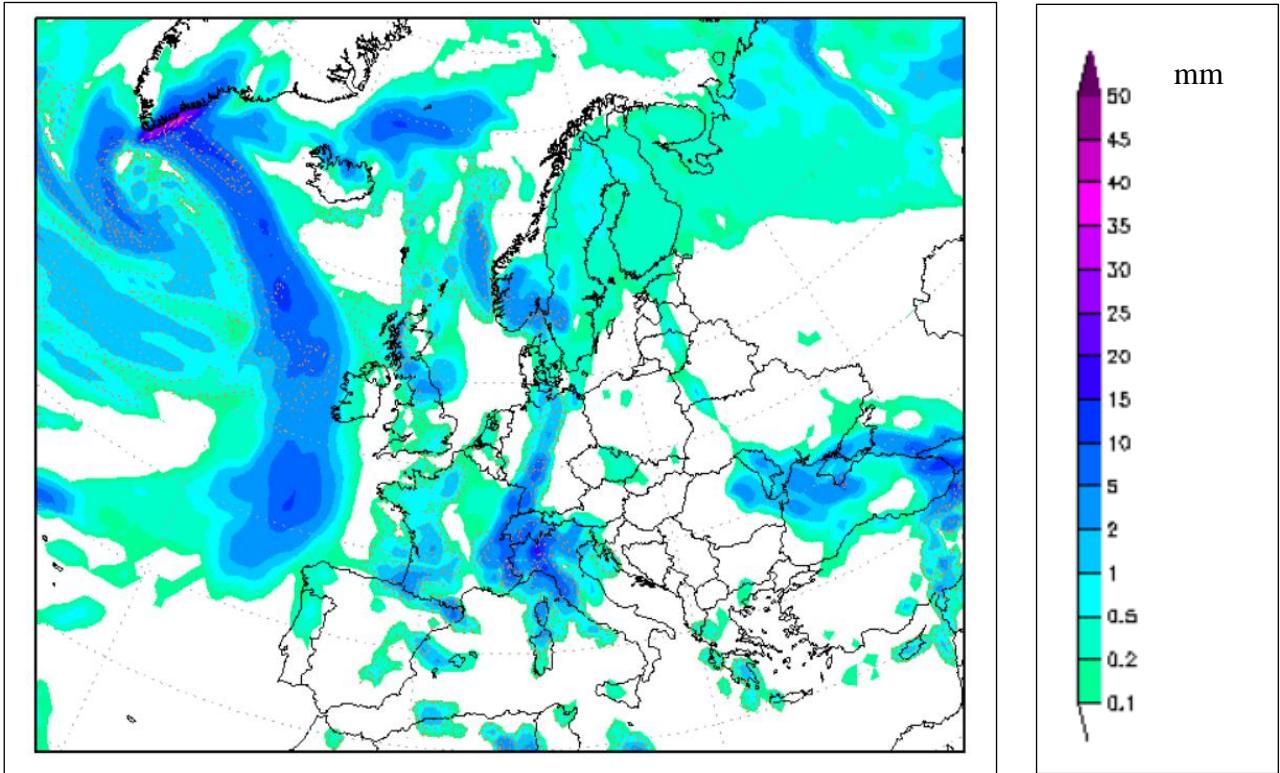


Figura 123 Mappa della precipitazione (mm)

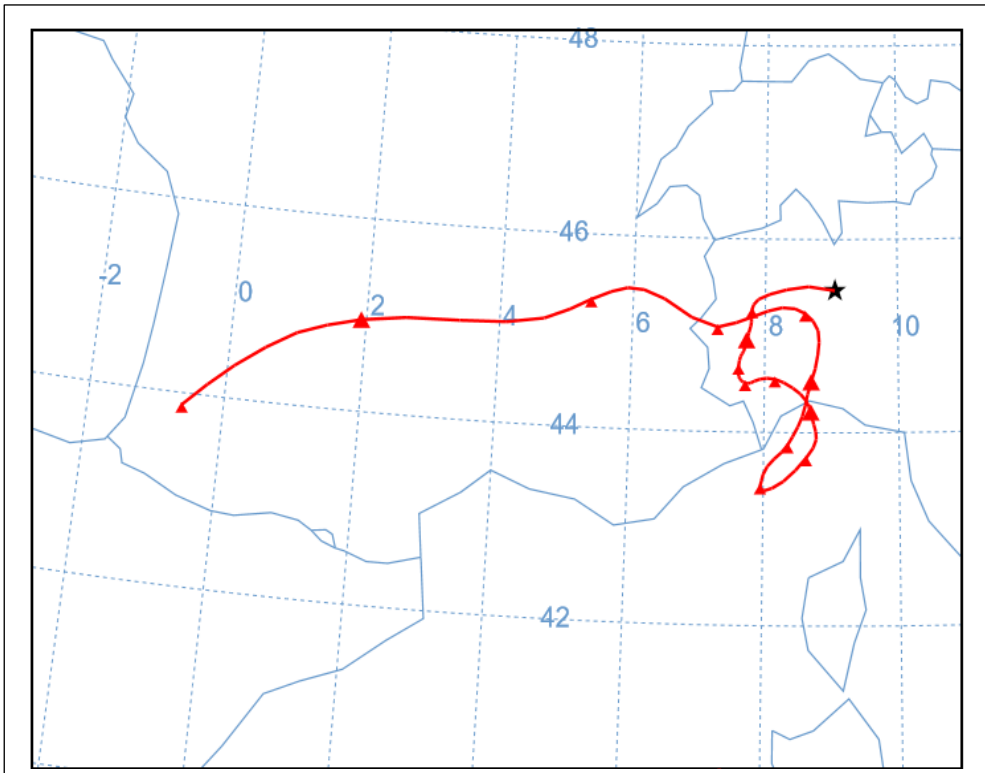


Figura 124- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

### 5.3.3.9 - COMMENTO

Alla superficie isobarica di 500 hPa si nota come l'Italia sia stata soggetta da invasioni di aria tropicale da sud, mite e molto umida, nel trimestre invernale dell'anno 2014.

Risultano evidenti le depressioni nord-atlantiche più profonde del normale a Ovest delle Isole britanniche. Con i colori caldi che provengono dall'Europa dell'est si trovano rappresentati gli anticicloni prevalenti dall'est Europa fino alla Scandinavia e all'Artico.

Al livello isobarico di 850hPa il trasporto di aria subtropicale ha prevalso sulle insistenti depressioni atlantiche, determinando anomalie termiche superiori ad  $1.5/2^{\circ}\text{C}$ .

La configurazione meteorologica a grande scala responsabile di tali anomalie è costituita a Ovest da vaste e profonde depressioni sull'Atlantico e a Est da promontori di alta pressione tra Balcani, Mar Nero e Russia europea.

Le perturbazioni atlantiche hanno sempre avuto la meglio sui fronti caldi dell'est Europa, o occupando il nord Italia completamente o lasciandovi delle bolle di bassa pressione, sparse, di carattere convettivo. Queste bolle isolate, ma di non piccolo areale, hanno spaziato su tutto il nord Italia e sono state il motore responsabile dello sviluppo di precipitazioni intense anche a carattere temporalesco.

Per tutto il trimestre invernale questa saldatura tra le basse e le alte pressioni, originata dallo scontro tra i fronti freddi atlantici ed i fronti caldi orientali, ha dominato sul nord Italia sviluppando fenomeni di precipitazione intensa e di ciclogenisi.

La dominanza dei fronti freddi sui caldi è confermata anche dal fatto che la temperatura media è stata sì superiore al valor medio storico, ma non poi così tanto, proprio perché le fredde temperature atlantiche hanno dominato al suolo.

Tale perturbazione ha avuto un carattere intenso e questo è confermato dalla coincidenza delle circolazioni ai due livelli isobarici di 500 ed 850 hPa. La forte intensità della perturbazione ha determinato la sua persistenza temporale sull'Europa, ed in particolare su Milano.

Le mappe della precipitazione evidenziano l'intensità media con cui ha piovuto nell'arco delle ventiquattro ore delle giornate riportate: l'intensità media in queste giornate si aggira attorno ai 5/10mm di precipitazione. Dal 15 marzo la precipitazione è stata assente sul nord Italia e le depressioni atlantiche hanno iniziato velocemente a ritirarsi, lasciando spazio al bel tempo e a temperature primaverili.

La formazione di precipitazione nei periodi depressionari individuati è principalmente imputabile alla formazione di una ciclogenisi sul mar ligure, con eventuale presenza di Stau sugli appennini e sulle Alpi orientali. La bassa pressione si è formata a seguito dell'ingresso nel Mar Mediterraneo di aria

umida nord-atlantica attraverso la “porta del Rodano”. E’ questo il caso delle traiettorie relative ai giorni del: 2/01, 5/01, 29/01, 27/02, 3/03.

Il 6/02 e il 15/03 le traiettorie si riferiscono ad episodi di Bora in ingresso dalla “porta della Bora” sull’alto adriatico.

La configurazione barica illustrata si è mantenuta sopra il nord Italia da gennaio 2014 a metà marzo 2014. Questa configurazione è stata segnata da profonde depressioni nord-atlantiche che in rapida successione si sono mosse da Ovest a Est alle medie latitudini, da Groenlandia e Islanda verso le isole britanniche, il Mare del Nord e il Baltico, con saccature e ciclogenesi secondarie frequentemente estese al mar ligure.

L’Italia si è trovata proprio in una posizione intermedia tra tali figure bariche, il cui scontro ha determinato l’innalzamento delle temperature medie stagionali, soprattutto delle temperature minime, e la persistenza delle precipitazioni invernali.

I periodi anticiclonici sono stati pressoché assenti, così come le irruzioni di aria artica verso il Mediterraneo.

## 5.4 ANALISI CLIMATOLOGICA DELL'ANNO 2008

### 5.4.1 INTRODUZIONE

Il 2008 è stato un anno più caldo del normale sul continente europeo anche se in Italia, rispetto al trentennio di riferimento 1984-1999, il range di temperatura media non ha presentato di per sé evidenti anomalie rispetto ai caratteri tipici del clima semi-continentale della città.

A Milano in tutto il 2008 sono caduti 1245 mm di precipitazione, rispetto ad un valore medio di 972 mm. In termini di precipitazione cumulata annuale il 2008 è stato precedentemente classificato come anno molto piovoso, ovvero eccedente del 20% il regime pluviometrico annuale medio.

L'anno 2008 è iniziato quindi con un inverno più piovoso della media, con precipitazioni localizzate soprattutto nel mese di gennaio. La primavera, a partire dalla fine del mese di marzo, si è configurata anch'essa con precipitazioni abbondanti, a scapito della stagione estiva che ha lasciato spazio alle normali ondate di calore del periodo caratterizzate da ingenti fenomeni temporaleschi. L'autunno ha concluso l'anno astronomico con abbondante precipitazione.

A livello stagionale le due stagioni di massimo sono state, come da teoria, l'autunno e la primavera. L'inverno è stato però più piovoso dell'estate. A livello mensile si è configurato abbastanza bene il regime pluviometrico medio: novembre è stato il mese più piovoso, a cui è seguito maggio. Rispetto alle anomalie riscontrate negli altri anni del quindicennio, il 2008 è stato uno degli anni meno anomali in termini di precipitazione cumulata, annuale, stagionale e mensile.

L'anomalia pluviometrica stagionale che ha suscitato l'attenzione maggiore è sempre la stagione invernale, che è stata più piovosa della media.

La temperatura media dell'anno non si è discostata di molto rispetto a quella dell'anno medio. Le temperature minime mensili sono state sempre leggermente inferiori alle minime medie del periodo 1984-1999. Al contrario le temperature massime sono state leggermente superiori.

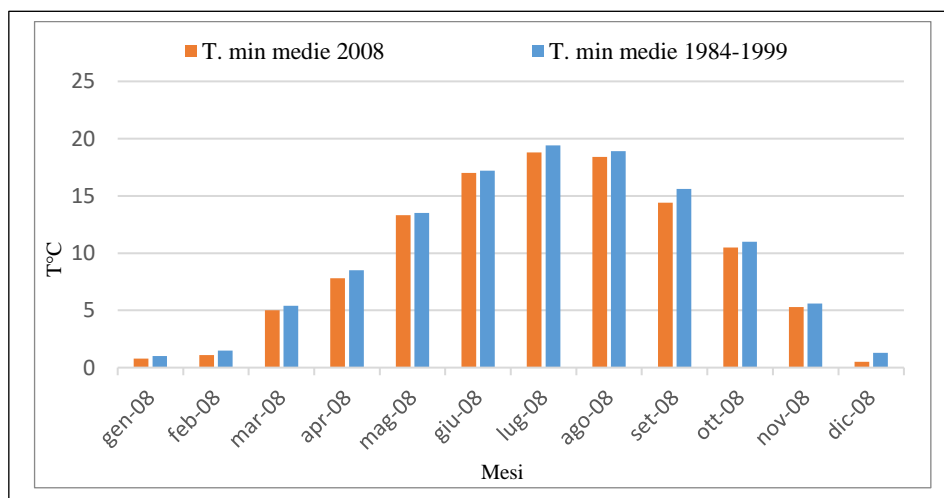


Figura 1525-Temperature (°C) minime periodo medio e 2008

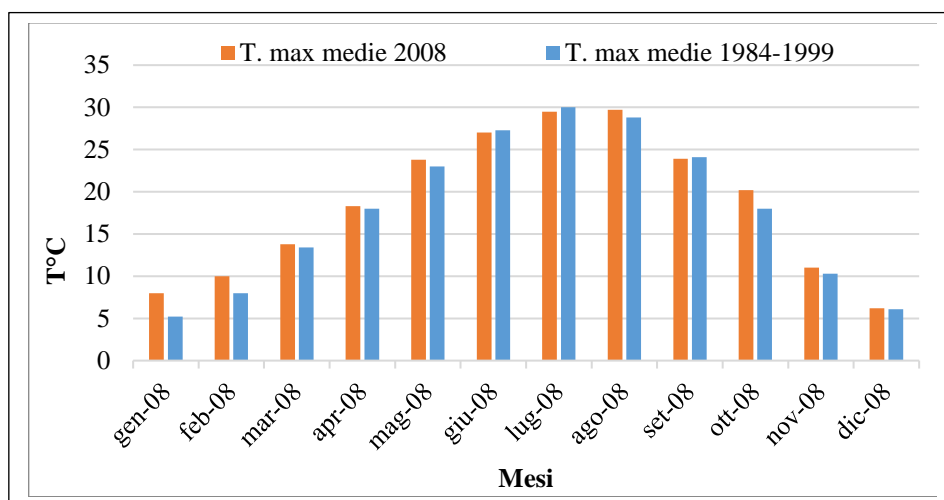


Figura 16-Temperature (°C) massime periodo medio e 2008

La definizione di anno pluviometrico medio deriva anche dalla presenza di alcuni fenomeni tipici del clima milanese, come nebbia e temporali.

La nebbia è stata presente abbondantemente nel mese di gennaio, la neve non è stata presente, ad eccezione del dicembre 2007. Le temperature elevate in pianura non ne hanno permesso la formazione.

Altra peculiarità è stata la presenza del Föhn a gennaio.

In sintesi, il 2008 è stato caratterizzato da temperature miti e moderatamente al di sopra della media. Nel corso dell'anno l'Italia è stata ripetutamente interessata da piogge, spesso associate a intensi fenomeni convettivi, che hanno dato inizio al processo di ricarica delle risorse idriche del suolo profondamente provate dalla persistente siccità degli anni appena precedenti, in particolare del 2007, 2006, 2005.

L'abbondante precipitazione del bimestre invernale non ha causato alluvioni o particolari danni sulla città di Milano, mentre ne ha causati in altre città del nord Italia. L'accumulo di neve abbondante in Lombardia ha causato nelle giornate del 12 e 13 gennaio valanghe con perdita di vite umane (Livigno, SO).

#### 5.4.2 ANALISI DEI DATI INVERNO 2008 – Precipitazione, Pressione, Temperatura

Si riporta di seguito la distribuzione della precipitazione cumulata relativa al trimestre invernale dell'anno 2007/2008, a partire dal mese di ottobre 2007, e una tabella riassuntiva che evidenzia per il trimestre invernale 2008 la correlazione tra i giorni piovosi e la pressione atmosferica.

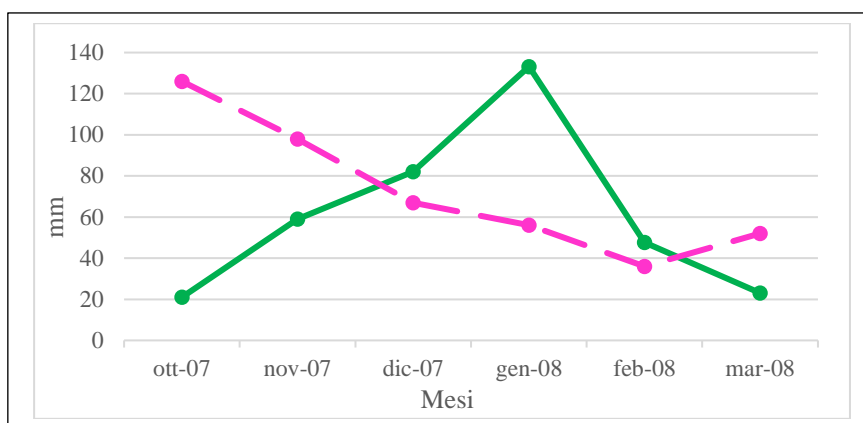


Figura 17-Confronto precipitazione invernale cumulata periodo medio e 2008

Il trimestre invernale del 2008 deve la principale anomalia positiva di precipitazione al mese di gennaio.

Il trimestre di chiusura dell'anno 2007 è stato meno piovoso della media, ma la precipitazione cumulata è cresciuta nettamente da ottobre a dicembre.

L'inverno del 2008 ha accumulato ben 204 mm di precipitazione, distribuiti su 25 giorni piovosi. A livello quantitativo la stagione è risultata più piovosa del 40%, rispetto al valore della serie 1984-1999. I giorni piovosi invece non hanno superato di molto il numero medio pari a 21.

L'inverno 2008 non si è dunque configurato come una stagione di ristagno con scarsità di precipitazione come dovrebbe essere in accordo con il regime pluviometrico di Milano.

Dalla tabella successiva risulta che gennaio è stato il mese più piovoso del trimestre con un numero di giorni piovosi pari a 11 su 25 totalizzati durante l'inverno. I rimanenti giorni piovosi sono distribuiti tra febbraio e marzo rispettivamente con 5 e 9 giorni piovosi, nella media mensile.

I giorni di precipitazione sono correlati con l'andamento della pressione atmosfera in loco, sotto l'ipotesi semplificativa di identificazione del giorno piovoso come giorno di bassa pressione.

Nel trimestre invernale del 2008 i giorni di alta pressione, associati ad assenza di precipitazione, hanno avuto la prevalenza per un totale di 66 giorni asciutti.

I giorni di pioggia sono dislocati all'interno del trimestre in tre gruppi barici depressionari che si trovano all'inizio di gennaio, a metà gennaio ed a inizio febbraio. Marzo presenza 9 giorni di bassa pressione raggruppati a due a due all'interno del mese e dovuti probabilmente a saldature di debole intensità.

Le temperature del trimestre non sono ritenute anomale. Le temperature minime e massime non presentano anomalie considerevoli rispetto ai valori della serie 1984-1999. Le temperature minime si sono mantenute di poco inferiori ai valori medi, e le massime di poco superiori. Il mese con l'anomalia termica principale è stato gennaio, che si è presentato come mese più caldo. Le temperature medie di

gennaio sono state maggiorate a causa della presenza dell'evento di Föhn nei giorni del 21/01 e 27-28/01, in cui si nota un brusco aumento della temperatura media, dovuto all'aumento delle temperature massime e minime giornaliere.

°C	Gennaio	Febbraio	Marzo
<b>T.max 1984-1999</b>	5.2	8	13.4
<b>T.max 2008</b>	8	10	14.2
<b>T.min 1984-1999</b>	0	1.6	5.4
<b>T.min 2008</b>	0.8	1.1	5
<b>T. media 1984-1999</b>	2.6	4.8	9.4
<b>T. media 2008</b>	4.4	5.5	10

Tabella 37-Temperature 2008 (°C)

Giorni del mese	Giorni con precipitazione			Pressione atm			Temperatura media		
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Gennaio	Febbraio	Marzo	Gennaio	Febbraio	Marzo
1	No	<i>Sì</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	-0.6	5.3	12.7
2	No	<i>Sì</i>	No	Alta	<i>Bassa</i>	Alta	0.5	5.2	15.6
3	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	No	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	Alta	0.7	5.8	13.7
4	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	1.1	5.3	10.9
5	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	2.8	6.1	6.9
6	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	<i>Sì</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	<i>Bassa</i>	2.5	6	6.6
7	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	2.9	6.4	4.6
8	No	No	No	Alta	Alta	Alta	2.3	9.4	7.2
9	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	3.7	5.5	8.2
10	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	3.3	3	8.4
11	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	4.4	6	9.1
12	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	4.8	4.2	11
13	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	4.7	3.1	12.4
14	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	5.2	3.6	14.7
15	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	6.1	4	12.2
16	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	6.9	6.1	12.6
17	<i>Sì</i>	No	<i>Sì</i>	<i>Bassa</i>	Alta	<i>Bassa</i>	6	4.1	12.3
18	<i>Sì</i>	No	<i>Sì</i>	<i>Bassa</i>	Alta	<i>Bassa</i>	6.6	0.6	12.4
19	No	No	No	Alta	Alta	Alta	6	1	12.6
20	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.7	4.9	9.4
21	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.4	7.4	9.2
22	No	No	No	Alta	Alta	Alta	9.2	6	8.2
23	No	No	No	Alta	Alta	Alta	6.1	6.1	9.2
24	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.2	6	5.6
25	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.2	9.2	6.4
26	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.6	7	7.9
27	No	No	No	Alta	Alta	Alta	8.5	7.2	8.6
28	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	10.5	10.1	9.9
29	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	6.4	9.3	11.1
30	No	/	No	Alta	/	Alta	7.1	/	12.9
31	No	/	No	Alta	/	Alta	6.9	/	13.6

Tabella 38-Individuazione dei giorni di anomalia di precipitazione



L'inverno a Milano ha visto come protagonista la nebbia con ben 17 giorni, in cui è stata registrata una visibilità al di sotto del chilometro, nel mese di gennaio.

La neve non è stata presente a Milano nel trimestre invernale del 2008 ad eccezione del dicembre 2007 e di una comparsa di due giorni sulla città.

A marzo si sono verificati sei giorni di temporali. Questo conferma il carattere convettivo del mese e la comparsa di giorni piovosi raggruppati a due a due nel mese di marzo.

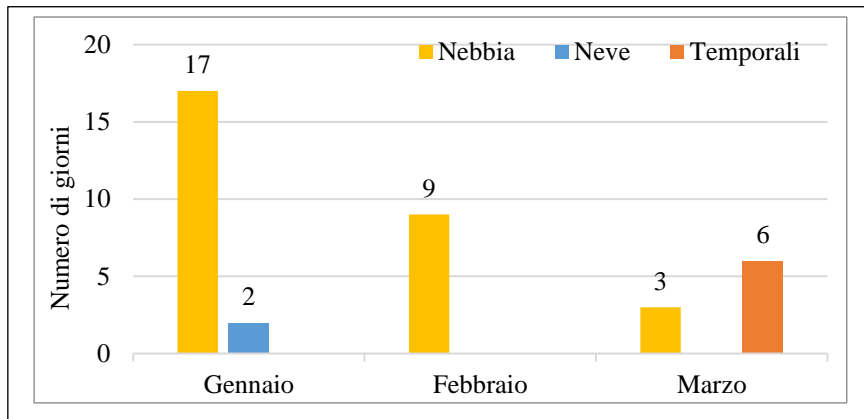


Figura 128-Numero giorni con nebbia, neve, temporali inverno 2008

Il Föhn ha fatto la sua comparsa in pianura nelle giornate del 22/01 e del 27/28 gennaio. Come conseguenza le temperature medie in queste giornate risultate maggiorate proprio a causa dell'aumento delle temperature massime.

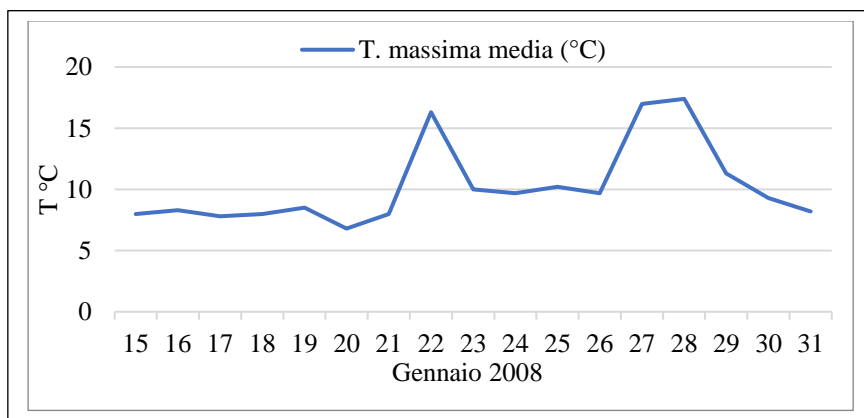


Figura 18-Fohn 22/01 e 27-28/01 2008, temperatura massima (°C)

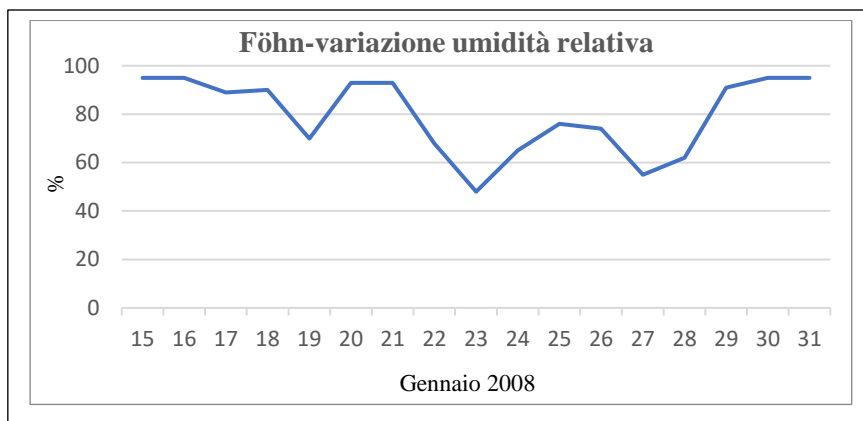


Figura 130-Fohn 22/01 e 27-28/01 2008, umidità relativa (%)

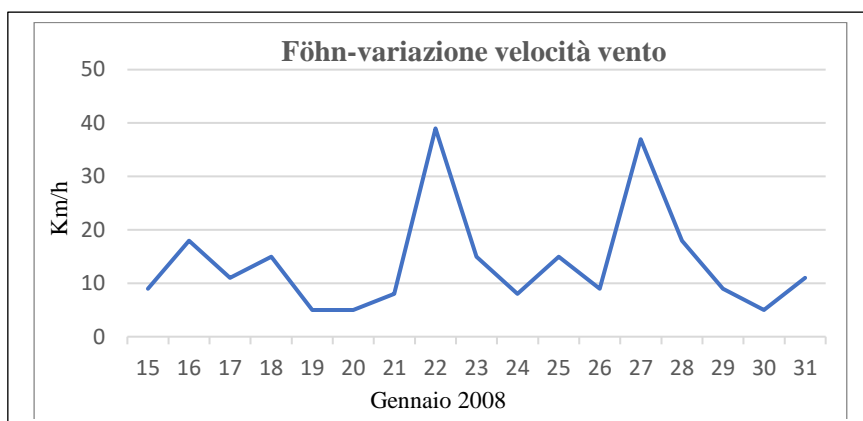


Figura 131-Fohn 22/01 e 27-28/01 2008, velocità del vento (Km/h)

Il Föhn ha provocato l'innalzamento della temperatura massima di circa otto gradi, una diminuzione dell'umidità relativa del 25% ed un innalzamento della velocità del vento di 32 km/h nelle tre giornate del 22/27/28 gennaio 2008, causando ingenti raffiche calde e tiepide sulla città.

L'abbondante piovosità invernale è stata determinata da centri di bassa pressione tra gennaio e febbraio: il numero di giorni piovosi non è stato di molto superiore alla media. Dunque il carattere della precipitazione dominante deve essere caratterizzato da un'elevata intensità media degli eventi di pioggia.

### **5.4.3 ANALISI DEI DATI INVERNO 2008 – Mappe del geo-potenziale**

Dalla tabella alla pagina precedente sono stati individuati tre gruppi barici di lunga estensione temporale che hanno insistito su Milano nell'inverno 2008:

- 12 gennaio 2008-18 gennaio 2008, sette giorni di precipitazione consecutivi;
- 1 febbraio 2008-5 febbraio 2008, cinque giorni di precipitazione consecutivi.

Di seguito vengono riportate le mappe del geo-potenziale, alle quote di 500 e 850 hPa, e le mappe di precipitazione ritenute più significative e rappresentative delle basse pressioni individuate. In particolare si riportano le mappe del geo-potenziale riferite alle ore 00 UTC, dei giorni:

- 13/01/2008;
- 16/01/2008;
- 18/01/2008;
- 2/02/2008;
- 5/02/2008.

Di tali giorni sono riportate anche le traiettorie delle circolazioni individuate tramite il programma Hi-Split.

Infine si riportano le mappe del geo-potenziale, di precipitazione e le traiettorie relative all'evento di Föhn del 22 gennaio 2008 e relative alla cella temporalesca che ha investito la pianura padana nella giornata del 4 marzo 2008.

5.4.3.1 - 13 gennaio 2008

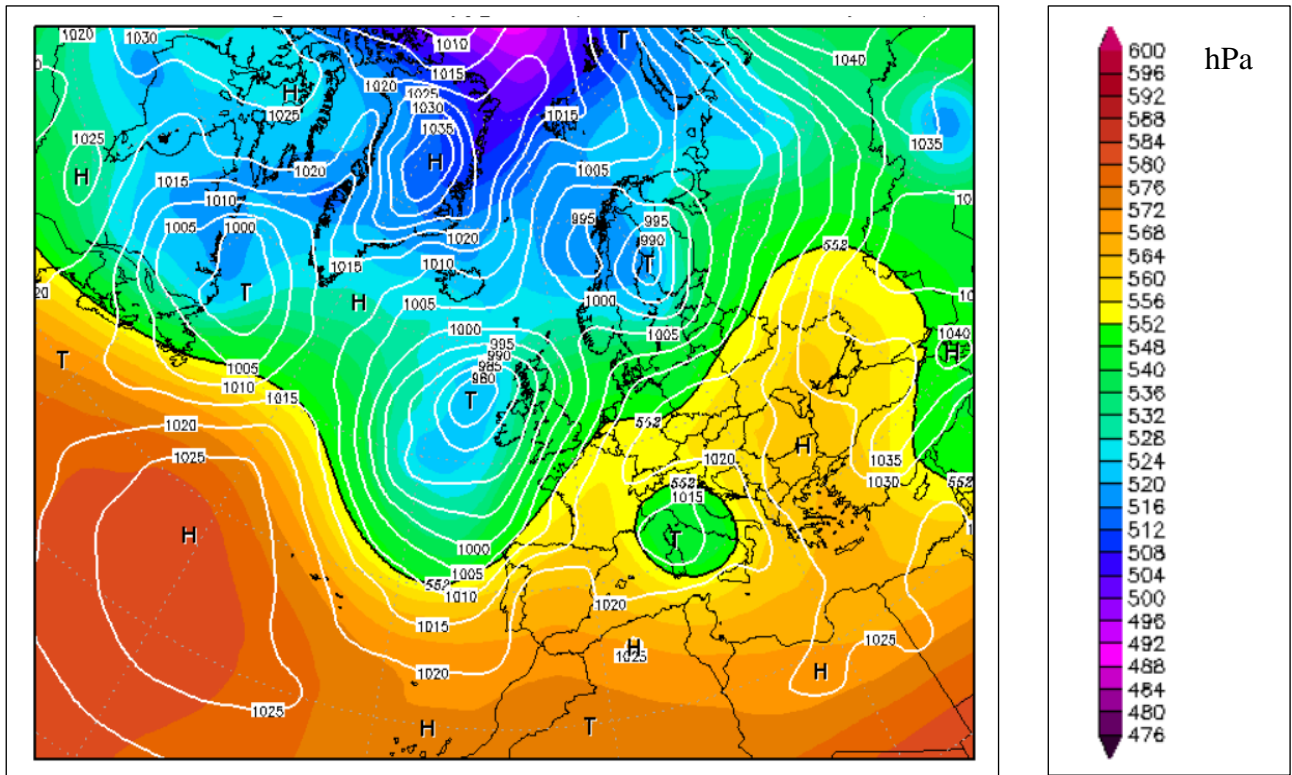


Figura 132- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

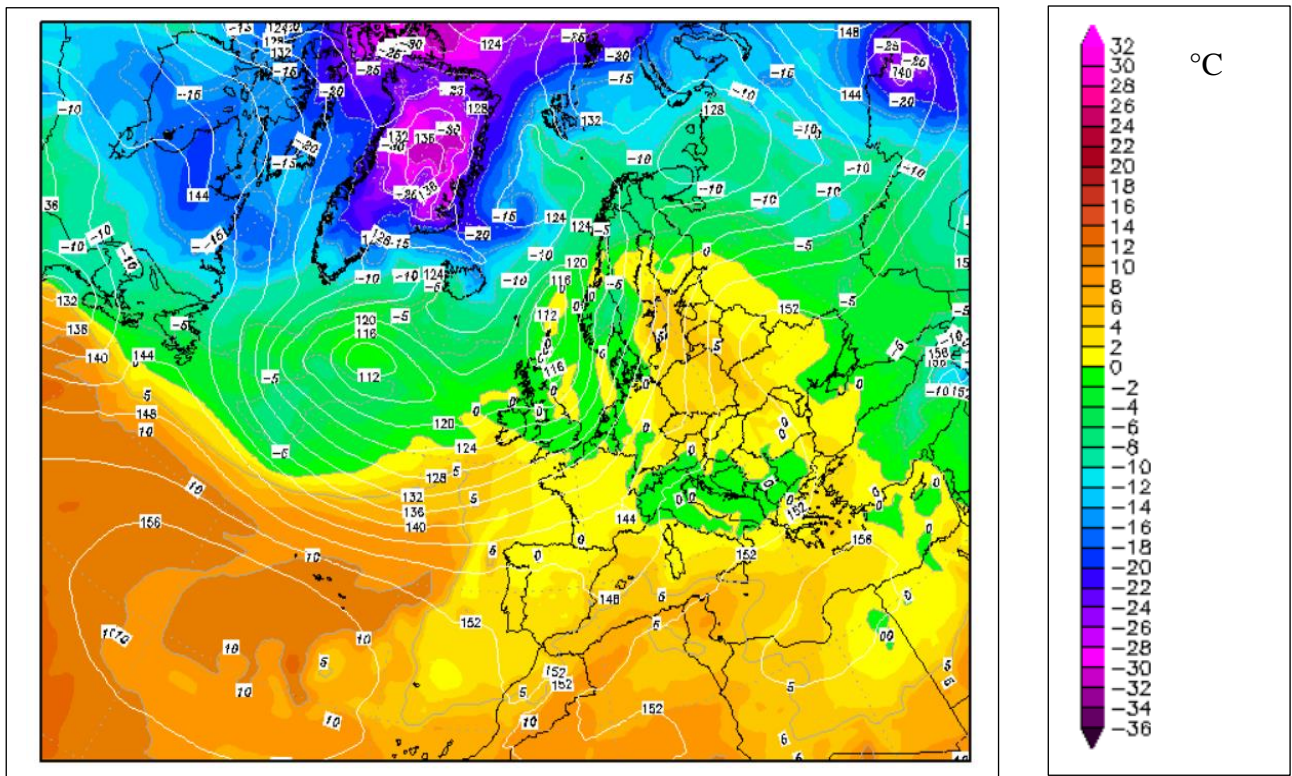


Figura 133- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

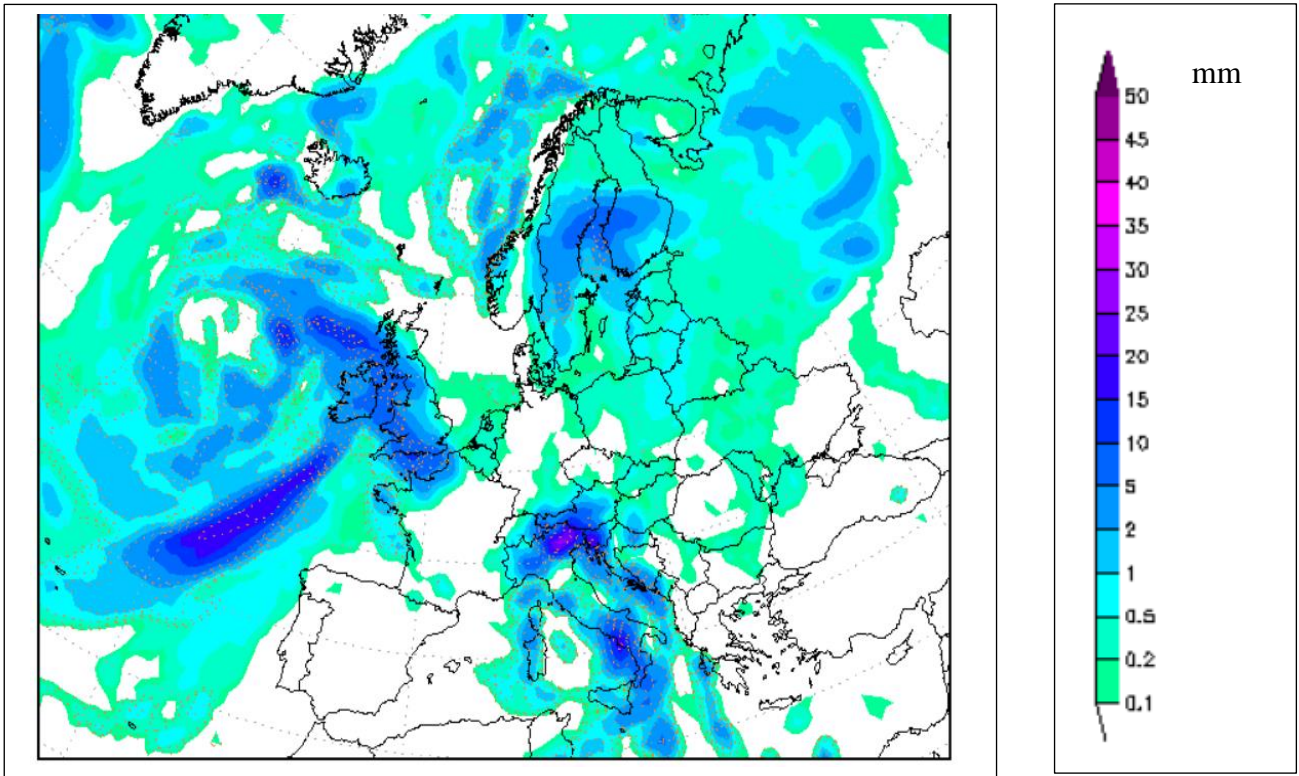


Figura 135-Mappa della precipitazione (mm)

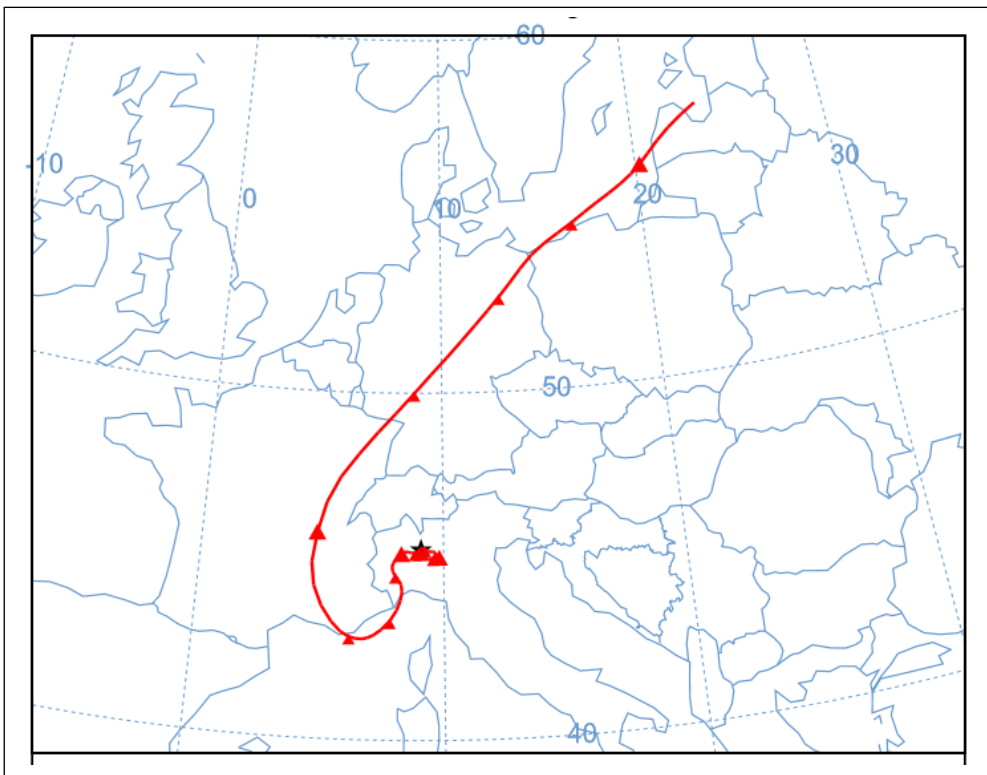


Figura 136- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.4.3.2 - 16 gennaio 2008

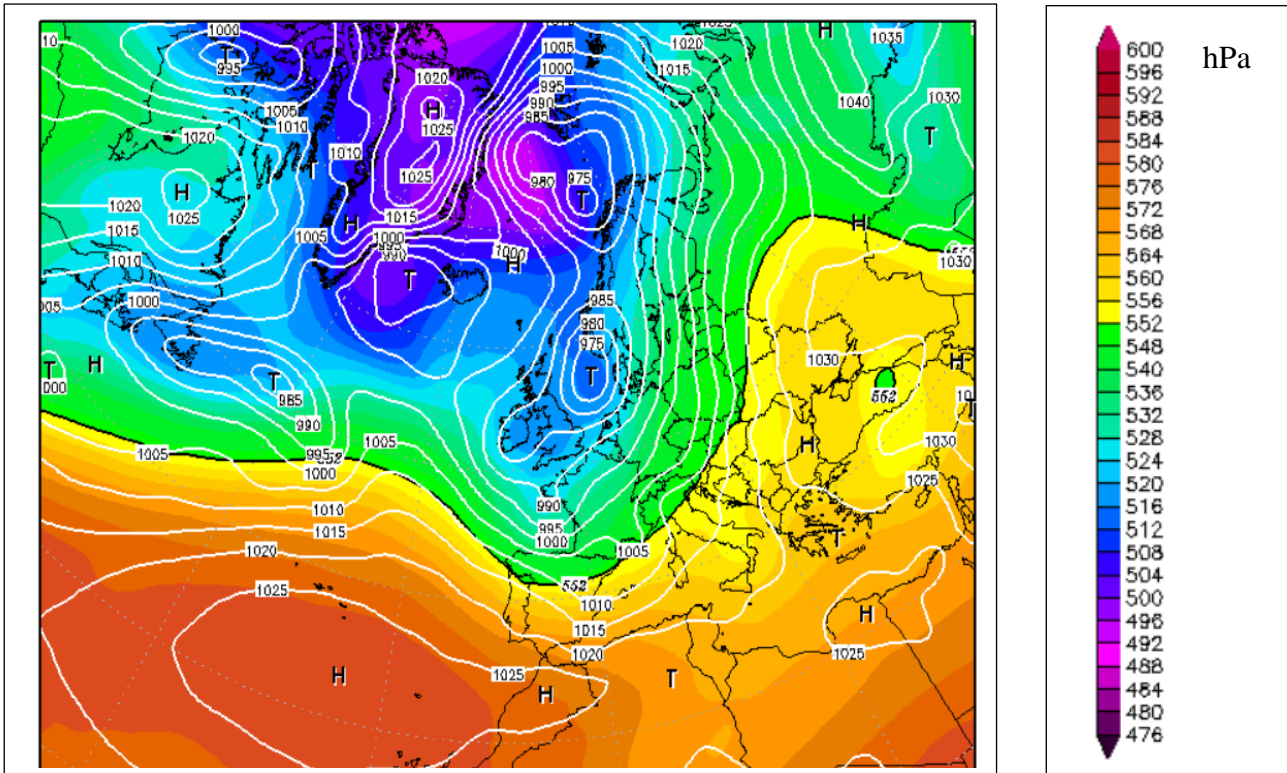


Figura 136- Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

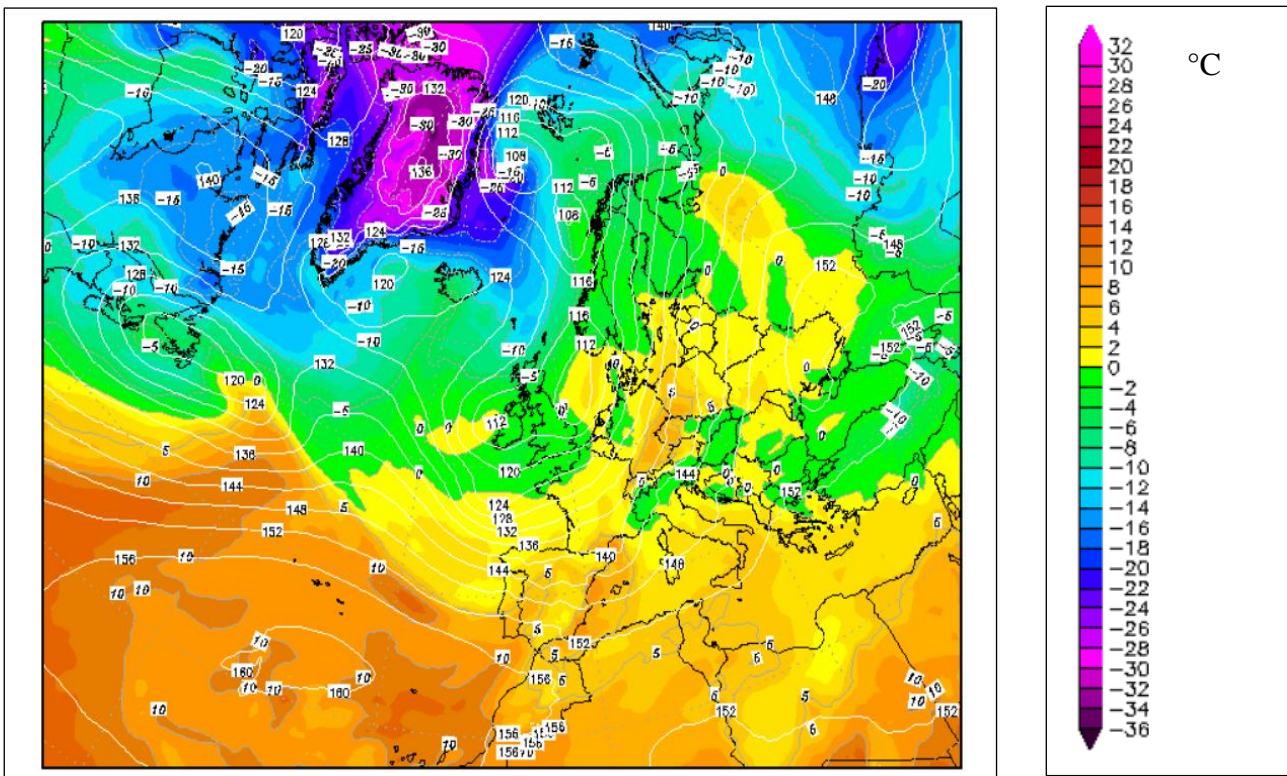


Figura 137- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

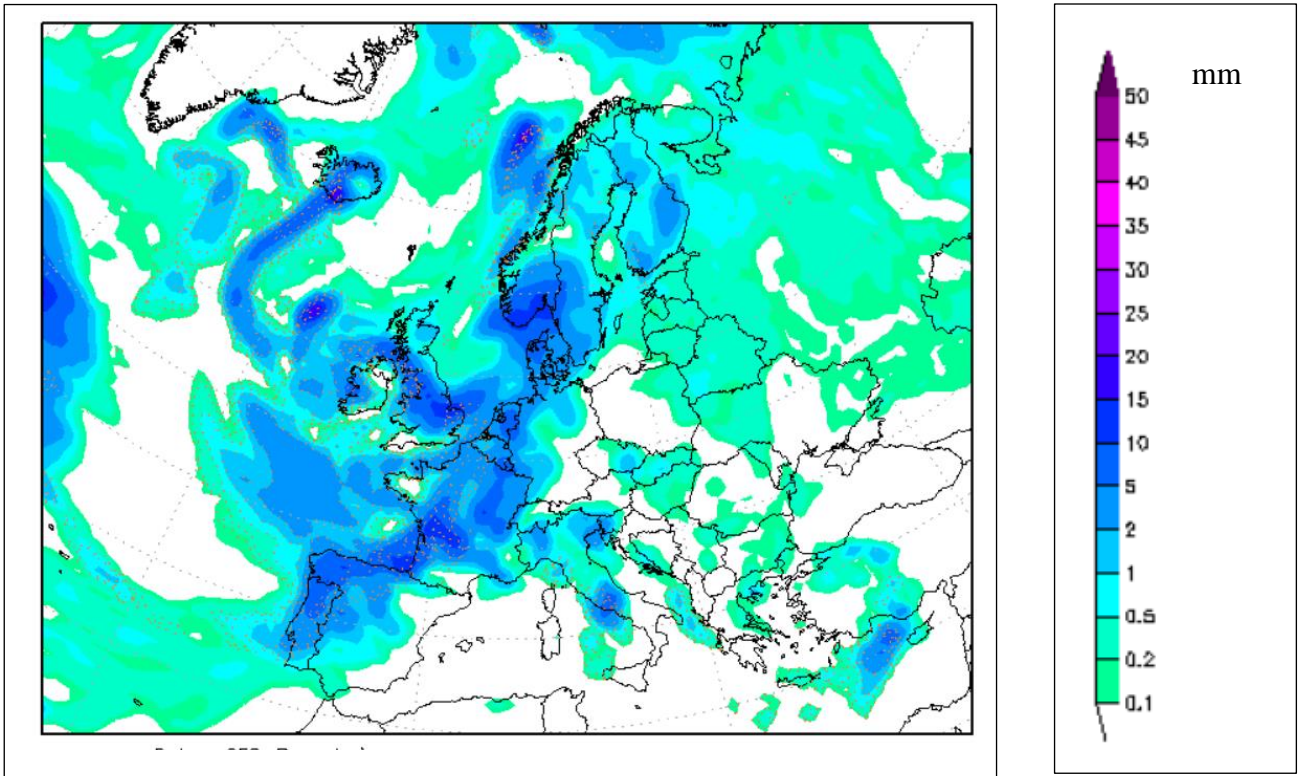


Figura 138-Mappa della precipitazione (mm)

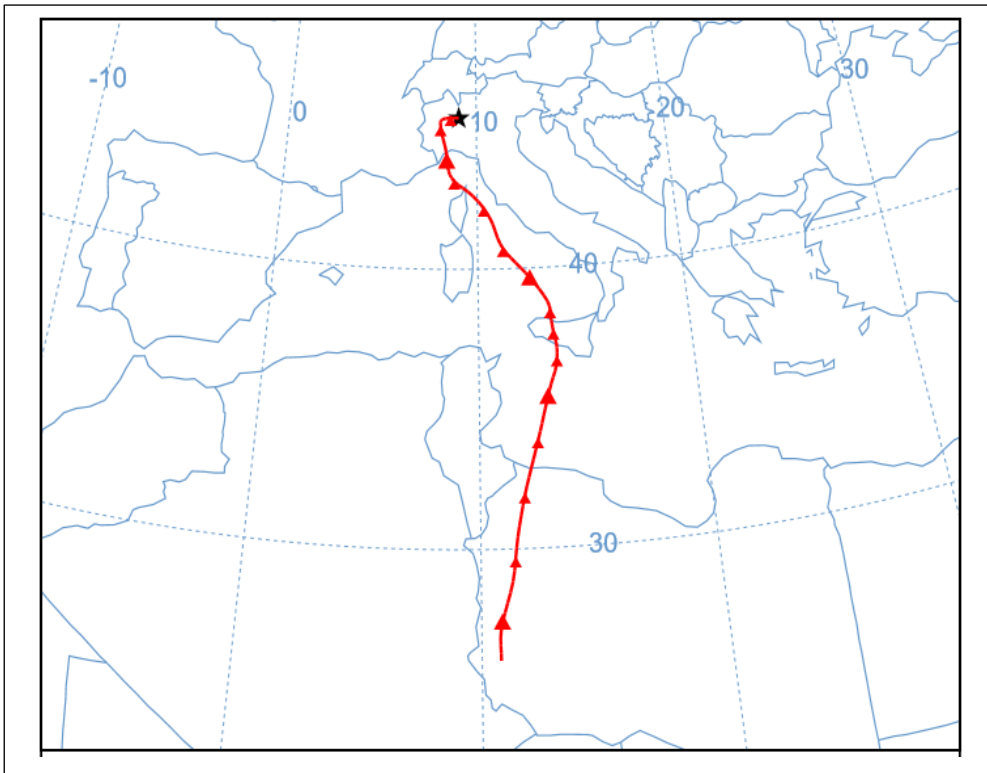


Figura 139- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.4.3.3 - 18 gennaio 2008

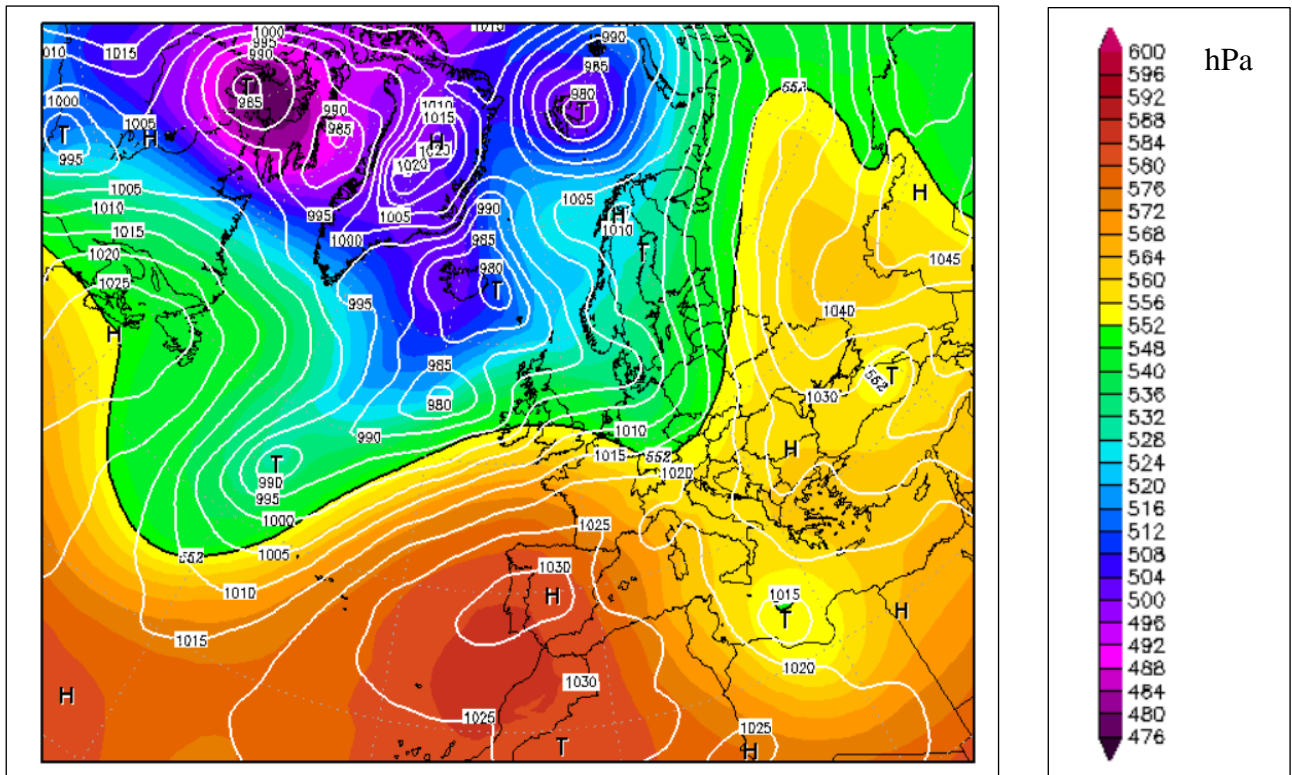


Figura 140 Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

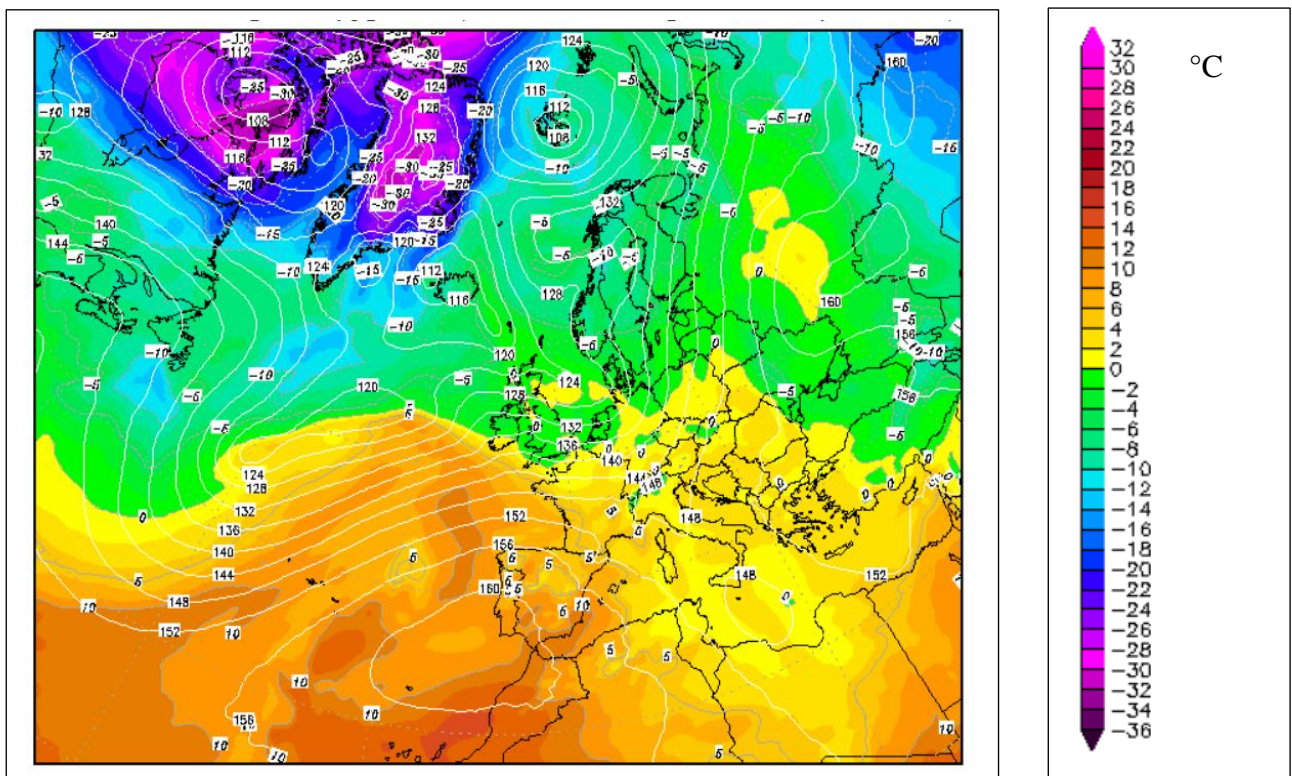


Figura 141- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)



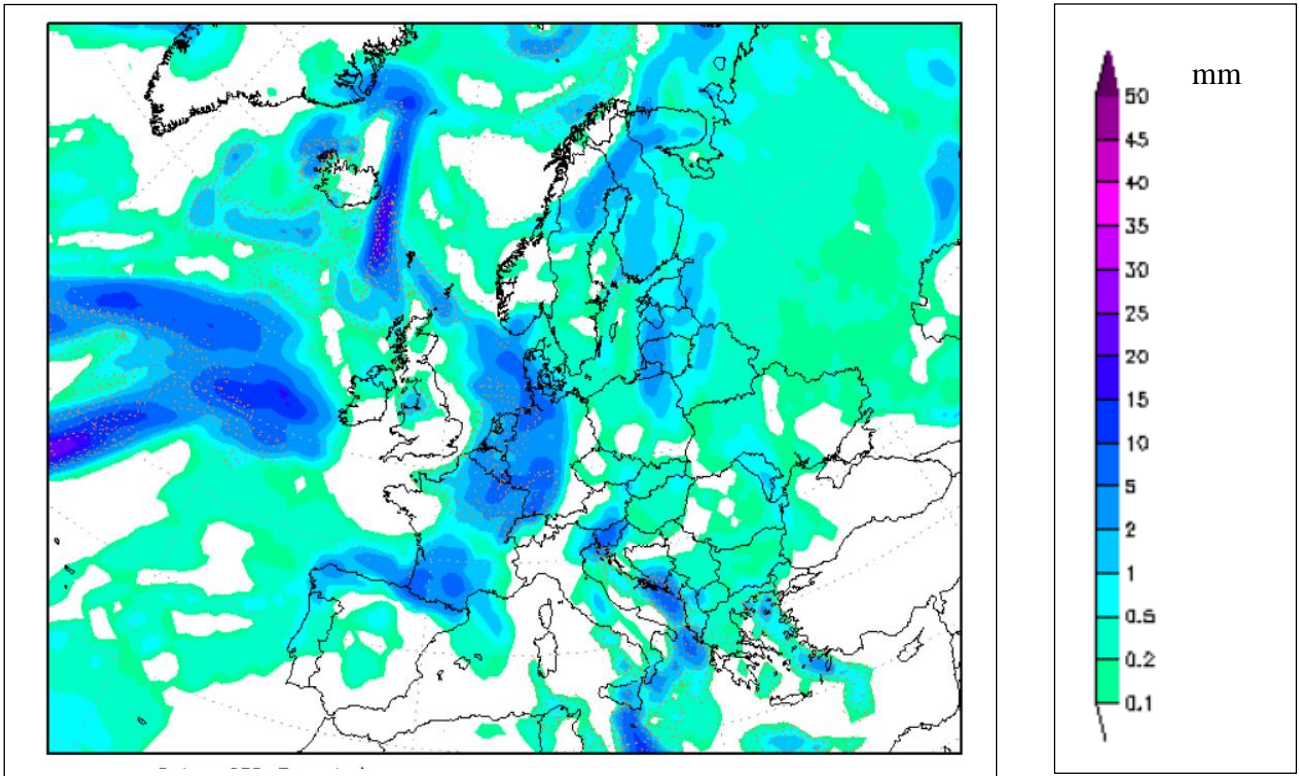


Figura 142-Mappa della precipitazione (mm)

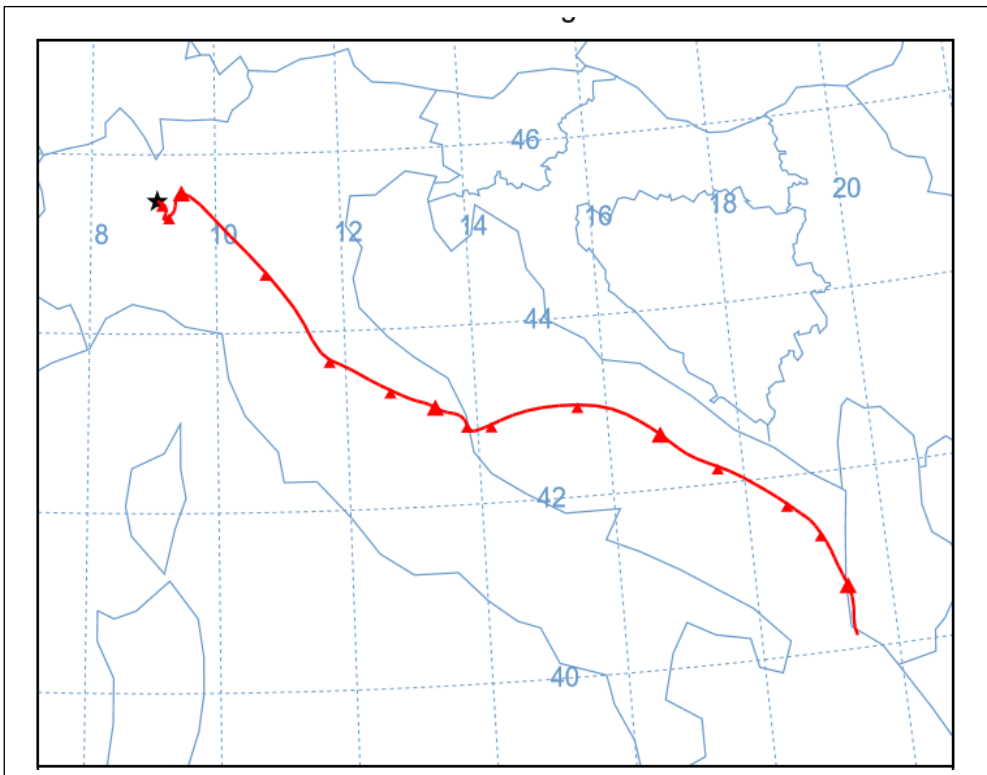


Figura 143- Traiettorie della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.4.3.4 - 2 febbraio 2008

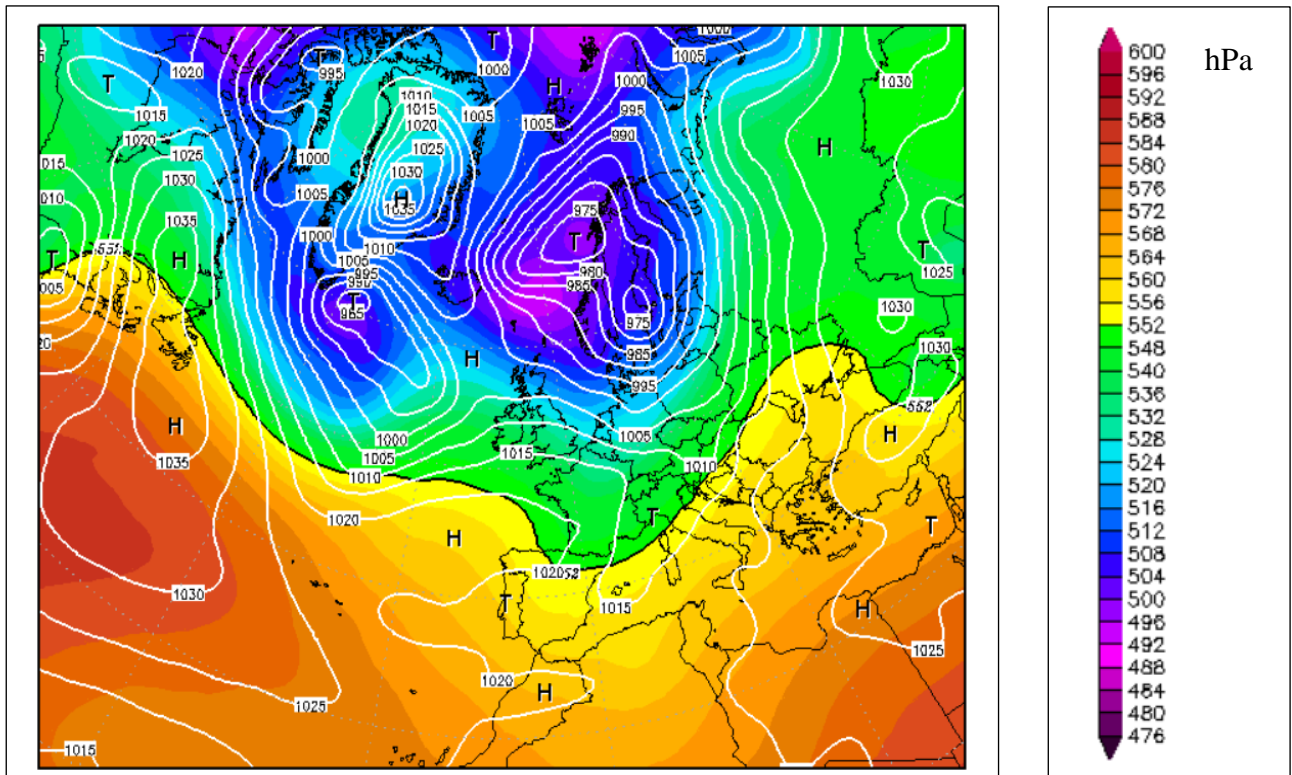


Figura 144 Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

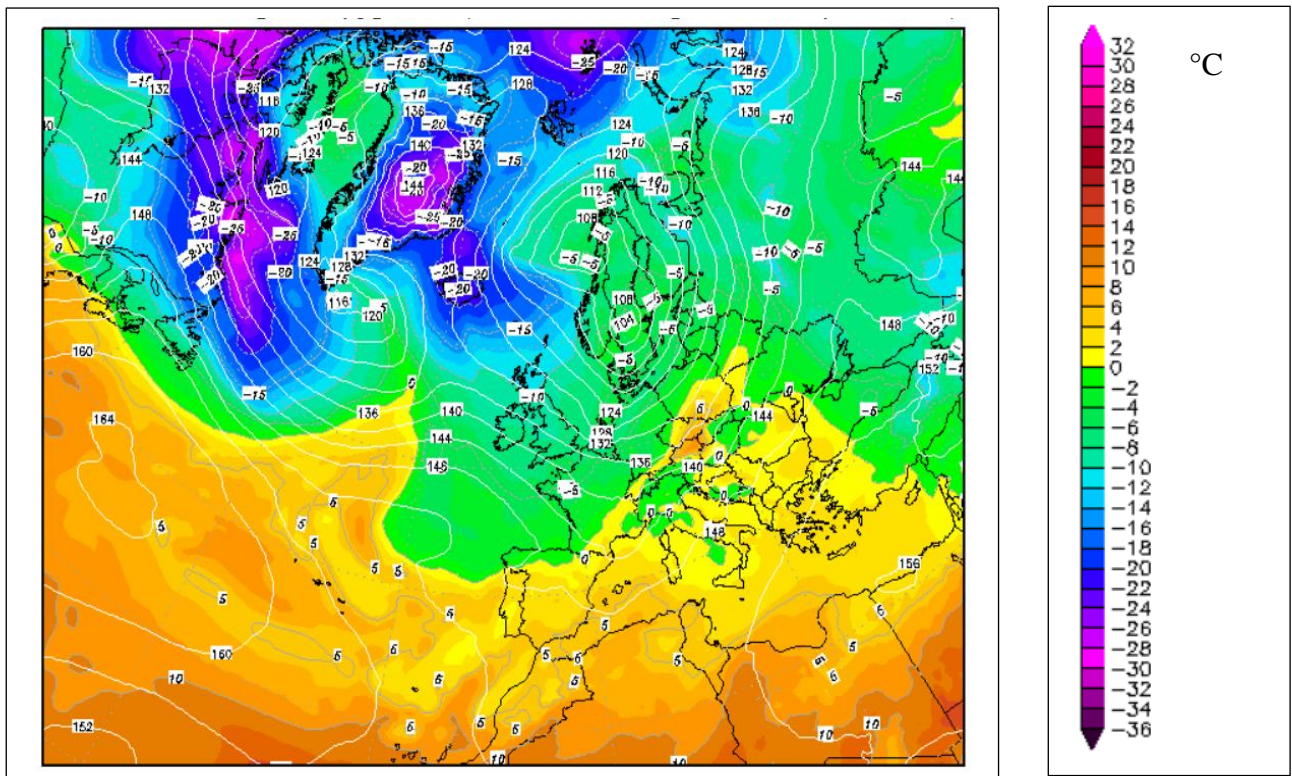


Figura 145- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

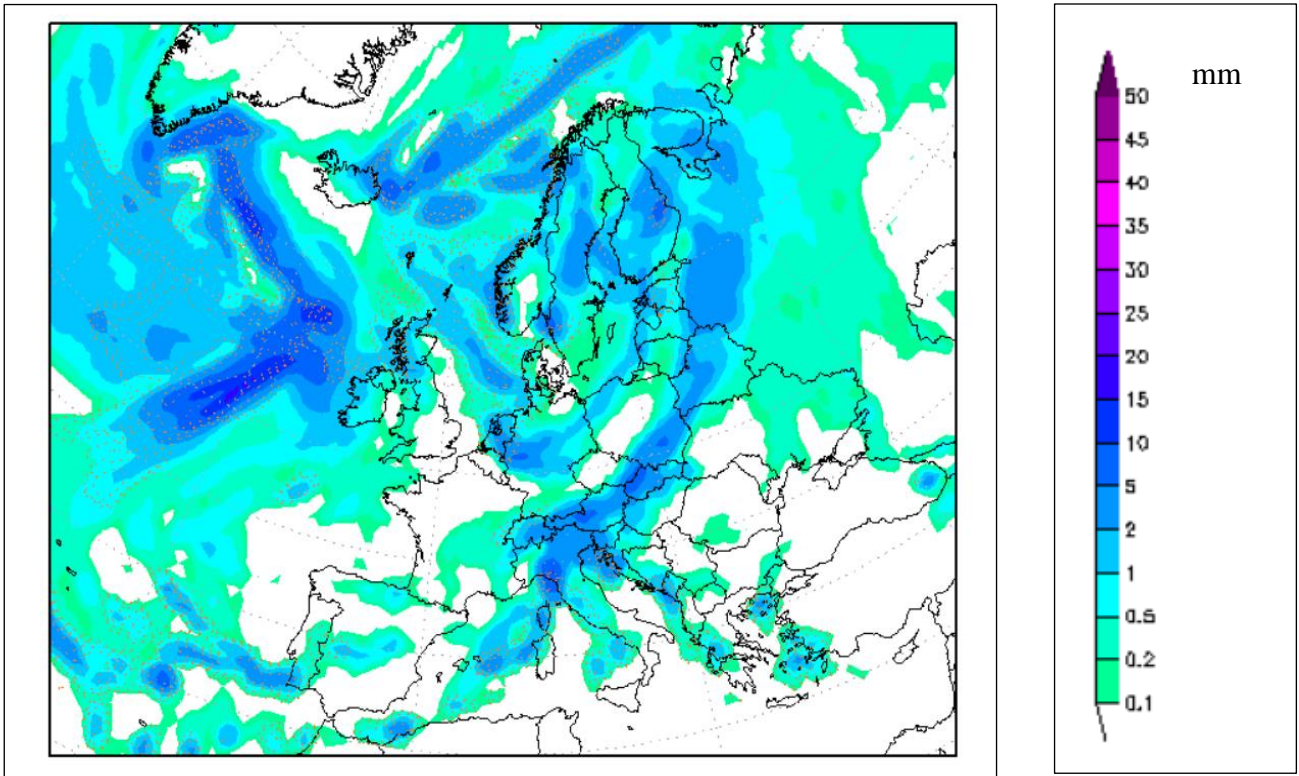


Figura 146-Mappa della precipitazione (mm)

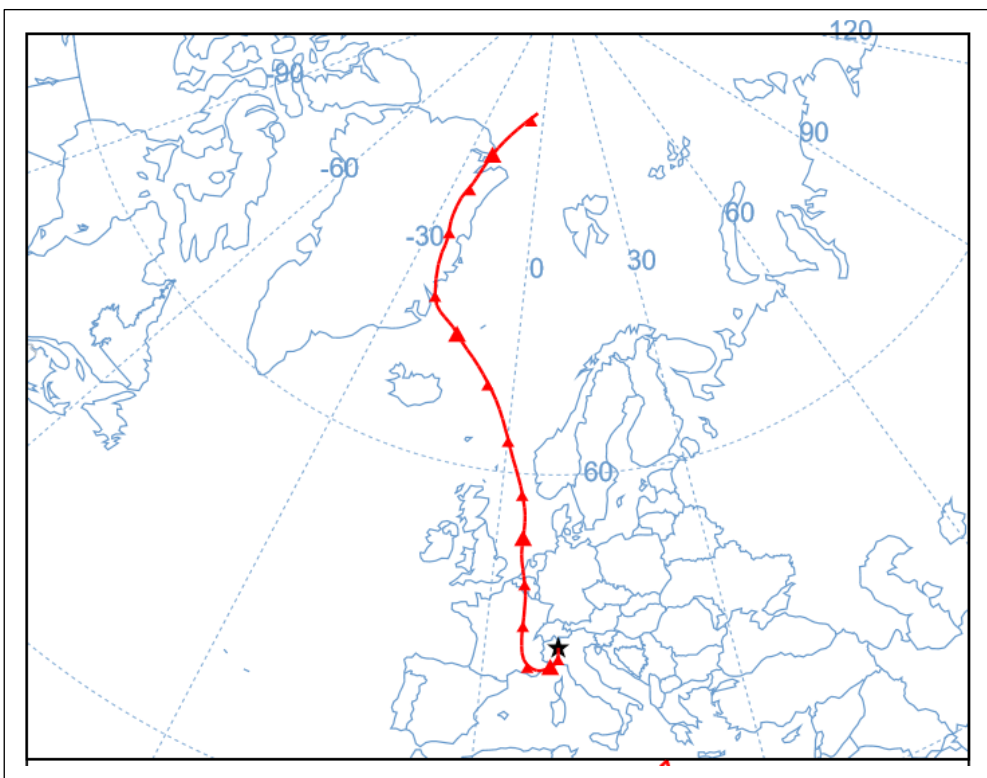


Figura 147- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.4.3.5 - 5 febbraio 2008

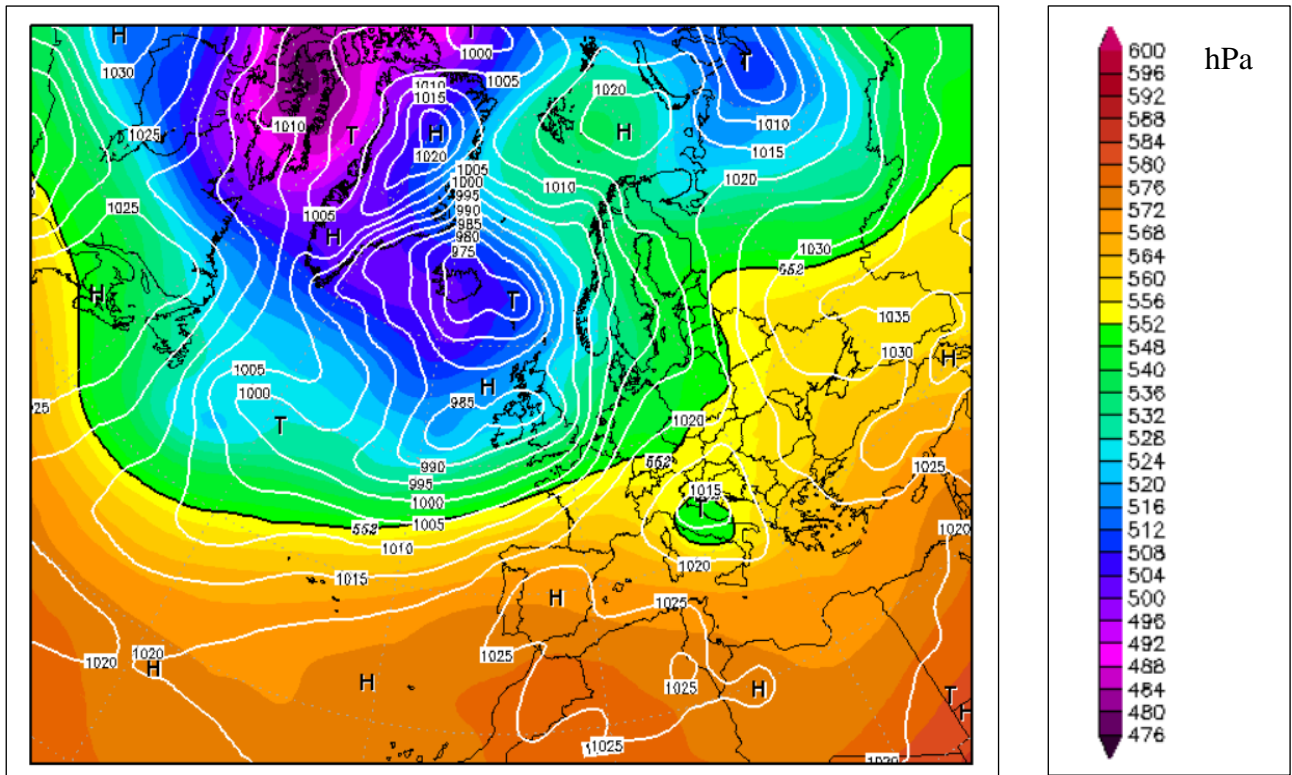


Figura 148-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

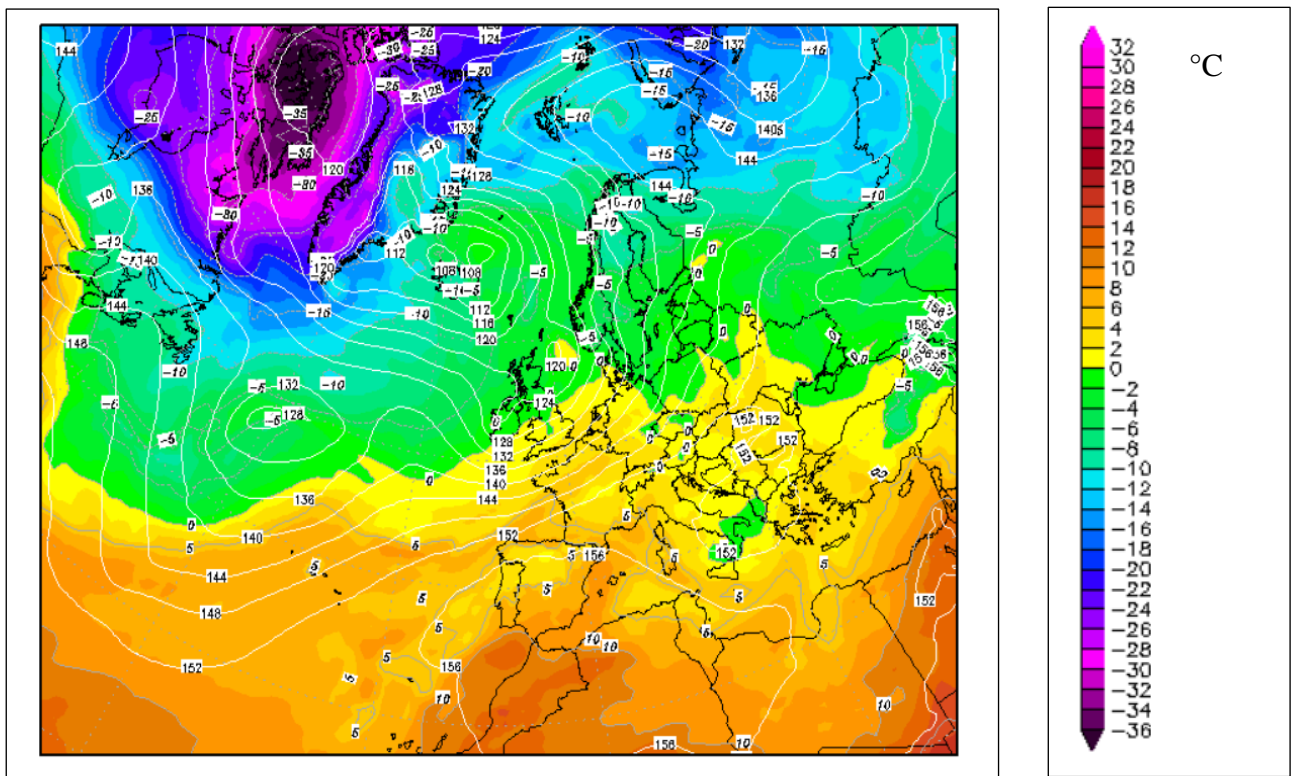


Figura 149- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

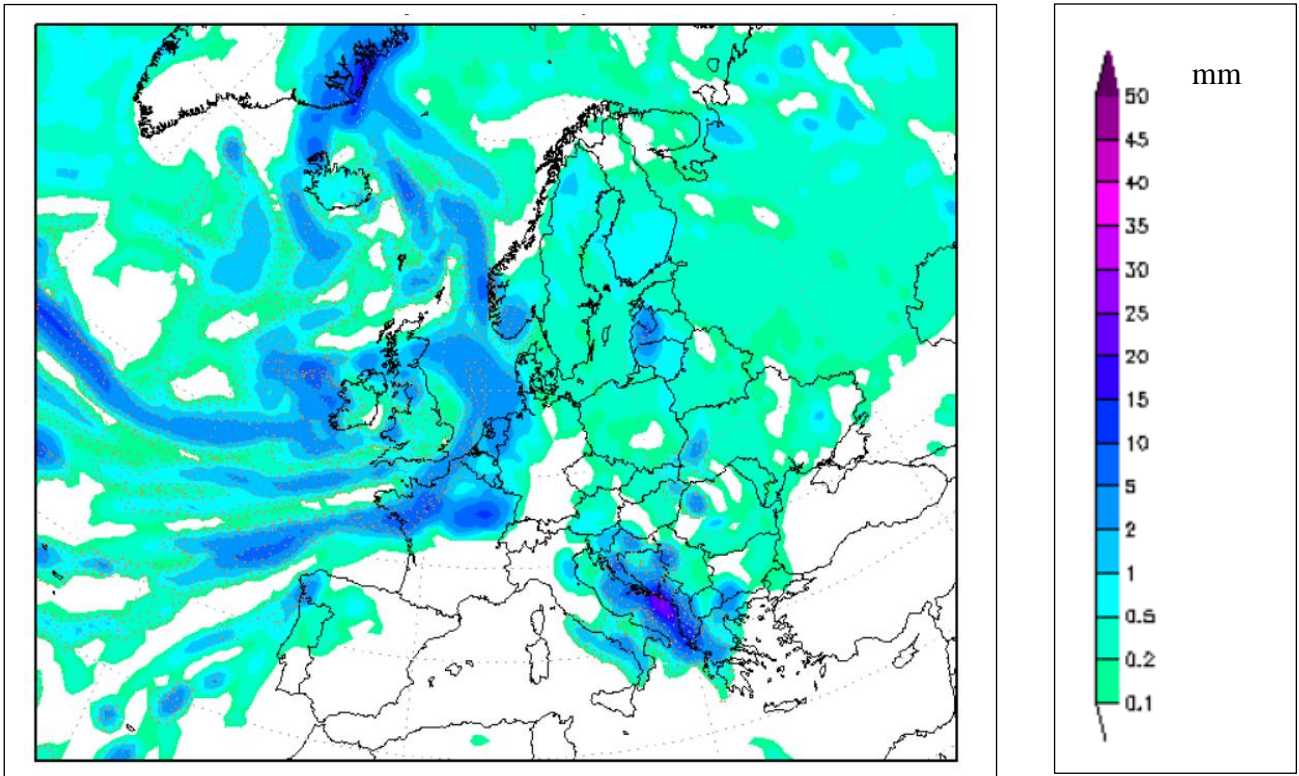


Figura 150-Mappa della precipitazione (mm)

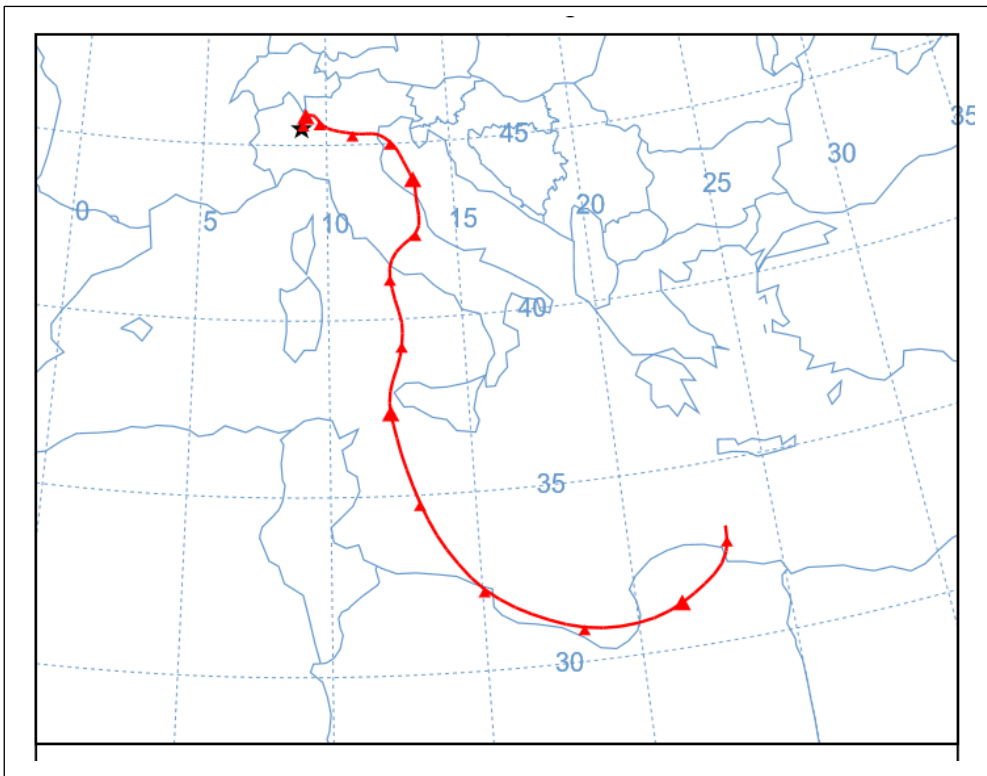


Figura 151- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

### 5.4.3.6 - Evento di Föhn del 22 gennaio 2008

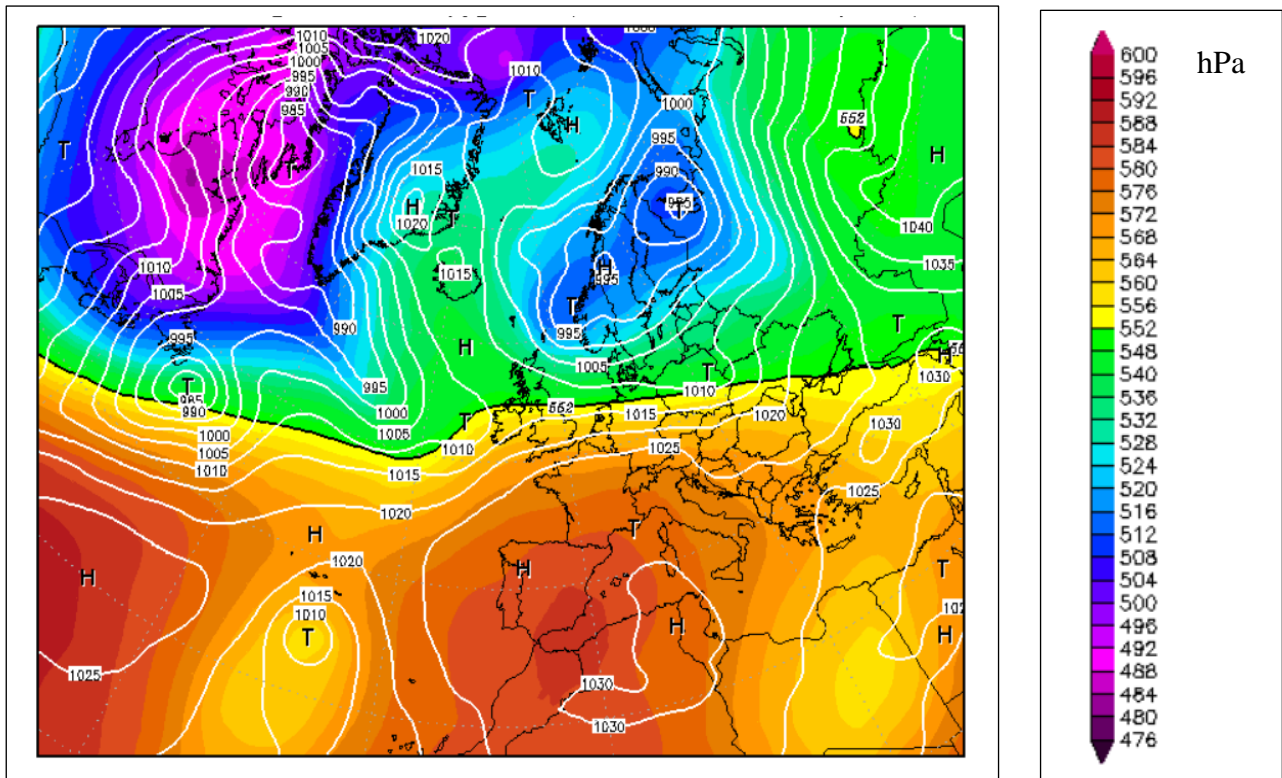


Figura 152-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

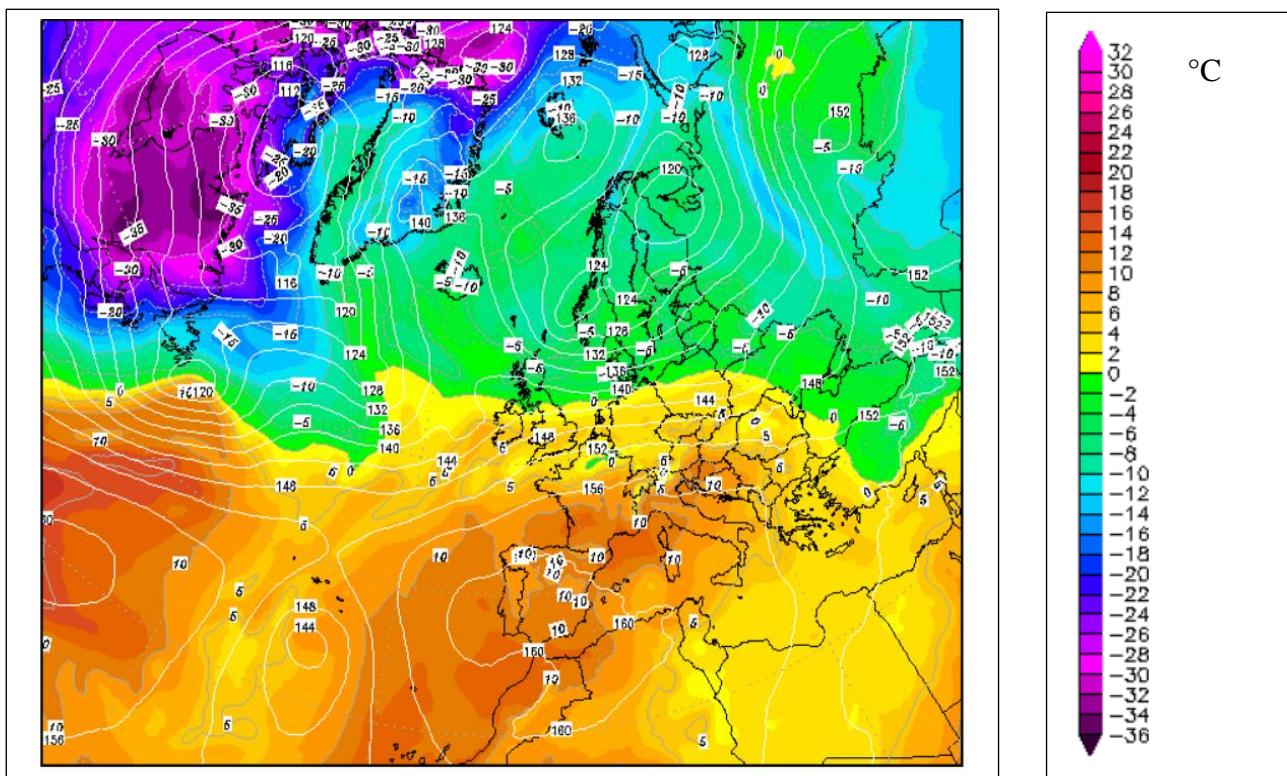


Figura 153- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

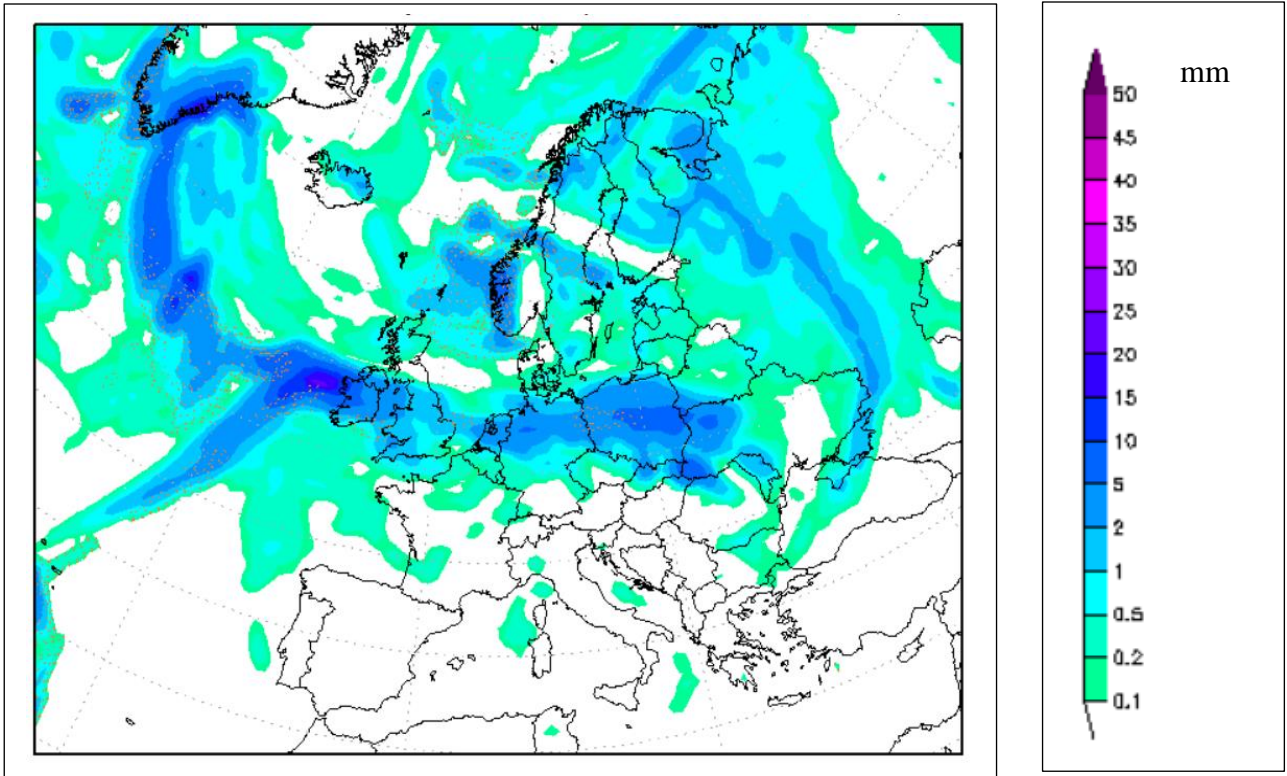


Figura 154-Mappa della precipitazione (mm)

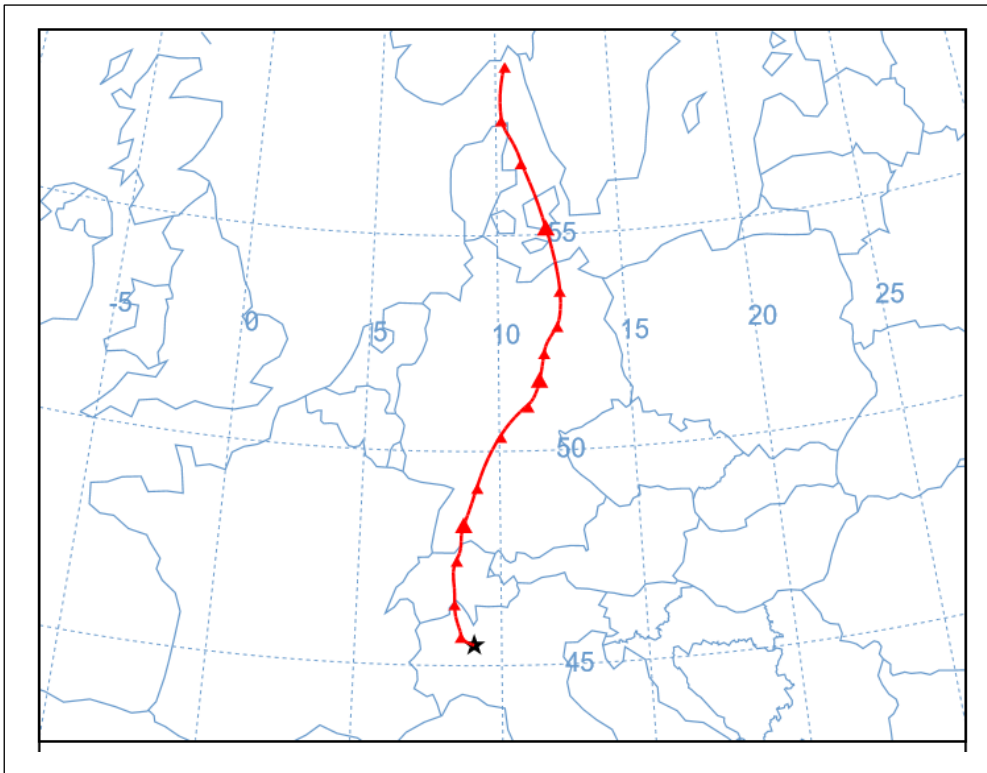


Figura 155- Traiettorie della circolazione atmosferica in arrivo Milano

### 5.4.3.7 - Cella temporalesca del 4 marzo 2008

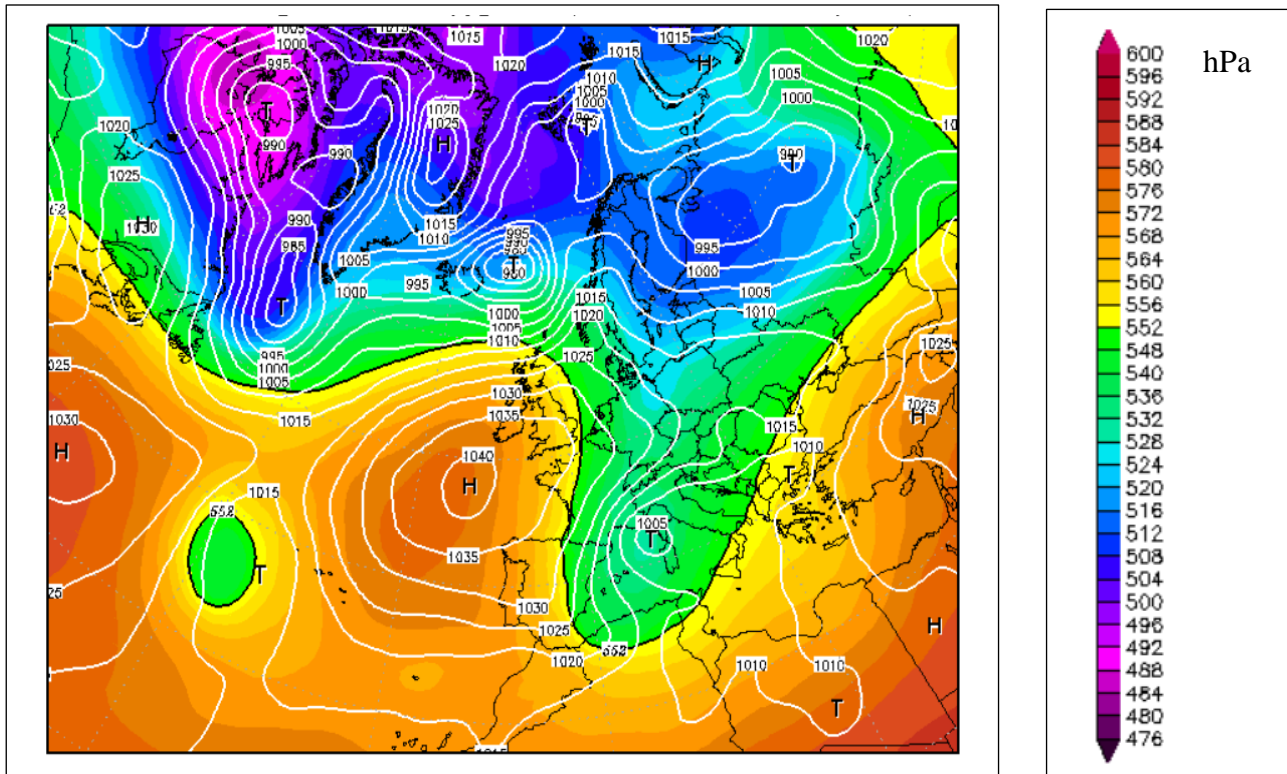


Figura 156-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

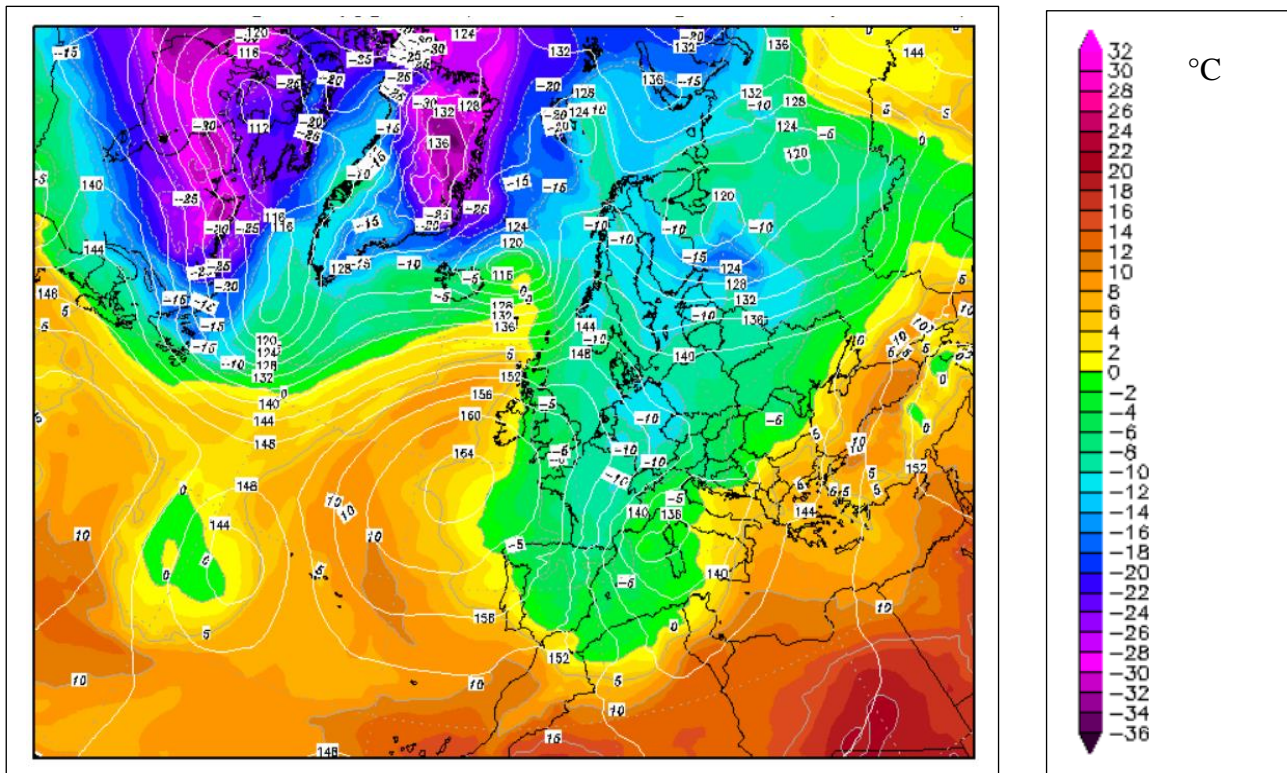


Figura 157- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)



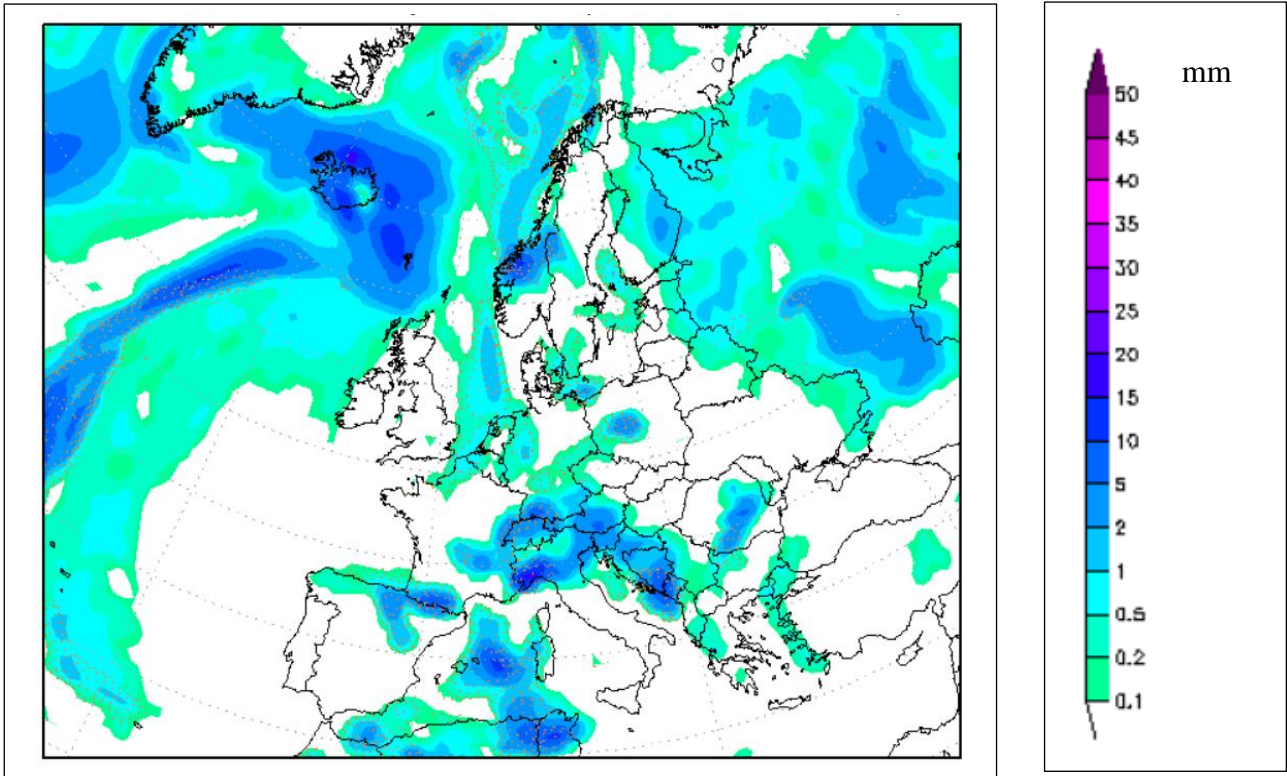


Figura 158-Mappa della precipitazione (mm)

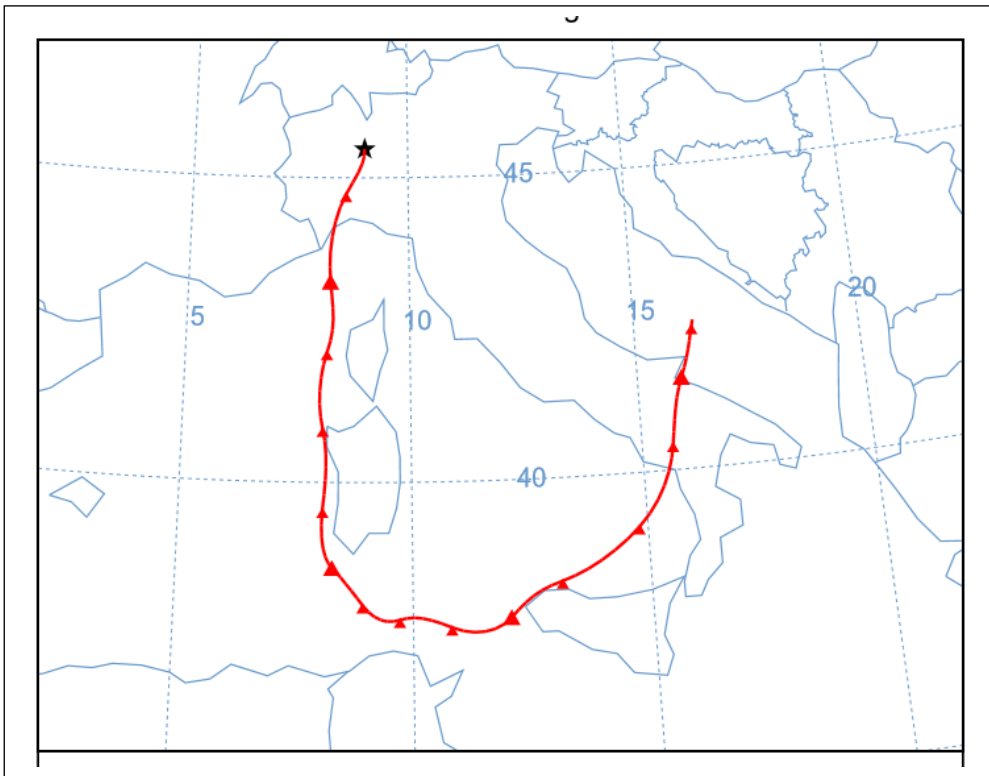


Figura 159- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

#### 5.4.3.8 - COMMENTO

Il mese di gennaio è stato influenzato da un'anomalia positiva che è partita dalla Scandinavia e si è spostata sull'arco Alpino indebolendosi leggermente. Questa perturbazione ha determinato sull'Europa settentrionale un'estensione delle depressioni atlantiche e ha portato temperature miti soprattutto nelle regioni settentrionali italiane, dove si è osservato un aumento delle precipitazioni invernali.

Al livello isobarico di 500 hPa nella giornata del 13 gennaio si nota una bolla depressionaria che si è isolata rispetto all'invasione scandinava, posizionandosi proprio sull'Italia e portando precipitazioni intense. Il fenomeno è durato fino al 16 gennaio quando la bolla si è dissolta.

La perturbazione atlantica ha formato una penisola verso sud invadendo il nord Italia e continuando ad apportarvi intense precipitazioni, che nella giornata del 18 gennaio si sono dissolte e ritirate verso il nord Europa.

Per il mese di gennaio si nota una buona coincidenza delle due mappe del geo-potenziale. Questo vuol dire che la perturbazione è stata di intensa ed è riuscita ad insistere sul nostro territorio, valicando le Alpi, per sette giorni consecutivi. I fronti freddi atlantici hanno prevalso sull'aria più calda proveniente da sud-est.

Febbraio è stato caratterizzato dalla prevalenza di alta pressione sull'Europa centrale, con precipitazioni scarse sull'Italia del nord. Il due febbraio una perturbazione atlantica si è spinta di nuovo oltre le Alpi procurando in pianura abbondanti precipitazioni. Al livello isobarico di 850 hPa la bolla depressionaria si è distaccata dalla saccatura proveniente dal nord Europa. La perturbazione è stata breve e il mese di febbraio è proseguito senza precipitazioni di interesse.

Il 22 gennaio, in presenza di venti umidi da sud ovest, sono stati rilevati eventi di Föhn alpino.

A Milano in quei giorni è stata registrata una temperatura massima di 17.4 °C: l'aria fredda ed umida si è arrestata a nord della catena alpina, mentre la parte settentrionale della pianura padana è stata liberata dalle nubi ed interessata dall'evento di favonio. Anche verso la fine di gennaio, si è avuto un importante fenomeno di föhn, che ha causato un riscaldamento fittizio dell'aria.

La circolazione a grande scala nel corso del mese di marzo è stata caratterizzata dalla presenza di una saccatura sulla penisola Scandinava che ha investito il nord Italia. Il 4 marzo un intenso afflusso d'aria fredda dall'Atlantico settentrionale, accompagnato da temporali sul Nord-Ovest, ha provocato la rapida discesa della temperatura e di abbondanti precipitazioni durante la notte sulla Pianura Padana. Nei giorni di precipitazione abbondante, come il 13 gennaio, il 2 febbraio ed il 4 marzo la situazione circolatoria si presenta con una ciclogenesi sul mare ligure di origine scandinava, che arriva a Milano entrando presumibilmente dalla porta del Rodano. Nei giorni di termine delle basse pressioni

individuate prevalgono i flussi più caldi di alta pressione. Nelle giornate del 16 gennaio, 18 gennaio, 5 febbraio si ha una circolazione di Bora, in ingresso dalla Porta della bora nell'alto adriatico.

Il 22 febbraio quando Milano è stata investita da un innalzamento fittizio delle temperature il programma evidenzia una circolazione scandinava fredda che raggiunge e valica le Alpi nord-occidentali, arrivando sulla pianura padana con aria mite.

Tali configurazioni bariche hanno caratterizzato l'inverno 2008 sulla città di Milano in modo non continuativo e lasciando ampio spazio anche al diffondersi di giorni di alta pressione.

## 5.5 ANALISI CLIMATOLOGICA DELL'ANNO 2003

### 5.5.1 INTRODUZIONE

Il 2003 è stato precedentemente classificato come anno scarsamente piovoso poiché ha presentato a livello annuale il 40% in meno della precipitazione media della serie 1984-1999. A livello annuale la precipitazione cumulata è risultata pari a 351mm.

L'anno è stato anomalo in tutte le stagioni, ad eccezione dell'autunno.

L'anomalia del 2003 è stata la più persistente fino ad ora individuata. Una siccità estrema iniziata con il mese di febbraio e che si è prolungata senza sosta fino alla fine di settembre. L'eccezionalità del 2003 la si ritrova sia nella durata temporale che nell'intensità con cui la siccità si è verificata.

Le temperature eccezionalmente alte sono state accompagnate da una forte siccità in gran parte del continente. L'evento è iniziato nei mesi invernali: l'effetto combinato di grande caldo e pochissime piogge fu devastante e nella stagione estiva, oltre a causare la morte di migliaia di cittadini europei, scatenò furiosi incendi in vaste aree boschive, causò problemi di approvvigionamento energetico e mise in crisi il settore agricolo. I danni causati all'Europa da questo caldo eccezionale sono stati stimati ammontare a circa tredici miliardi di euro. Secondo l'Istituto nazionale di statistica le morti durante l'estate del 2003 in Italia furono circa 18000.

In particolare la stagione che ha avuto maggiori danni sociali e ambientali è stata l'estate, in cui oltre al caldo afoso si è aggiunta la scarsità idrica.

L'estate 2003 è stata tra le più calde di sempre nello specifico il mese di agosto a livello europeo è stato in assoluto il più caldo degli ultimi cento anni, con temperature anche superiori ai 40° nelle città italiane. Fuori dai centri metropolitani le temperature sono risultate inferiori di circa 1°C: questa evidenza si spiega considerando che le elevate densità abitative delle grandi città, con gli usi dei suoli e l'elevato inquinamento, contribuiscono ad accentuare il fenomeno dell'isola di calore. I quartieri centrali godono di minime lievemente maggiori rispetto alle periferie, che risentono invece dell'aria umida delle campagne.

Le condizioni di gran secco che si sono instaurate in Italia a partire da febbraio 2003 hanno favorito l'innalzamento estremo della temperatura nei mesi a seguire. Infatti in condizioni di terreno molto secco e di vegetazione in stress idrico l'energia radiativa del sole viene interamente impiegata per il riscaldamento del suolo e quindi dell'aria soprastante, come accade nei deserti, innalzando le temperature diurne a valori inusuali per la Pianura Padana.

La tendenza dell'anno è stata però evidente già dal trimestre invernale, dove la scarsità d'acqua ha determinato la tendenza anomala dell'anno.

## 5.5.2 ANALISI DEI DATI INVERNO 2003 – Precipitazione, Pressione, Temperatura

Si riportano di seguito la distribuzione della precipitazione cumulata relativa al trimestre invernale dell'anno 2002/2003, a partire dal mese di ottobre 2002, e una tabella riassuntiva che evidenzia per il trimestre invernale 2003 la correlazione tra i giorni piovosi e la pressione atmosferica.

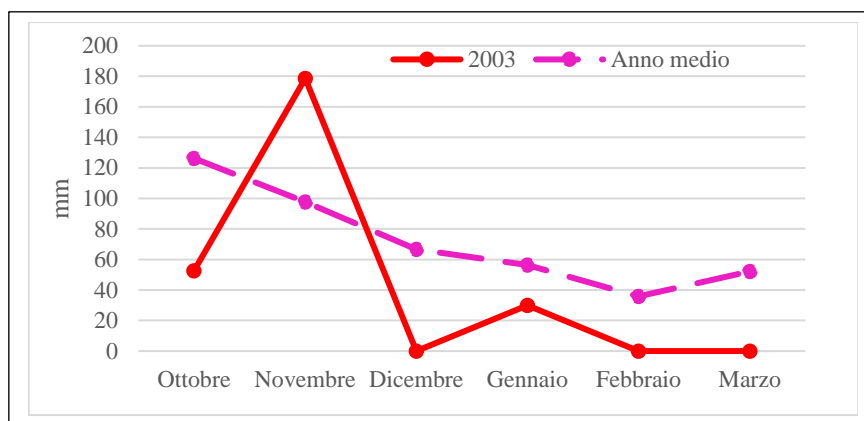


Figura 160-Confronto tra la precipitazione cumulata media e 2003

Il trimestre invernale del 2003 deve la principale anomalia negativa di precipitazione ai mesi di febbraio e marzo.

La chiusura dell'anno 2002 si è presentata con una buona piovosità nei mesi di ottobre e novembre ma precipitazione totalmente assente a dicembre, segnale precursore di un inizio 2003 particolarmente asciutto.

L'inverno ha presentato più del 40% in meno di precipitazione, totalizzando circa 30 mm di precipitazione da gennaio a marzo. La primavera ha avuto precipitazione assente, l'estate ha contato 7mm di precipitazione. L'autunno invece è stato piovoso con 315 mm totalizzati da settembre a dicembre.

La precipitazione cumulata trova corrispondenza con il numero di giorni piovosi, che sono stati solo 60 in tutto l'arco dell'anno, di cui 10 in inverno, 4 in primavera, 6 in estate e 40 in autunno.

L'inverno 2003 è stato eccezionalmente poco piovoso.

I giorni di precipitazione sono correlati con l'andamento della pressione atmosfera in loco, sotto l'ipotesi semplificativa di identificazione del giorno piovoso come giorno di bassa pressione.

Gennaio ha presentato 6 giorni di bassa pressione, raggruppati a tre e tre a inizio e fine mese. Marzo ha avuto solo 4 giorni piovosi (la quantità totale cumulata a marzo è inferiore a 5 mm e di conseguenza nelle analisi di cui sopra non è stato considerato un mese piovoso).

Le temperature di gennaio e febbraio non hanno presentato particolari anomalie. I valori del bimestre invernale non si discostano di molto dai propri valori medi. Il mese di marzo invece ha avuto un'anomalia positiva sulle temperature massime registrate che hanno raggiunto i 18°C ed hanno contribuito ad innalzare le temperature medie mensili. Dal mese di marzo in poi le temperature

massime hanno raggiunto velocemente i  $2/2.5^{\circ}\text{C}$  sopra le proprie medie mensili, preannunciando quindi la torrida estate che avrebbe investito tutto il nord Italia.

$^{\circ}\text{C}$	Gennaio	Febbraio	Marzo
<b>T.max 1969-1999</b>	5.2	8	13.4
<b>T.max 2003</b>	6.4	7.4	18
<b>T.min 1969-1999</b>	0	1.6	5.4
<b>T.min 2003</b>	-0.7	1.3	3.8
<b>T.media 1969-1999</b>	2.6	4.8	9.4
<b>T.media 2003</b>	2.8	4.3	10.9

Tabella 39-Temperatura del trimestre invernale del 2003( $^{\circ}\text{C}$ )

Giorni del mese	Giorni con precipitazione			Pressione atm			Temperatura media		
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Gennaio	Febbraio	Marzo	Gennaio	Febbraio	Marzo
1	No	No	No	Alta	Alta	Alta	5.2	2.3	8.1
2	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	4.6	0.5	8.3
3	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	6.2	0.6	7.5
4	<i>Sì</i>	No	No	Alta	Alta	Alta	4	3.7	7.6
5	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	3.1	6.1	7.8
6	<i>Sì</i>	No	<i>Sì</i>	<i>Bassa</i>	Alta	<i>Bassa</i>	2	5.6	8.5
7	No	No	<i>Sì</i>	Alta	Alta	<i>Bassa</i>	1.9	2.6	9.6
8	No	No	No	Alta	Alta	Alta	1.7	2.9	8.4
9	No	No	No	Alta	Alta	Alta	0.8	2.9	9.3
10	No	No	No	Alta	Alta	Alta	0.2	0.2	11.1
11	No	No	No	Alta	Alta	Alta	1.5	0.3	11.4
12	No	No	No	Alta	Alta	Alta	0.4	1.1	12.8
13	No	No	No	Alta	Alta	Alta	-1.4	0.8	12.4
14	No	No	No	Alta	Alta	Alta	1.3	1.7	8.7
15	No	No	No	Alta	Alta	Alta	3.1	1.3	7.1
16	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.6	2.2	7.8
17	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.2	0.4	8.5
18	No	No	No	Alta	Alta	Alta	1.6	0.4	10.6
19	No	No	No	Alta	Alta	Alta	0.1	1.1	8.8
20	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	2.8	1.4	10.3
21	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	3.7	3.1	9.8
22	<i>Sì</i>	No	No	<i>Bassa</i>	Alta	Alta	1.9	3.1	9.7
23	No	No	No	Alta	Alta	Alta	2.3	3.2	7.5
24	No	No	No	Alta	Alta	Alta	3.1	2.6	9.7
25	No	No	No	Alta	Alta	Alta	3.7	3.7	12.1
26	No	No	No	Alta	Alta	Alta	2.9	4.1	12.9
27	No	No	No	Alta	Alta	Alta	4.3	4.2	12.6
28	No	No	No	Alta	Alta	Alta	7.3	6.6	13.3
29	No	/	No	Alta	Alta	Alta	4.2	/	12.2
30	No	/	No	Alta	Alta	Alta	3.3	/	13.2
31	No	/	No	Alta	Alta	Alta	2.5	/	14.2

Tabella 40-Individuazione dei giorni anomali trimestre invernale 2003

### **5.5.3 ANALISI DEI DATI INVERNO 2003 – Mappe del geo-potenziale**

Dalla tabella alla pagina precedente sono stati individuati i gruppi barici di alta pressione che hanno insistito su Milano nell'inverno 2003, apportando scarsità d'acqua:

- 7-19 gennaio 2003;
- 23-31 gennaio 2003;
- 1-28 febbraio 2003;
- 8-31 marzo 2003.

Di seguito vengono riportate le mappe del geo-potenziale, alle quote di 500 e 850 hPa, e le mappe di precipitazione ritenute più significative e rappresentative delle alte pressioni individuate. In particolare si riportano le mappe del geo-potenziale riferite alle ore 00 UTC, dei giorni:

- 27/01/2003;
- 10/02/2003;
- 25/02/2003;
- 10/03/2003
- 31/03/2003.

Di tali giorni sono riportate anche le traiettorie delle circolazioni individuate tramite il programma Hi-Split.



5.5.3.1 - 27 gennaio 2003

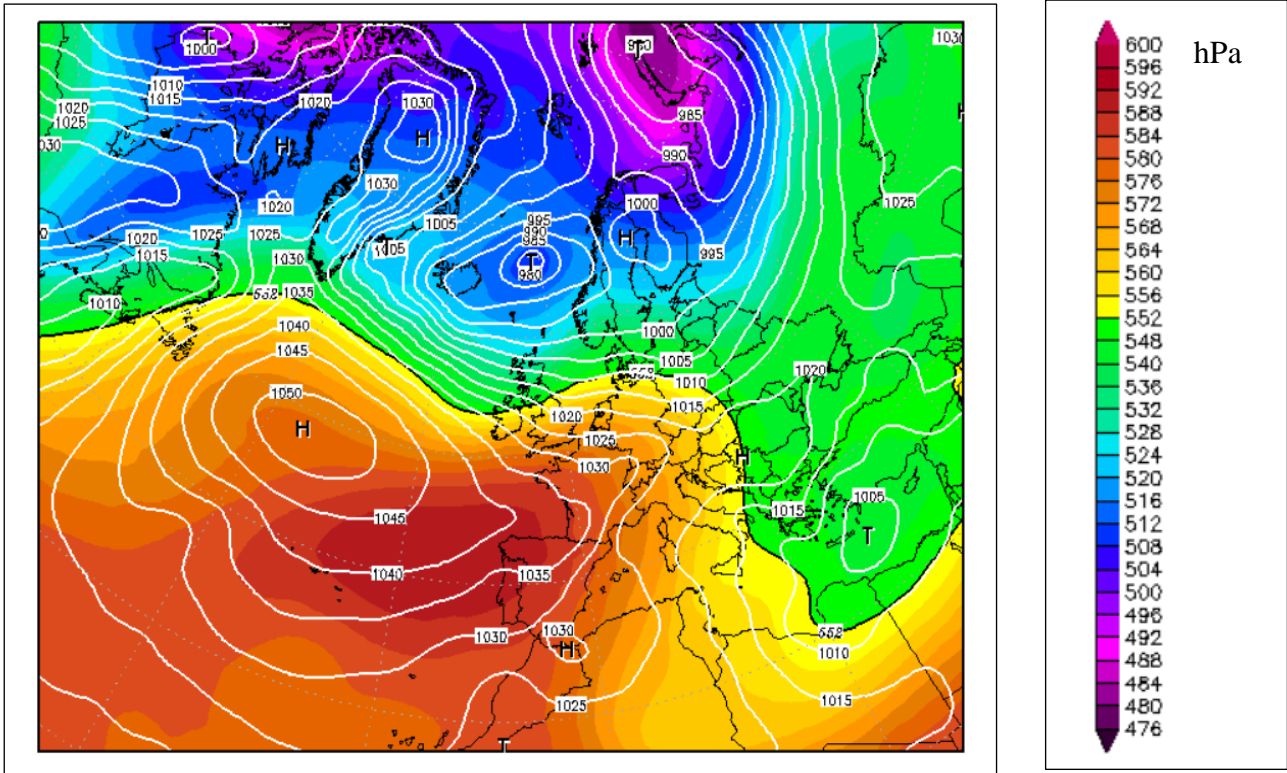


Figura 161-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

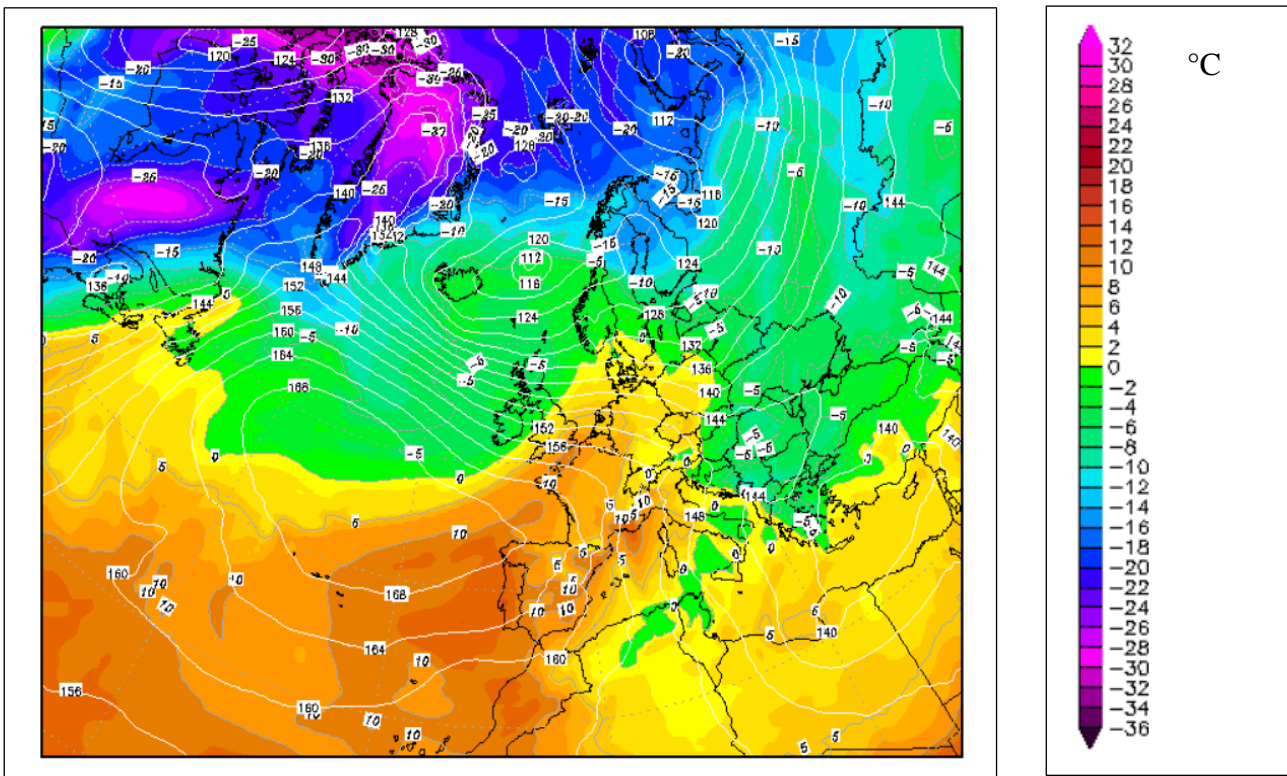


Figura 162- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

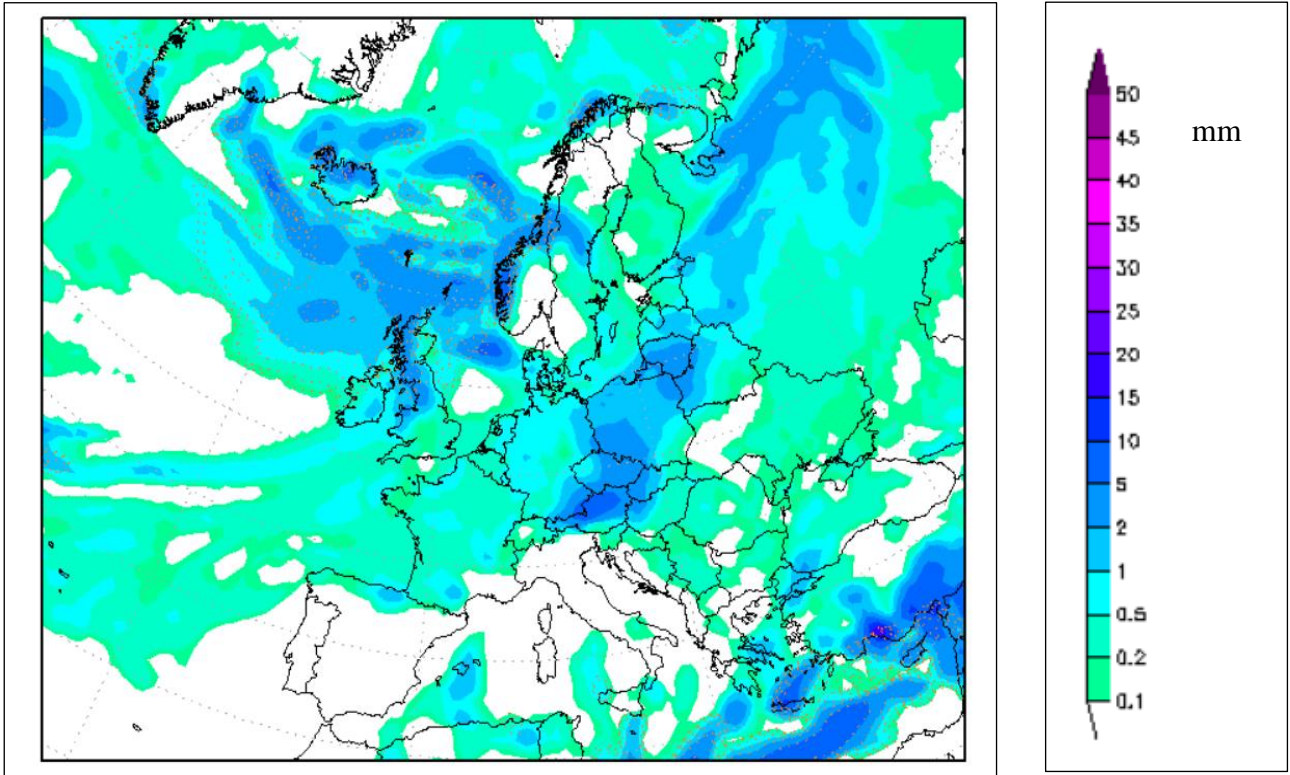


Figura 163-Mappa della precipitazione (mm)

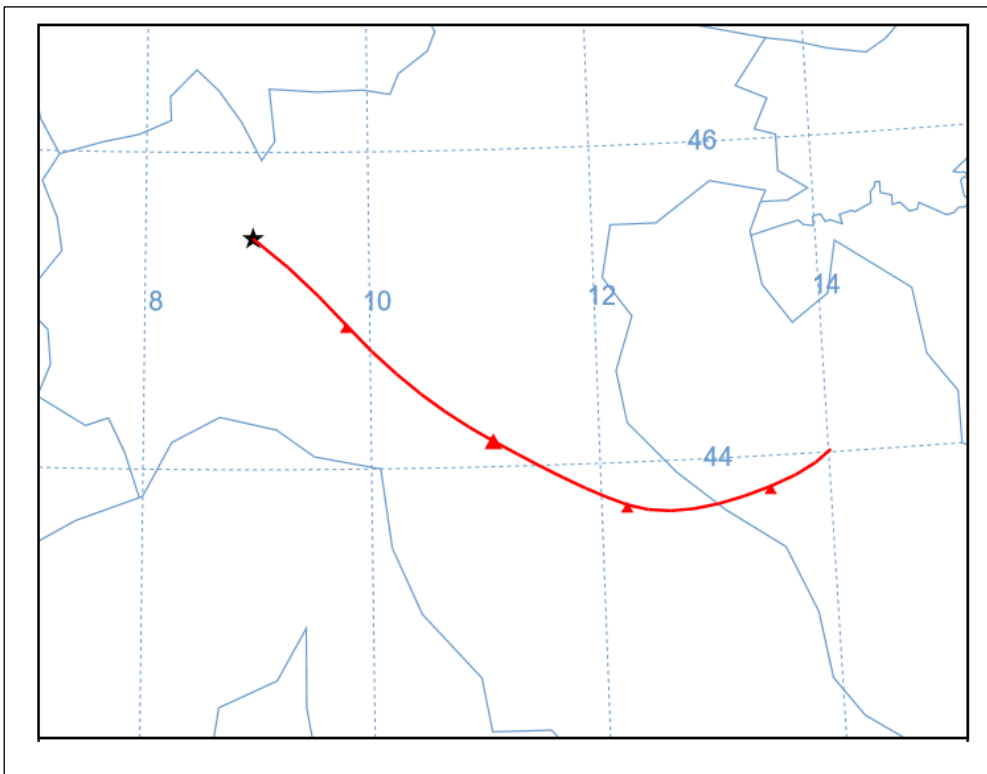


Figura 164- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.5.3.2 - 10 febbraio 2003

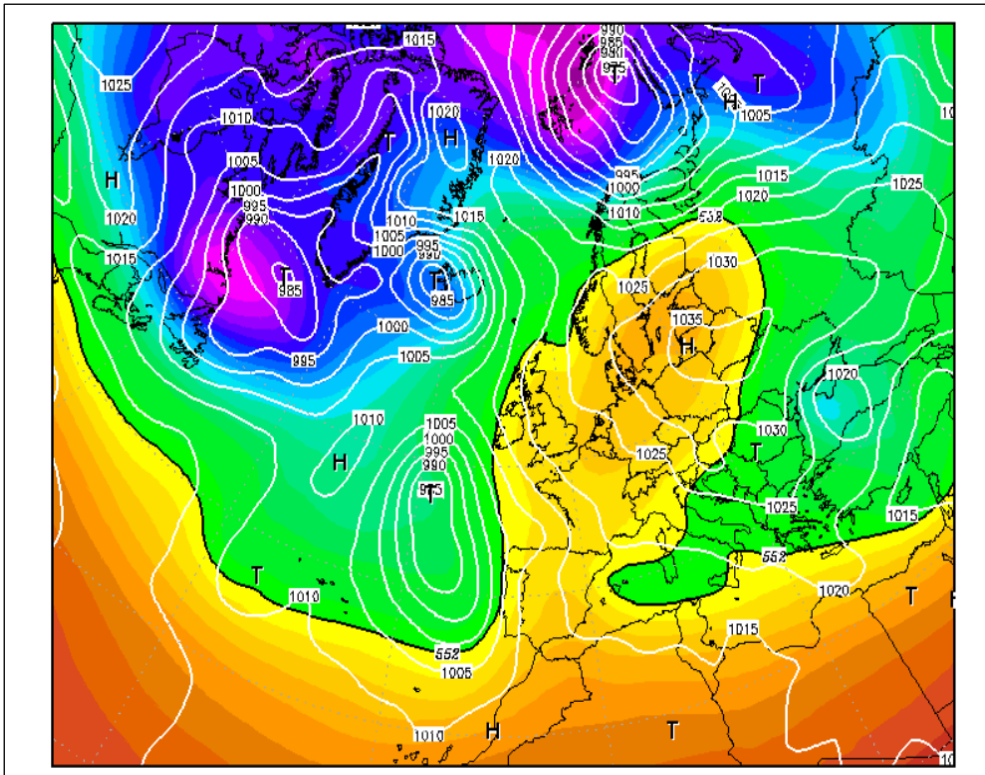


Figura 165-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

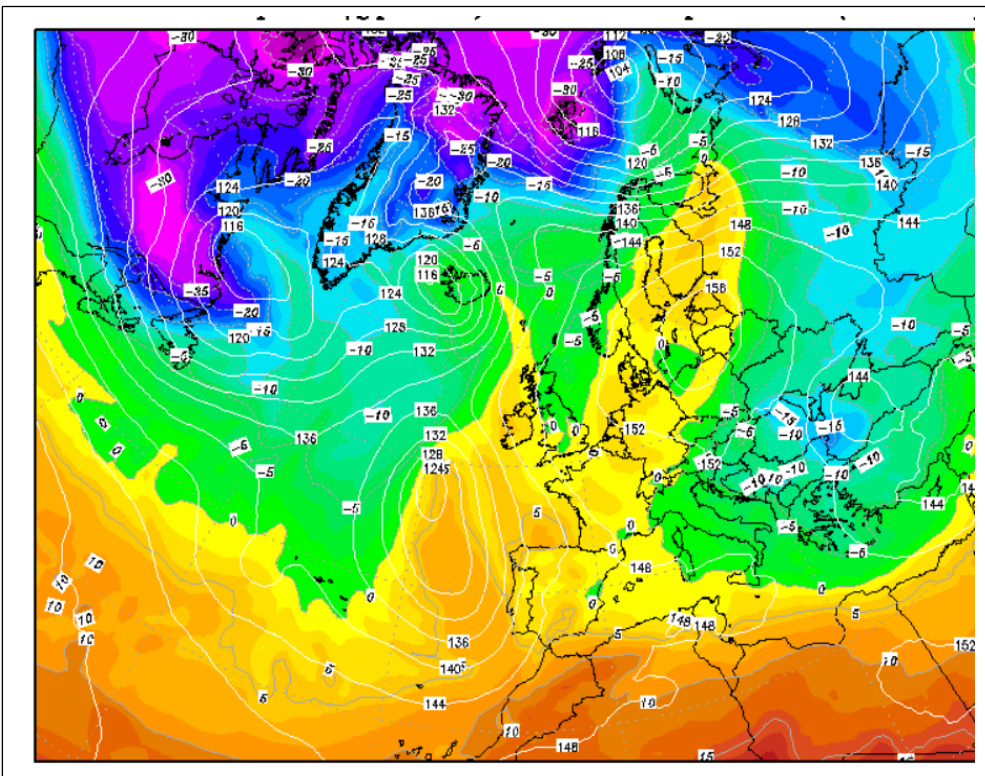


Figura 166- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

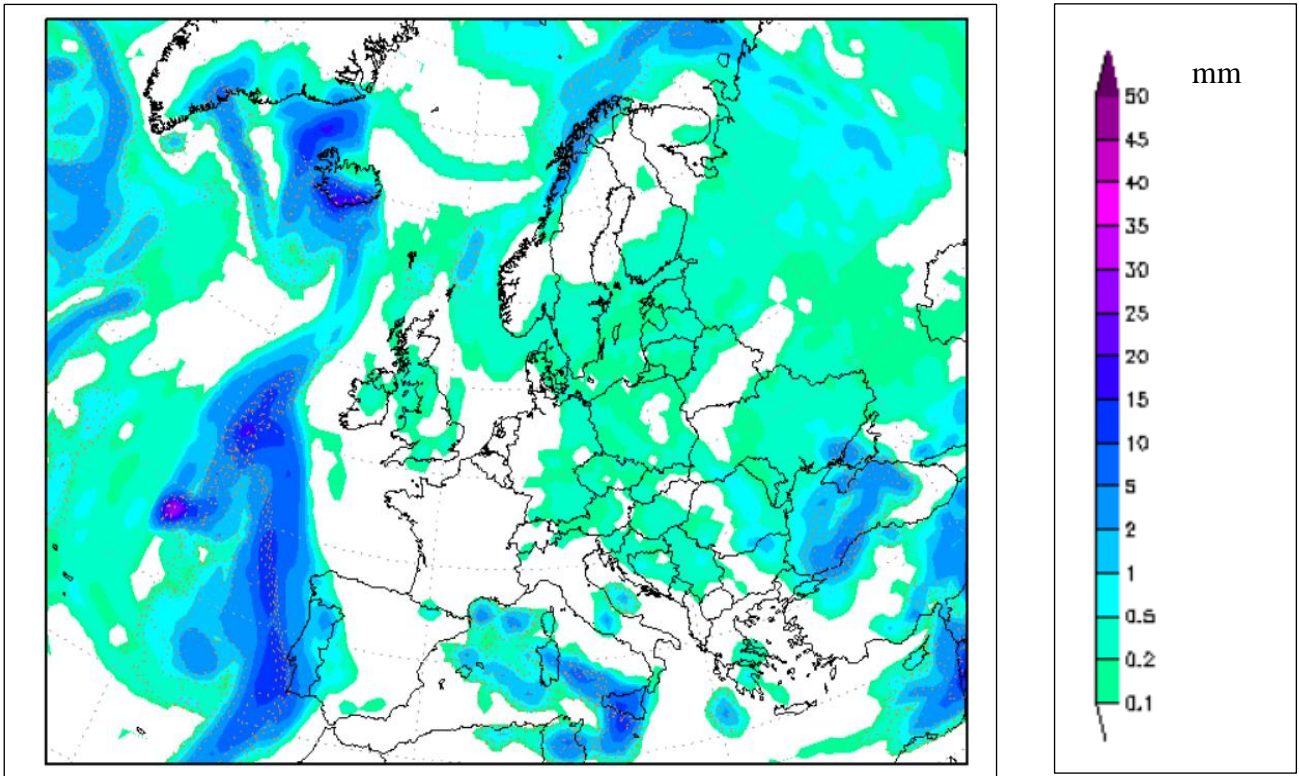


Figura 167-Mappa della precipitazione (mm)

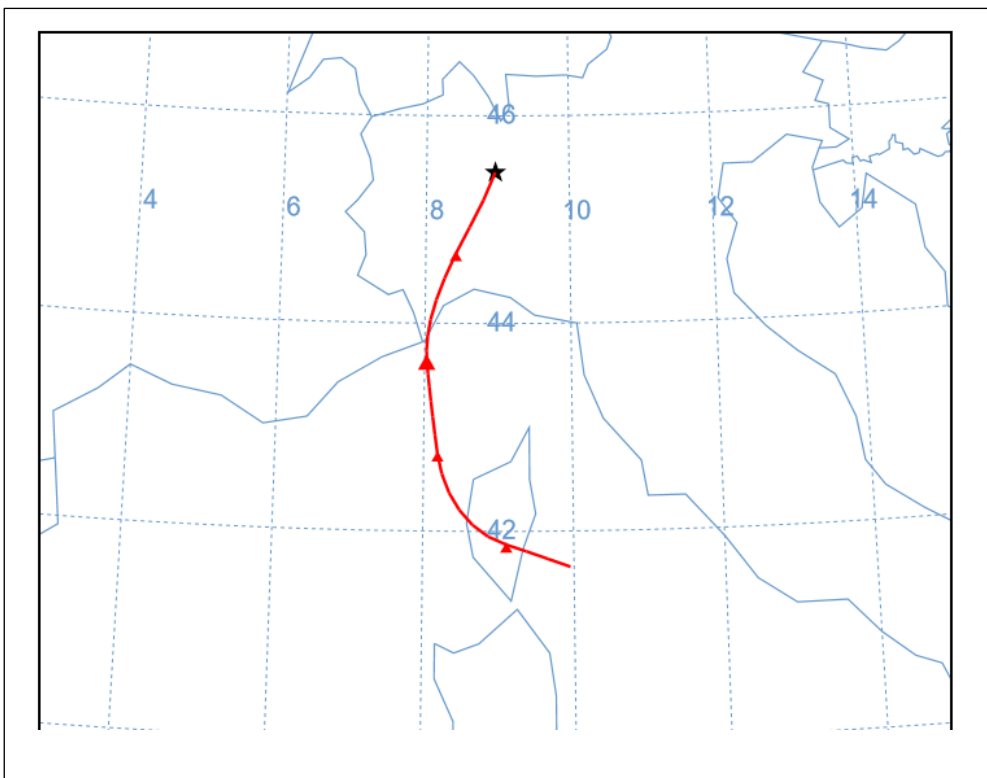


Figura 168- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.5.3.3 - 25 febbraio 2003

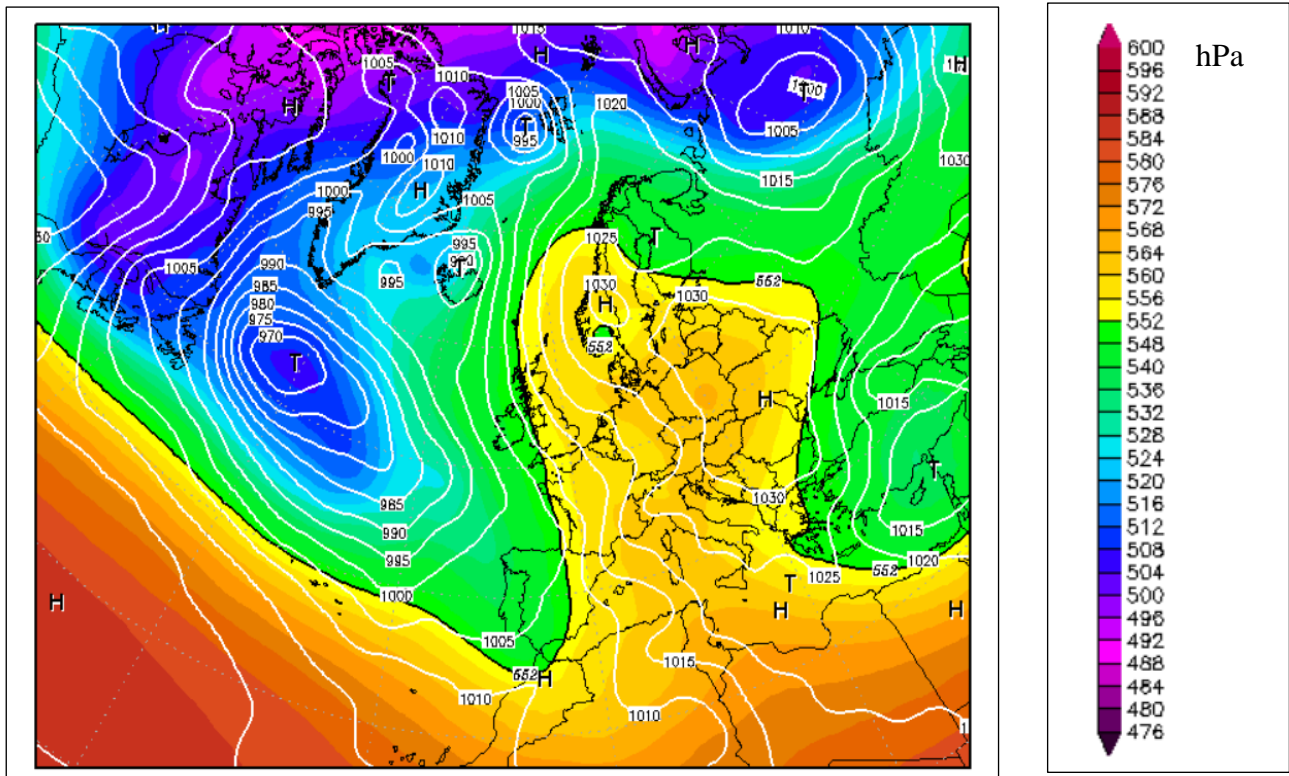


Figura 169-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

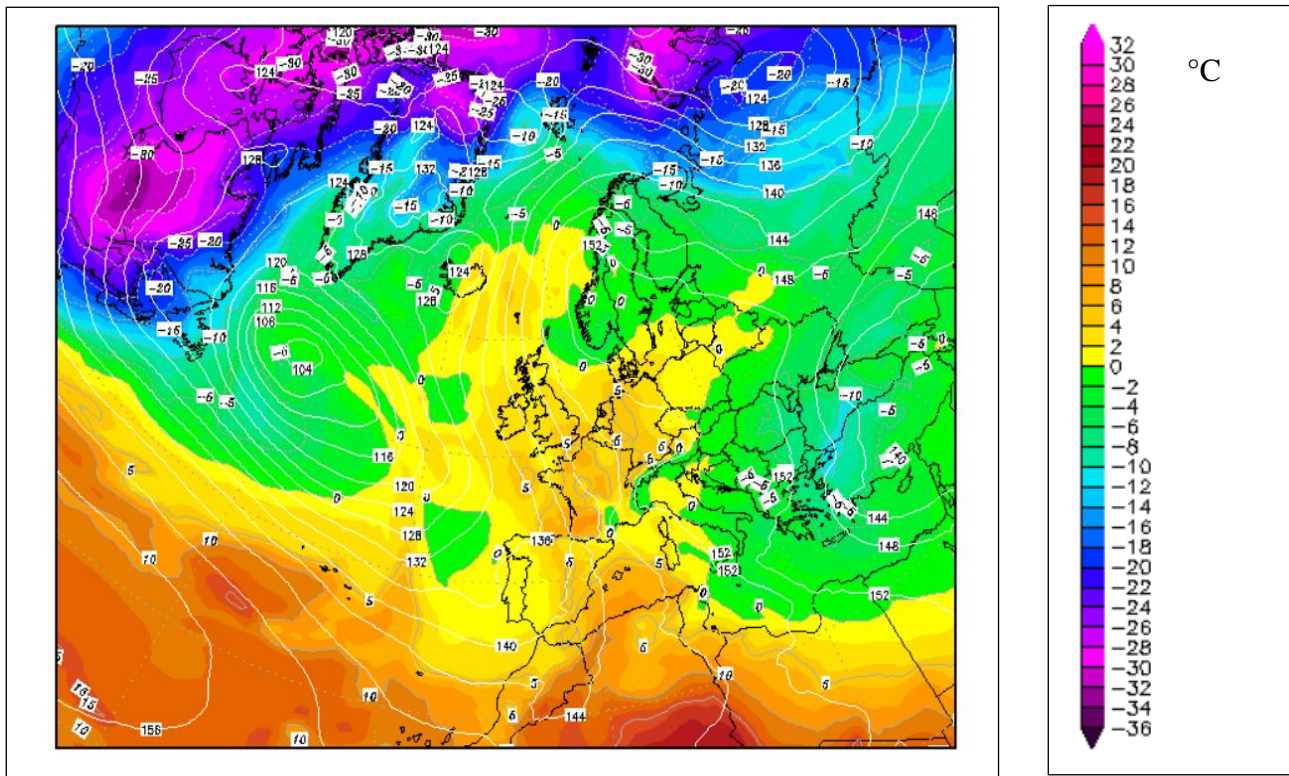


Figura 170- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

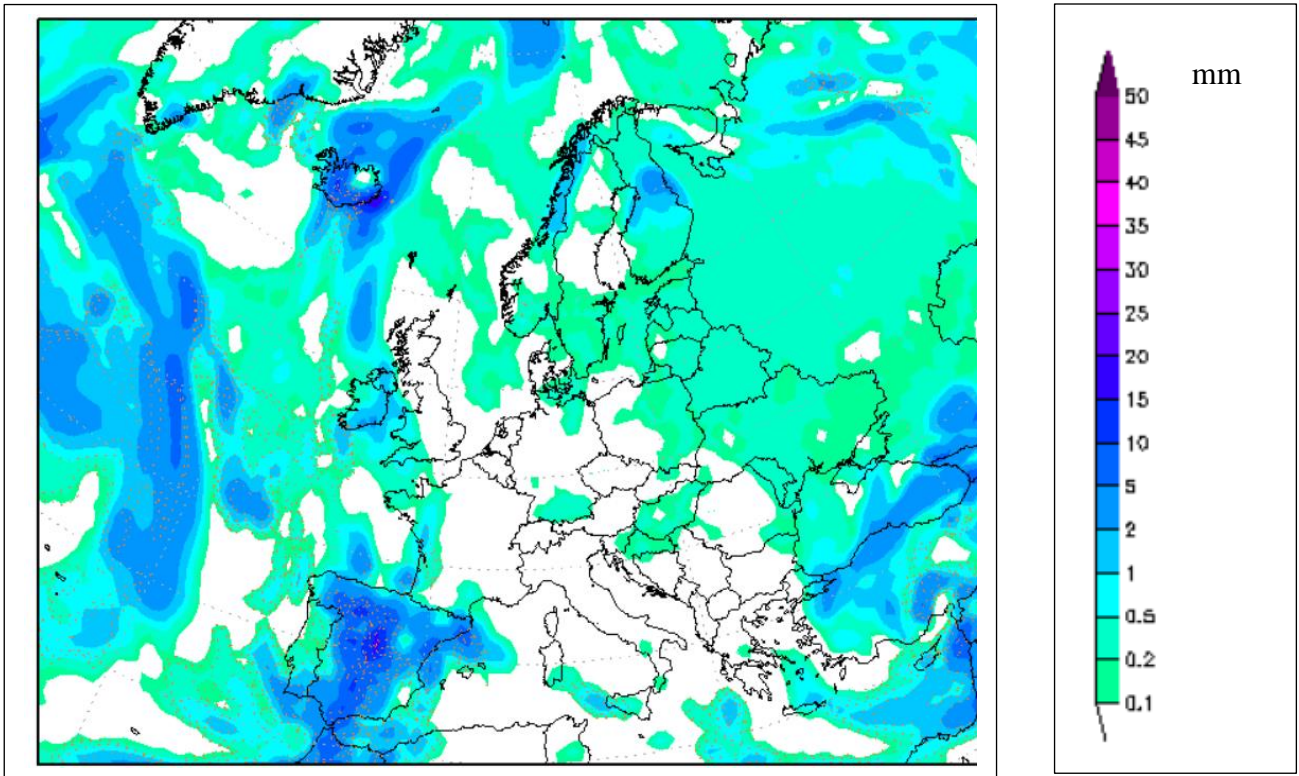


Figura 171-Mappa della precipitazione (mm)

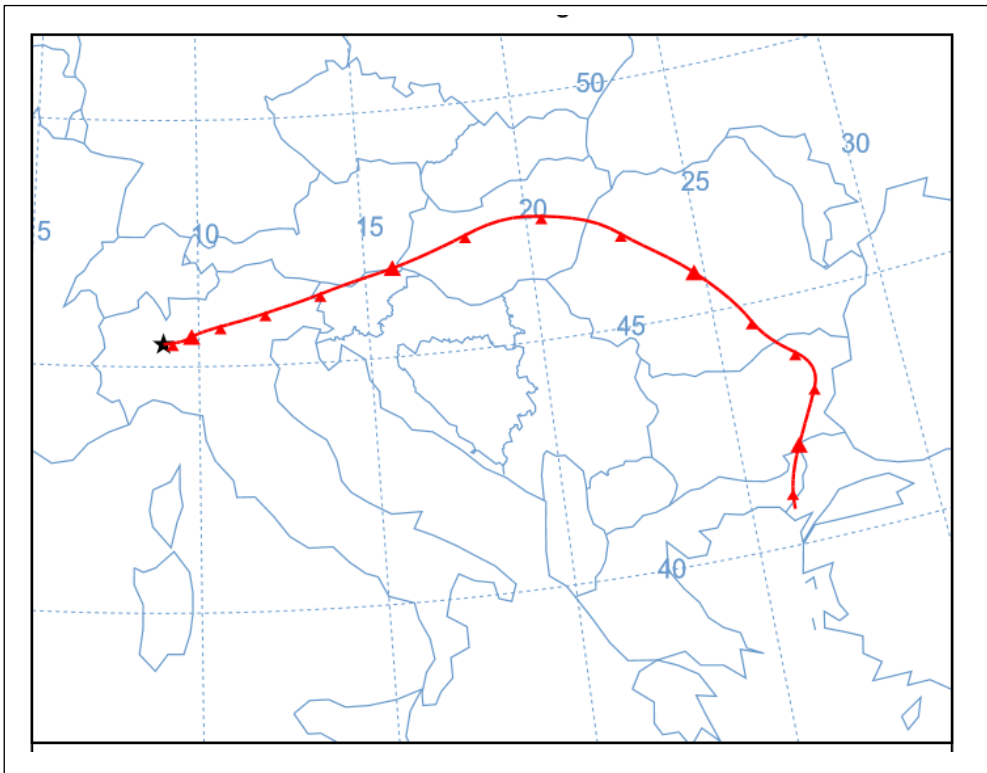


Figura 172- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

5.5.3.4 - 10 marzo 2003

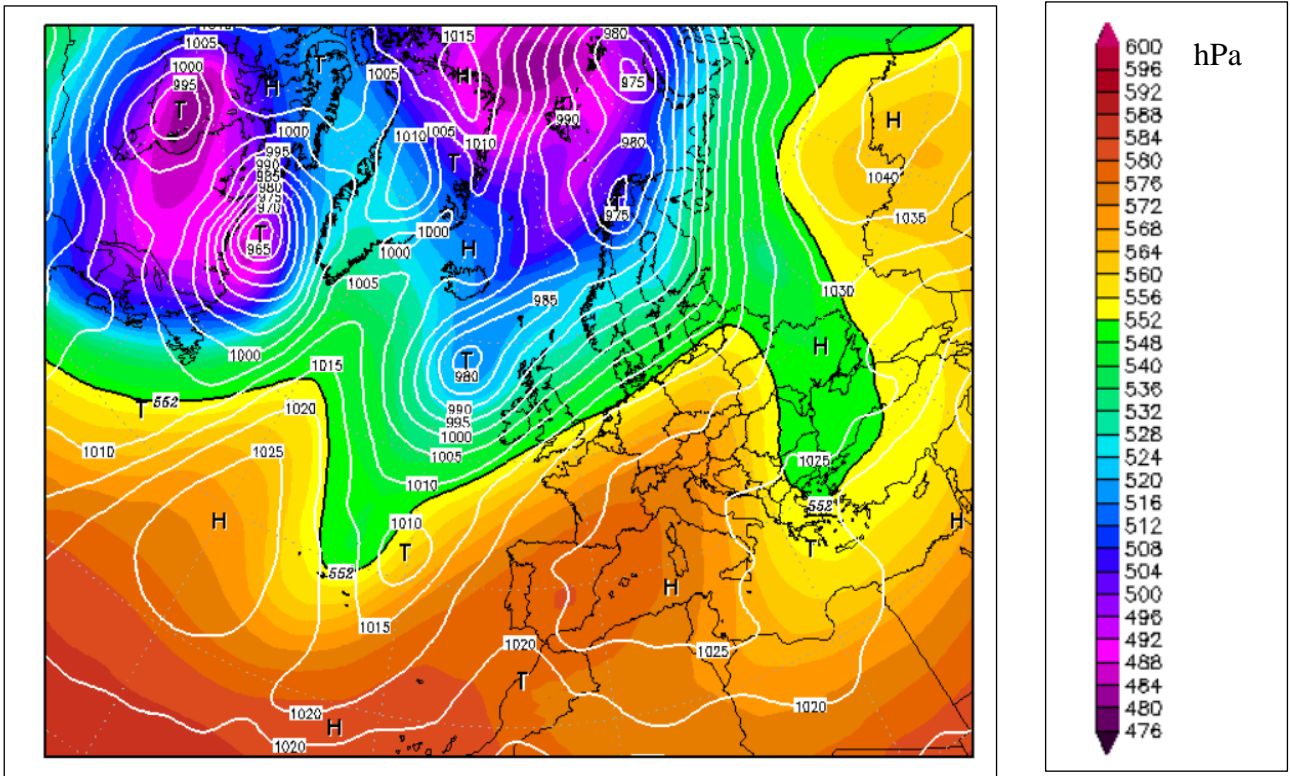


Figura 173-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

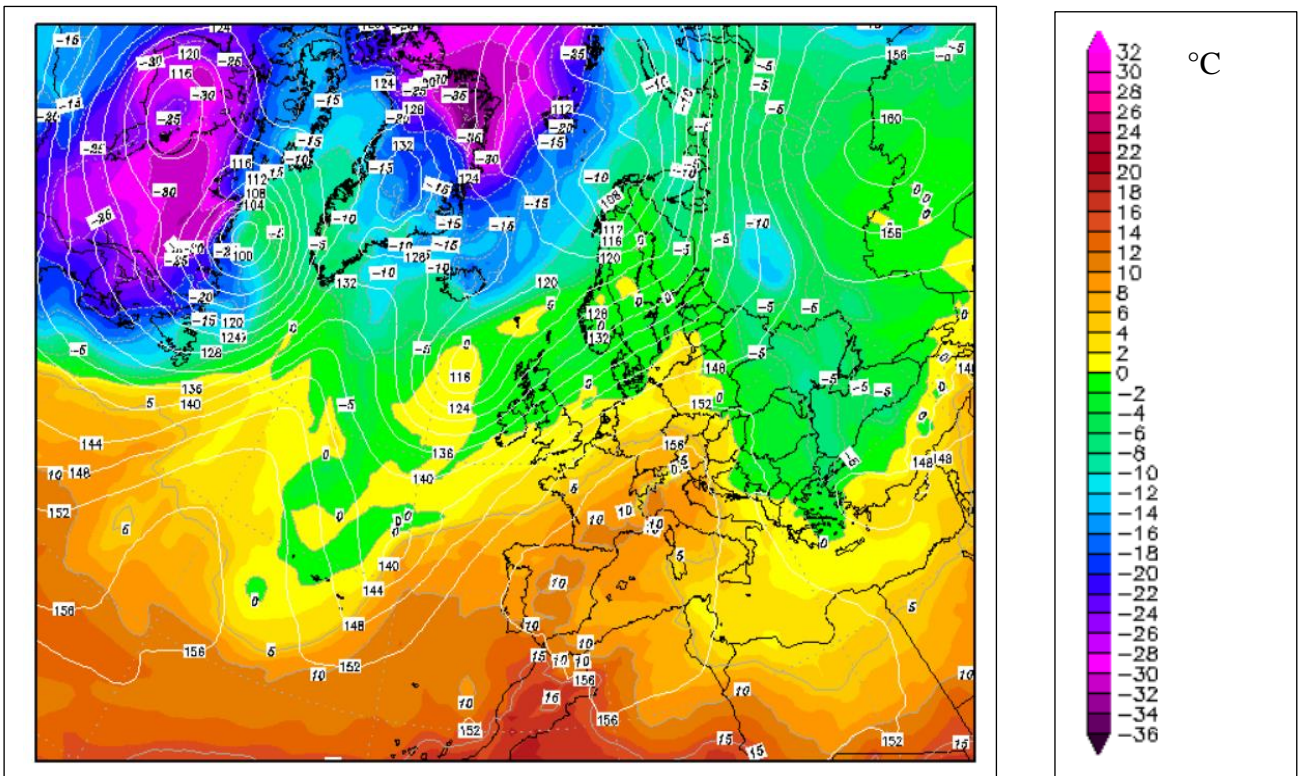


Figura 174- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

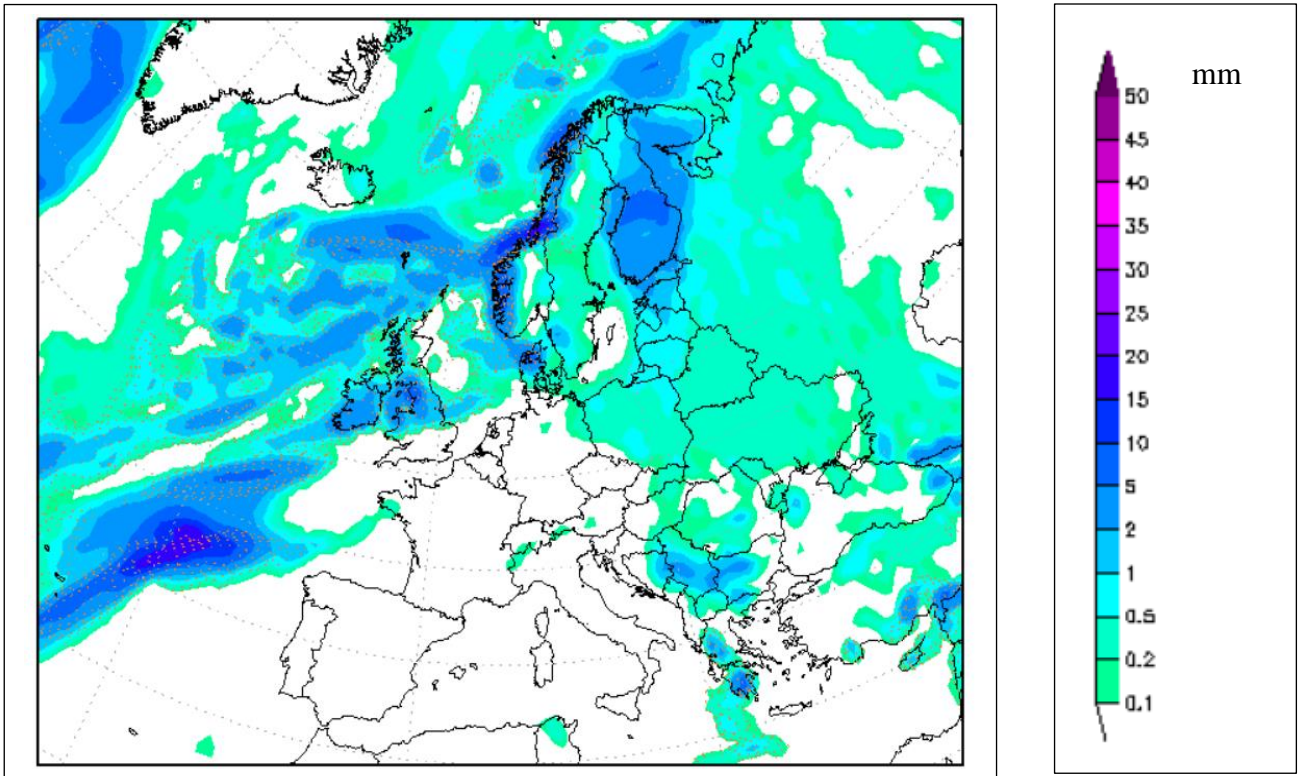


Figura 175-Mappa della precipitazione (mm)

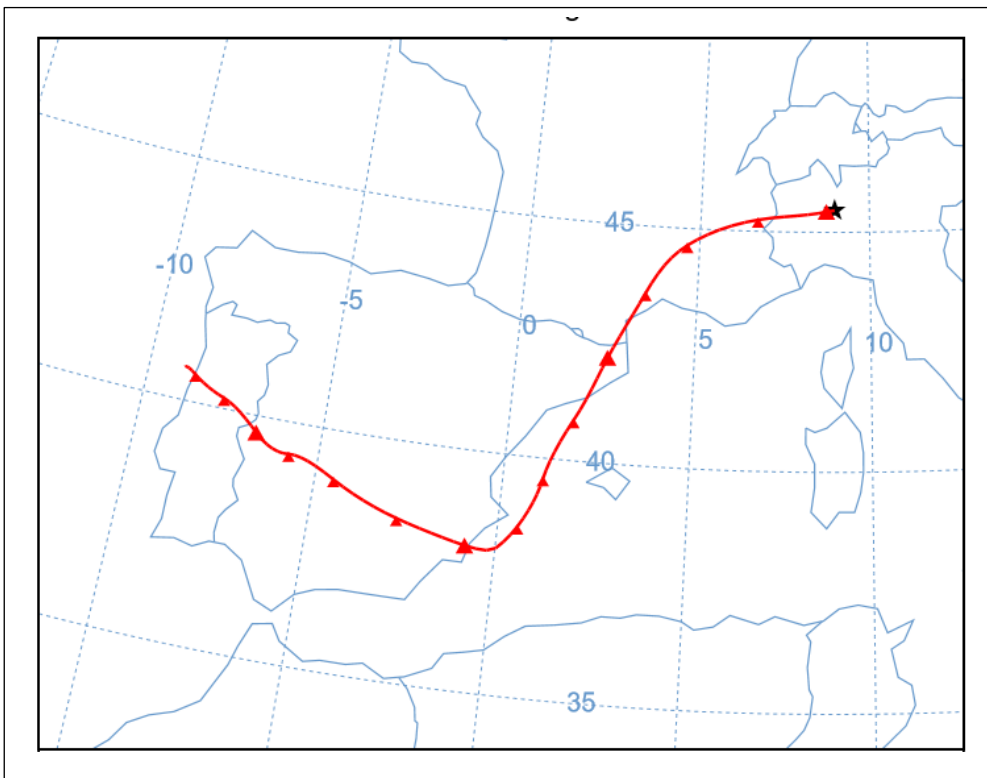


Figura 176- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano



5.5.3.5 - 31 marzo 2003

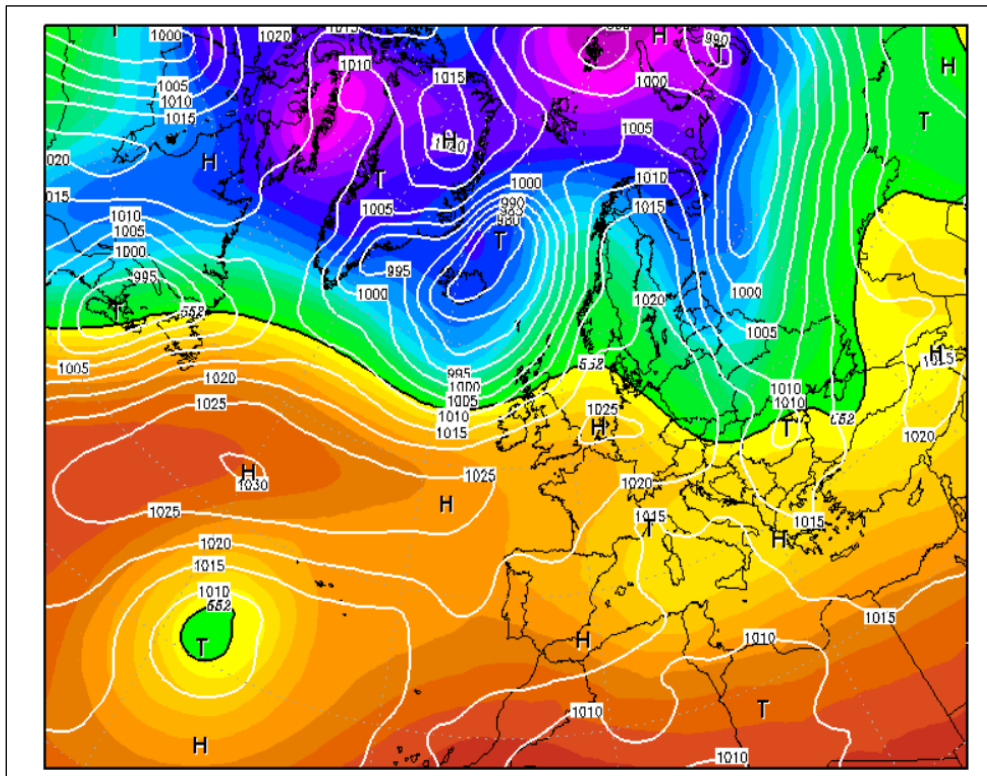


Figura 177-Mappa geo-potenziale 500 (hPa)

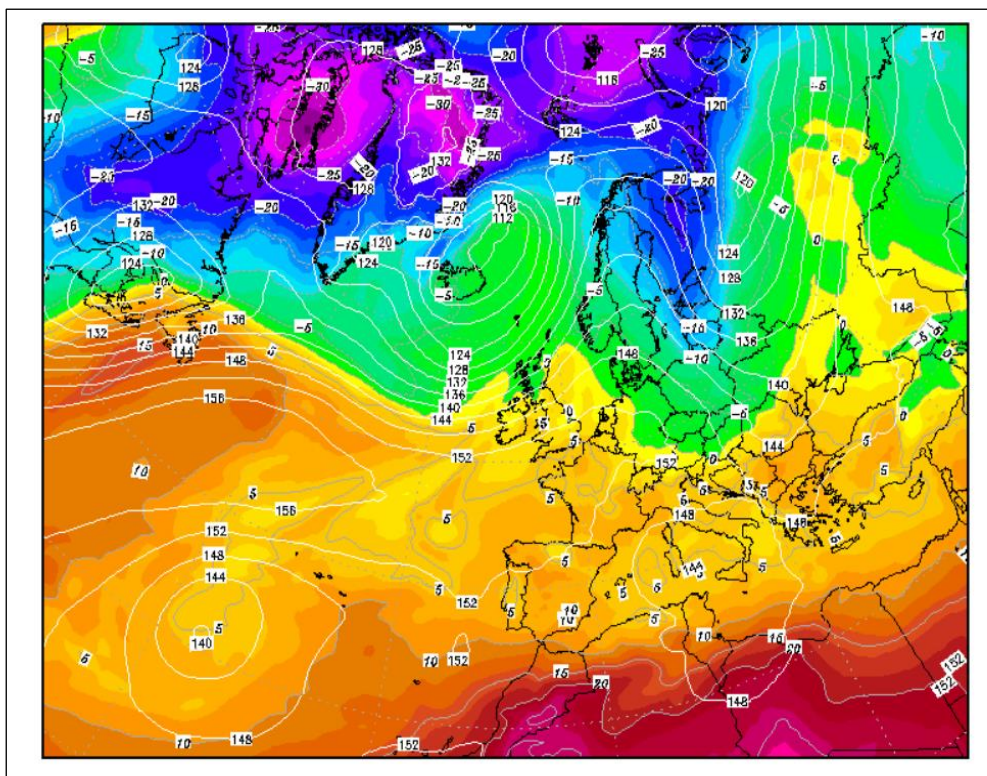


Figura 180- Mappa geo-potenziale 850 (hPa)

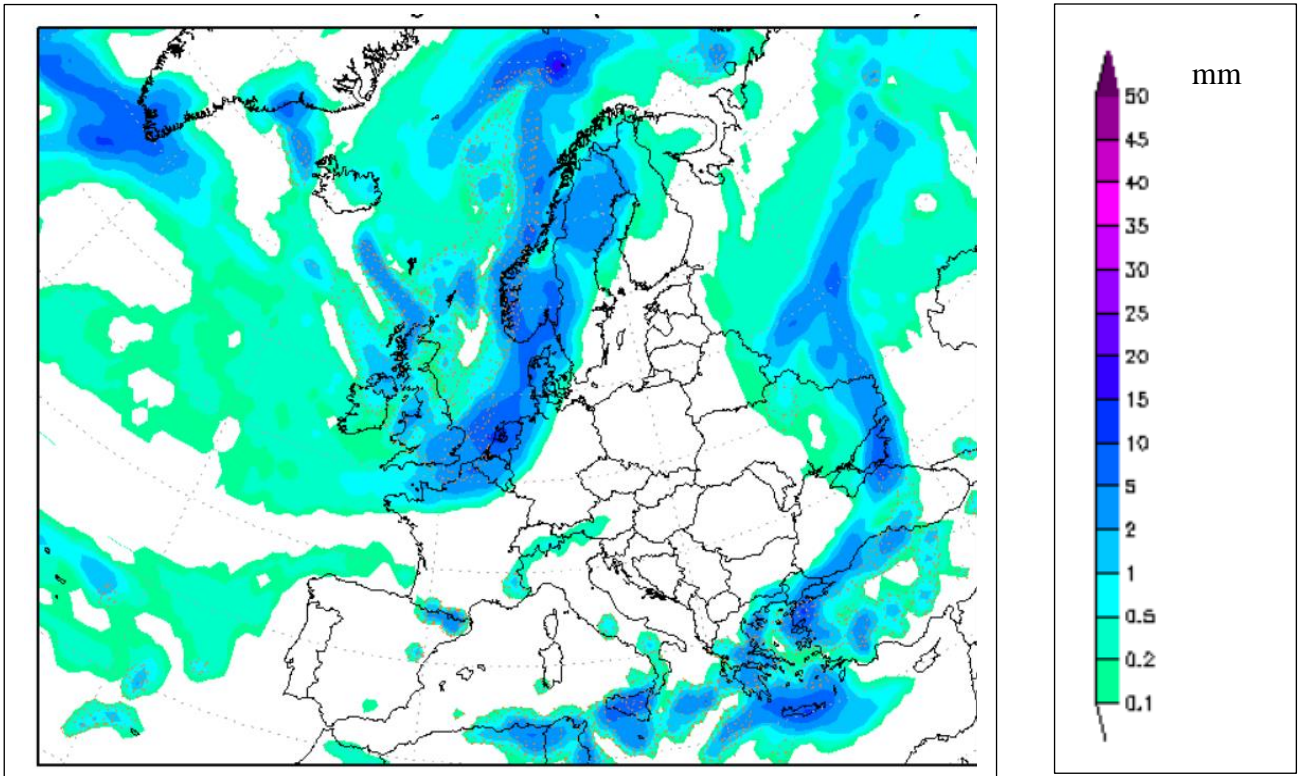


Figura 181-Mappa della precipitazione (mm)

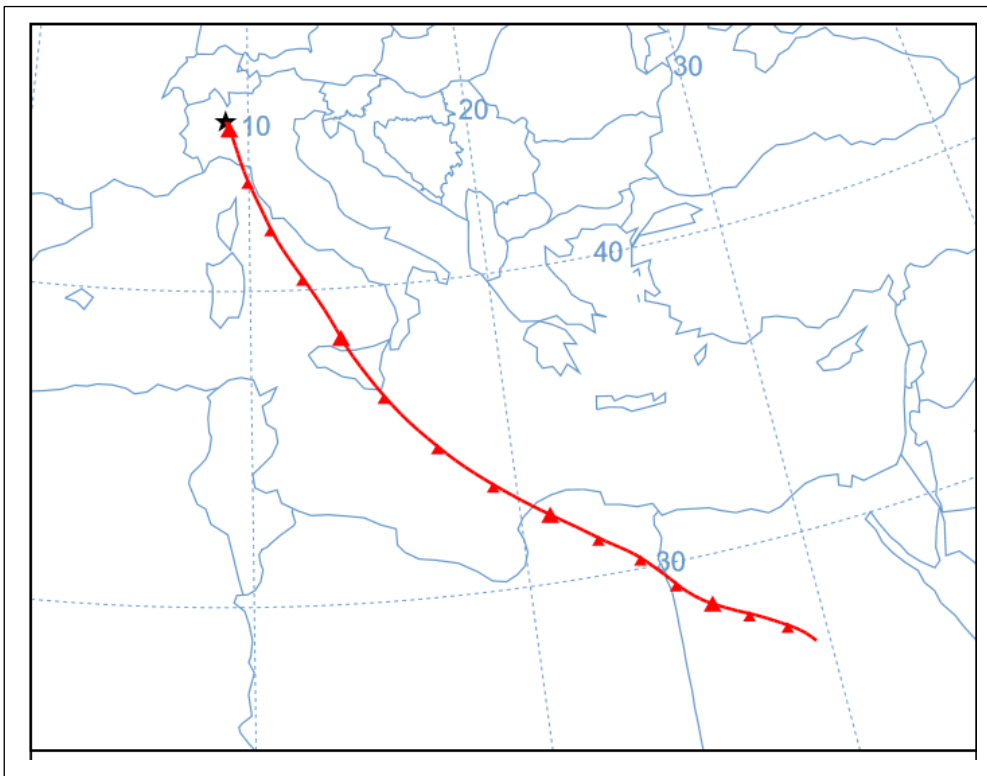


Figura 182- Traiettoria della circolazione atmosferica in arrivo Milano

### 5.5.3.6 - COMMENTO

L'alta pressione del trimestre invernale del 2003 si è presentata in modo consistente sia a livello di durata temporale che di intensità.

L'intensità dell'alta pressione invernale la si riscontra nella buona coincidenza tra le mappe del geopotenziale. La coincidenza delle due mappe è di particolare importanza poiché evidenzia lo stesso andamento della circolazione sia al suolo che nell'alta stratosfera (in termini di temperatura e di pressione) ed è dunque una conferma dello spessore dell'anomalia di circolazione calda che ha invaso il Mediterraneo.

Già dal 27 gennaio 2003 si nota un'alta pressione molto forte che proviene dal basso mediterraneo e di matrice molto calda che si scontra con le perturbazioni nord-atlantiche più fredde.

In entrambi i livelli isobarici l'alta pressione meridionale ha scalzato i fronti atlantici, determinando le anomalie di temperatura e di assenza di precipitazioni sul nord Italia.

L'Italia meridionale invece è stata spesso interessata da bolle più fredde atlantiche che si sono distaccate dalla saccatura madre, causando ingenti temporali.

È interessante notare che il fronte caldo mediterraneo è sempre riuscito ad invadere il nord Italia, scalzando la perturbazione atlantica. La perturbazione atlantica è riuscita ad invadere, seppur non in modo persistente, altre zone europee, ma mai il nord Italia, che dunque ha iniziato a risentire di scarsità d'acqua già dall'inverno.

A partire dal 10 di marzo la perturbazione atlantica è stata definitivamente spinta verso il nord-est europeo, a scapito del fronte caldo che si è spinto sempre più a nord.

Dalle mappe relative al 31 marzo 2003 si visualizza bene l'Anticiclone Africano (rosso) che ha iniziato a spingersi sempre più a nord e che si è poi stabilizzato sull'Italia da maggio a fine agosto.

La precipitazione verificatasi a Milano nelle giornate del 2/3 marzo è da imputarsi alla formazione di celle convettive che hanno generato temporali nel nord Italia, in seguito allo scontro tra il fronte atlantico ed il fronte caldo mediterraneo. La convettività di questa precipitazione è durata poche ore per poi lasciare spazio di nuovo all'aria calda di origine africana.

Le traiettorie ottenute con il programma Hi-Split mostrano l'ingresso di aria calda su Milano, aria di provenienza meridionale.

Le traiettorie individuate sono particolarmente esplicative di quanto affermato sopra a partire dal 25 di febbraio. La traiettoria relativa al 10 marzo è evidentemente associata allo spostamento dell'Anticiclone delle Azzorre più a sud, spinto dai fronti atlantici. In ultimo la traiettoria del 31 marzo è di chiara origine africana.

Dunque la causa dell'intensa siccità a Milano è da attribuirsi all'area di bassa pressione stazionaria-atlantica che ha spostato verso sud i massimi dell'Anticiclone delle Azzorre. L'espansione della medesima area di alta pressione verso nord-est ha interessato l'intero continente europeo centro-occidentale, dove ha convogliato aria molto calda.

L'aria calda è stata ulteriormente rafforzata dalla fusione sull'Africa nord-occidentale dell'Anticiclone delle Azzorre con l'Anticiclone Africano.

L'Anticiclone delle Azzorre ha spostato il suo centro d'azione in pieno Atlantico nei primi mesi del 2003, spinto dalla forte azione della perturbazione nord-atlantica. Contemporaneamente si è avuta una risalita di masse d'aria calda e secca dal Deserto del Sahara in direzione del Continente.

L'anticiclone Africano potrebbe essere stato spinto più a nord a causa della spinta settentrionale del Monzone del Golfo di Guinea che, arrivando fino al Deserto del Sahara, lo ha delocalizzato più a nord.

Questa situazione barica ha insistito su Milano in tutto il trimestre invernale ed è stata la causa dell'assenza di precipitazione verificatasi e che ha causato poi la grave siccità estiva.

## 5.6 CONCLUSIONE PARTE DI ANALISI II

L'analisi condotta è risultata utile per poter comprendere a livello generale quale possa essere stata la correlazione tra la precipitazione e le circolazioni in atto al suolo e nella bassa troposfera.

In una situazione pluviometrica media, in perfetto accordo con la teoria dei regimi pluviometrici, la situazione barica invernale tipica sull'Italia è dominata dalla presenza dell'Anticiclone russo che determina in maniera preponderante il tempo invernale in una vastissima area del continente euroasiatico.

L'Anticiclone russo porta con sé tempo molto freddo e generalmente secco. Solamente quando le sue masse fredde e asciutte incontrano i rilievi, come le Alpi, si generano nevicate abbondanti che in taluni casi possono estendersi fino alla città.

Inoltre in inverno è presente l'alta pressione di blocco, costituita dall'espansione dell'anticiclone delle Azzorre verso la Gran Bretagna e l'Europa occidentale, così che le fredde e piovose perturbazioni atlantiche vengono deviate verso la Scandinavia, ovvero lontano dall'Italia.

Questo è il motivo per cui le stagioni invernali in Italia sono sempre secche.

Questo tipo di configurazione barica invernale non è stata ritrovata nel periodo 2000-2015 che, come si è visto, non ha rispettato il regime pluviometrico teorico.

L'aumento della precipitazione invernale, a carattere circolatorio, è imputabile alla latitanza dell'Anticiclone Russo e al rafforzamento delle perturbazioni atlantiche che riescono a raggiungere il nord-Italia.

Il persistere di una circolazione di larga scala caratterizzata da flussi atlantici particolarmente intensi con asse più a sud della norma, associati ad un'alta frequenza di perturbazioni extra-tropicali, consente di scaricare ingenti quantitativi di pioggia nel nord Italia.

Negli anni classificati come poco piovosi, se non addirittura asciutti, l'anomalia del trimestre invernale, che si ricorda essere risultato precursore della pluviometria annuale, potrebbe essere imputabile ad uno spostamento verso sud dell'Anticiclone delle Azzorre. Questo, spinto dalle perturbazioni atlantiche intense, abbandona la sua posizione spostandosi verso l'Europa dove porta alta pressione ed assenza di precipitazioni. Qualora poi l'Anticiclone delle Azzorre incontra l'Anticiclone Africano si produce un'intensa anomalia negativa di precipitazione che causa ingenti periodi siccitosi.

L'Italia trovandosi in mezzo a tali figure bariche è stata sottoposta ad anomalie pluviometriche che si sono ripetute in modo diverso da anno in anno.

## 6 SINTESI, CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E SVILUPPI FUTURI

### 6.1 SINTESI

In questo capitolo si riportano i principali risultati ottenuti attraverso lo svolgimento di questo lavoro.

Parte di *Analisi I*

- Le precipitazioni cumulate, a Milano, nel periodo 1984-1999 hanno confermato di aver seguito il regime pluviometrico storico della città. Tale regime è di carattere transizionale, con i massimi pluviometrici in autunno e primavera e minimo assoluto in inverno. Per tale analogia i valori medi del periodo 1984-1999 sono stati usati come valori medi di confronto per analizzare le precipitazioni occorse a Milano nel periodo 2000-2015;
- L'analisi delle precipitazioni, a Milano, nel periodo 2000-2015 ha evidenziato anomalie quantitative e qualitative sia nella precipitazione annuale, che stagionale e mensile;
- Nel periodo 2000-2015 si è verificata un'estremizzazione degli eventi di precipitazione tale da rendere privo di significato il concetto di valor medio pluviometrico (12 anni su 16);
- A livello stagionale le due stagioni di massimo regime, seguite dall'estate hanno in media ridotto il proprio apporto pluviometrico, a favore dell'inverno che ha aumentato la sua precipitazione media di oltre 60mm. L'inverno si è presentato in 9 anni su 16 come molto piovoso;
- A livello mensile febbraio presenta una spiccata tendenza nel classificarsi come mese molto piovoso (10 anni su 16). Novembre nel 50% dei casi si è presentato come molto piovoso, al contrario di ottobre che ha drasticamente ridotto il proprio quantitativo pluviometrico. Gennaio, marzo, aprile e maggio non hanno mostrato una evidenza marcata nell'aumentare o diminuire le proprie precipitazioni. Da giugno a settembre, la precipitazione è diminuita. Dicembre ha in media aumentato le proprie precipitazioni.
- È stata osservata una corrispondenza tra il carattere pluviometrico invernale e quello pluviometrico finale dell'anno in corso: ad inverni piovosi sono seguiti anni molto piovosi, ad inverni poco piovosi sono susseguiti anni con scarsità d'acqua. Tale osservazione è risultata consistente in dodici anni su sedici. L'inverno è risultato essere un buon predittore della piovosità dell'anno nel 75% dei casi;
- Confrontando l'inverno astronomico con quello meteorologico, l'anomalia stagionale individuata rimane invariata e questo è un'ulteriore certezza al risultato ottenuto;
- Eliminando dalla serie temporale 2000-2015 il 2014, che ha presentato un valore di massima invernale non trascurabile, l'anomalia invernale si conferma.

Applicando un'analisi di regressione lineare alla serie completa 2000-2015 si evidenzia anche dal punto di vista statistico la presenza di un trend pluviometrico in aumento;

- L'applicazione del test F sull'anomalia invernale ha confermato che il trend individuato sia a livello qualitativo, sia con l'analisi di regressione è risultato consistente anche dal punto di vista statistico, al livello fissato di significatività;
- Al solo livello qualitativo si è verificato che le anomalie pluviometriche di questi 16 anni non abbiano presentato similitudini con i duecento anni precedenti. Si è osservato che l'anno di massima e l'anno di minima degli ultimi duecento ventisei anni appartengono agli ultimi sedici anni (2014, 2003) e che, l'inverno di massima è il 2014;
- Analizzando i valori medi stagionali si conclude che, ad ora, il regime medio annuo degli ultimi quindici anni ha mantenuto le caratteristiche del regime pluviometrico delle medie latitudini, ma ha perso il carattere prettamente transizionale per acquistare un regime di tipo oceanico. Quest'ultimo prevede piogge sparse in tutte le stagioni, portate dai venti marittimi di origine atlantica con massimo in autunno;
- Considerando separatamente invece gli anni di massima e di minima, nel periodo 2000-2015, si osserva che i primi tendono ad avere piogge sparse in tutte le stagioni (regime oceanico) e che i secondi seguano un regime sub-tropicale, dove si ha assenza di precipitazione ad eccezione che in un'unica stagione, nei casi in questione l'autunno.

#### Parte di *Analisi II*

- L'aumento della precipitazione invernale, a carattere circolatorio, è dovuta alla latitanza dell'Anticiclone Russo e al rafforzamento delle perturbazioni atlantiche che riescono a raggiungere il nord-Italia;
- Negli anni classificati come poco piovosi l'anomalia del trimestre invernale è imputabile ad uno spostamento verso sud dell'Anticiclone delle Azzorre. Questo, spinto dalle perturbazioni atlantiche intense, si sposta verso l'Europa dove porta alta pressione ed assenza di precipitazioni. Qualora poi l'Anticiclone delle Azzorre incontra l'Anticiclone Africano si produce un'intensa anomalia negativa di precipitazione che causa ingenti periodi siccitosi.

## **6.2 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

L'estremizzazione degli eventi di precipitazione e l'assenza del tipico regime pluviometrico su Milano dal 2000 al 2015 non può non far pensare ad una correlazione con il cambiamento climatico in atto, ampiamente affermato e reso evidente dall'aumento di temperatura.

Temperatura e precipitazione sono strettamente collegati: un aumento della temperatura determina un riscaldamento delle masse d'acqua e dunque un aumento dell'evapotraspirazione. La maggior

energia in gioco può determinare rovesci successivi ancora più intensi in forma temporalesca, ad esempio.

L'influenza tra le due mantiene una variabilità intrinseca che non consente di dire con precisione quale sarà l'effetto finale predominante. Infatti temperatura e precipitazione sono soltanto due fattori all'interno del complesso sistema dinamico in cui viviamo, dove la variazione di uno di questi parametri influenza, se non addirittura sconvolge, i restanti.

I cambiamenti climatici rappresentano un fenomeno attuale: le temperature aumentano, i regimi delle precipitazioni si modificano, i ghiacciai e la neve si sciolgono e il livello medio globale del mare è in aumento.

È oramai accertato che gli eventi climatici estremi, quali nel caso di Milano alluvioni o siccità, stiano diventando sempre più frequenti.

La correlazione tra temperatura e precipitazione, e dunque il cambio climatico, non è stata oggetto di studio e approfondimento in questo elaborato: non è dunque possibile affermare direttamente che le attuali anomalie climatiche siano solamente legate al riscaldamento globale dovuto all'incremento dell'effetto serra, ma sicuramente i risultati trovati non smentiscono tale possibilità.

L'obiettivo portato a termine è stato quello di accertare che le precipitazioni su Milano abbiano cambiato il proprio regime pluviometrico tipico e, appurato questo, di identificare in termini pluviometrici cosa sia cambiato nelle singole stagioni e nei mesi degli anni considerati.

Il nuovo regime pluviometrico individuato, in cui si ha l'assenza di un minimo assoluto di precipitazione, quale era la stagione invernale, ne è una prova.

Le due stagioni di massimo regime hanno ridotto il loro contributo pluviometrico e sono state seguite dall'estate a favore dell'inverno.

Il regime delle precipitazioni è evidentemente in fase di cambiamento ed i valori medi hanno perso di significato, poiché ottenuti da una combinazione di valori estremi, di massimi e di minimi pluviometrici.

Il nuovo regime è un regime in cui si ha l'assenza di una stagione secca ed in cui estate e inverno tendono a bilanciarsi, entrambi con precipitazioni superiori ai 200mm annui.

Le anomalie pluviometriche invernali, individuate al suolo, trovano corrispondenza nelle circolazioni atmosferiche: ad una latitanza dei due Anticloni di blocco si alterna una persistenza dei flussi atlantici e l'espansione dei flussi caldi africani verso il nord Italia.

Il periodo considerato è troppo breve e i rispettivi cambiamenti pluviometrici sono ancora troppo recenti per poter individuare con precisione quale possa essere la tendenza futura: più alluvioni a Milano o più crisi di siccità?



Quello che è certo e che desta preoccupazione è il fatto che sia stato confermato un cambiamento, a prescindere dalla sua natura fisica.

### **6.3 SVILUPPI FUTURI**

L'elaborato è da considerarsi come un'impostazione esemplificativa di quella che potrebbe essere un'analisi completa del sistema pluviometrico su un areale maggiore.

L'esito positivo dell'analisi consiste nel fatto che è stata individuata una reale tendenza del regime pluviometrico a modificarsi, come si pensava.

Sarebbe interessante approfondire l'elaborato andando ad analizzare nel dettaglio l'intera serie storica, partendo dal 1764, e approfondirne l'analisi stagionale sia in termini di climatologia statica che dinamica.

Con serie temporali più estese e strumenti statistici aggiuntivi, che tengano conto anche di altre variabili meteorologiche e climatiche, si potrebbe pensare di estendere questo tipo di analisi a tutto il territorio italiano, come supporto nella prevenzione degli eventi pluviometrici estremi e come gestione di tutte le opere idrauliche, strutturali ed ambientali presenti sul nostro territorio.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Andrea Giuliacci, **IL CLIMA** – come cambia e perché, Collana Meteo – Alpha Test, Milano, 2012.
- Andrea Giuliacci, Mario Giuliacci, Paolo Corazzon, **MANUALE DI METEOROLOGIA**, Collana Meteo – Alpha Test, Milano, 2012.
- Marta della Nave e Ilaria Donadio, **Classificazione del clima di Varese e Milano mediante cluster analysis, persistenza e variabilità**, Ingegneria per l'ambiente e il territorio, 2013.
- Roland R. Draxler, **HYSPLIT USER'S GUIDE**, Air Resources Laboratory, Silver Spring, Maryland, 2000.
- Riva Isabella, **Analisi della precipitazione in Lombardia e loro correlazione col tipo di circolazione atmosferica (quinquennio 1981-1985)**, Scienze matematiche fisiche e naturali, Università degli studi di Milano, 1988.

## **SITOGRAFIA**

Sito Internet: Arpa Lombardia,

<http://www2.arpalombardia.it/siti/arpalombardia/meteo/richiesta-dati-misurati/>

Sito Internet: Il Meteo,

<http://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/>

Sito Internet: Wetterzentrale,

<http://www.wetterzentrale.de/>

Sito Internet: University of Wyoming,

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Sito Internet: Air Resources Laboratory,

<http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl>

Sito Internet: Air Resources Laboratory – HYSPLIT ARCHIVE TRAJECTORIES,

[http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)

Sito Internet: NIMBUS, Rivista italiana di meteorologia, Clima e Ghiacciai,

<http://www.nimbus.it/nimbus.htm>

Sito Internet: IPCC

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

Sito Internet: ISPRA AMBIENTE,

<http://www.isprambiente.gov.it/it>

## **RINGRAZIAMENTI**

### **Ringrazio di cuore il professor A. Ghezzi.**

La disponibilità mostrata è stata un sostegno fondamentale per portare a termine il mio percorso di studi, e concluderlo con un lavoro su un argomento di mia grande passione, rendendolo piacevole e divertente. Grazie perché questo lavoro sarà da me ricordato come la prova che *insegnare vuol dire trasmettere*, prima con il cuore e poi con la mente.

### **Ringrazio di cuore Mamma e Papà.**

Grazie per essere una famiglia. Grazie perché la serenità di casa mi ha permesso di portare a termine gli studi, e di viverli come la prima grande sfida che la vita mi ha messo davanti. Grazie perché il vostro esempio sarà per me, per sempre, la determinazione e la forza che mi permetteranno di non arrendermi mai.

### **Ringrazio mia sorella Alessandra.**

Per l'incoraggiamento, la fiducia, i consigli e la costante presenza che mi ha regalato durante tutto questo periodo di studi! Ed allego i complimenti per il successo del suo esame di maturità e gli auguri per l'inizio di un nuovo percorso di vita e di studi!

### **Ringrazio il mio fidanzato Mirko.**

Per aver saputo ascoltare ed interpretare le mie esigenze, facilitando le mie ricerche, per aver speso parte del suo tempo per leggere e discutere con me le bozze del lavoro, per l'aiuto, l'insistente fiducia e il desiderio di rendere i risultati di questo percorso di studi come l'inizio di un progetto di vita assieme!

**Ringrazio la famiglia tutta** e tutte le persone che hanno creduto in me.

### **Grazie al carissimo San Giuseppe da Copertino.**

Per essere stato per me speranza e umiltà nell'affrontare questi ultimi due anni universitari.



