



**Università degli Studi di Milano – Bicocca**  
**DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELL'AMBIENTE E DELLA TERRA**

**Corso di Laurea in**  
**Scienze e Tecnologie per l'Ambiente**

**Analisi di una serie di misure**  
**termo-pluviometriche in ambito urbano**  
**ottenute da strumenti di diversa tipologia**

*Relatore:*

**Prof. Valter Maggi**

*Relatore esterno: (tutor aziendale)*

**Prof. Giuseppe Frustaci**

*Prova finale di Laurea di:*

**Camilla Calvi**

*Matricola:*

**807860**

**Anno Accademico 2018/2019**

## INDICE

1. Introduzione
  - 1.1 Le misure meteorologiche
  - 1.2 Strato limite atmosferico (ABL) e strato limite urbano (UBL)
  - 1.3 Regime pluviometrico
  - 1.4 Regime termometrico
2. Stazioni e strumenti
  - 2.1 Stazioni prese in esame
  - 2.2 Pluviometri
  - 2.3 Termometri
3. Selezione dei dati
4. Analisi dei dati
  - 4.1 Dati pluviometrici
  - 4.2 Dati termometrici
5. Conclusione
6. Bibliografia
7. Appendice A
8. Appendice B
9. Ringraziamenti

## 1. Introduzione

Il presente elaborato si propone di analizzare una serie di misure termo-pluviometriche in ambito urbano ottenute da strumenti di diversa tipologia che fanno parte della rete di proprietà della Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo.

Nelle stazioni prese in considerazione sono presenti contemporaneamente il pluviometro a bascula (Lastem DQA130 e 131), la sonda di temperatura modello 107 (chiamata anche termometro ridonato) e la stazione automatica Vaisala WXT520. Quest'ultima è un trasmettitore meteorologico che permette di misurare la velocità e la direzione del vento, le precipitazioni e la temperatura.

Il periodo temporale preso in esame fornisce una base dati sufficiente per una statistica significativa.

Lo scopo di questo progetto è quello di ricercare e quantificare eventuali differenze sistematiche tra le diverse tipologie di misure effettuate dagli strumenti e di mettere in evidenza le incertezze associate a questo tipo di misurazioni.

Nella prima parte sono stati forniti degli elementi teorici riguardanti le misure meteorologiche, la climatologia rurale e urbana, sottolineando le diversità di questi due ambienti, il regime pluviometrico e termometrico.

Nella seconda parte è stata introdotta la descrizione della rete di stazioni meteorologiche automatiche specializzata nell'ambito urbano, denominata Climate Network, in cui sono presenti gli strumenti di cui viene fatta in seguito la descrizione.

Nell'ultimo capitolo, prima della conclusione, sono stati illustrati tutti i passaggi dell'analisi sia dei dati pluviometrici sia dei dati termometrici, anche attraverso l'aiuto di alcuni grafici.

### 1.1 Le misure meteorologiche

Le misure meteorologiche in ambito urbano si ottengono con strumenti opportunamente posizionati in modo da assicurarne la rappresentatività e sono necessarie per descrivere e monitorare la complessa atmosfera della città. Su queste misure è possibile eseguire analisi sui dati di temperatura, umidità, precipitazione e vento.

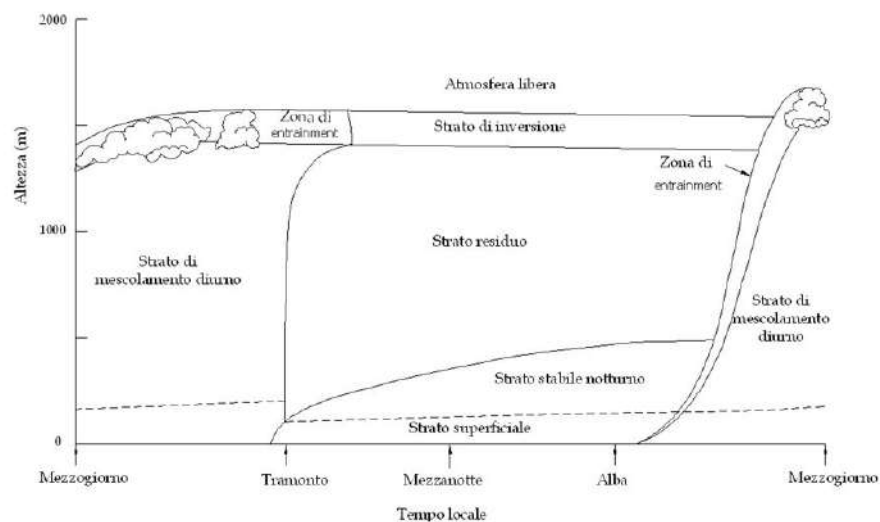
Le misurazioni meteorologiche nelle città sono molto impegnative a causa dell'ambiente urbano fortemente disomogeneo, costituito principalmente da edifici distribuiti in modo irregolare con caratteristiche diverse che producono un numero di effetti su piccola scala rilevanti, che ne limitano fortemente la rappresentatività, come ad esempio irraggiamento

termico da pareti o tetti riscaldati, effetti di schermatura di edifici vicini.<sup>1</sup> Questi effetti possono essere ridotti al minimo grazie ad una scelta corretta della posizione delle stazioni o dei singoli sensori. Solo se l'ubicazione della stazione e l'esposizione dei sensori sono scelte correttamente e in modo omogeneo, le misurazioni urbane possono essere considerate rappresentative di un'area urbana definita e di un aspetto specifico dell'atmosfera urbana.<sup>2</sup>

## 1.2 Strato limite atmosferico (ABL) e strato limite urbano (UBL)

Per comprendere meglio i dati forniti dalle stazioni meteorologiche occorre innanzitutto capire quali sono le caratteristiche, la struttura e i meccanismi fisici principali dello strato limite atmosferico (*atmospheric boundary layer*, ABL) in un'area rurale, cioè di quella parte di atmosfera (approssimativamente dalla superficie fino ad un paio di chilometri di quota) influenzata direttamente dalle interazioni con la superficie terrestre.

Le tre componenti principali dell'ABL (*Figura 1*) sono lo strato di rimescolamento, lo strato residuo e lo strato limite stabile, che presentano una loro evoluzione temporale diurna. Inoltre si distingue uno strato superficiale, corrispondente al primo decimo dello spessore dell'ABL.



*Figura 1* Evoluzione diurna della struttura dello strato limite atmosferico

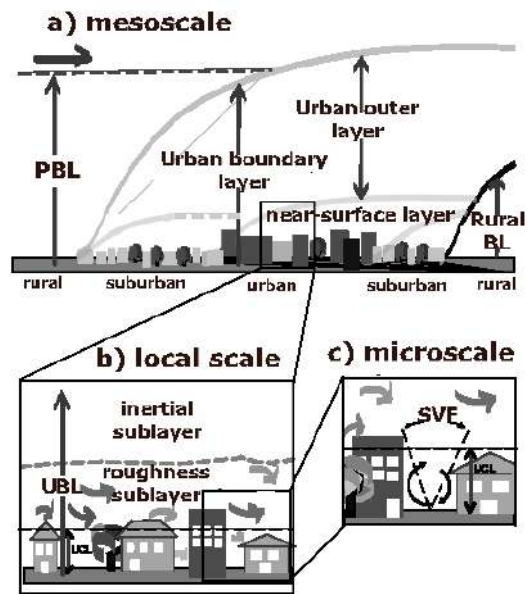
Lo strato rimescolato inizia a svilupparsi all'alba, quando il suolo si riscalda per effetto dell'irraggiamento solare, cresce nel corso della mattina e raggiunge la sua massima altezza nel pomeriggio. Al tramonto viene meno la forzante energetica principale, quella del sole, e perciò i moti convettivi turbolenti che avevano caratterizzato lo strato di rimescolamento si smorzano e si spengono; si forma così lo strato residuo. Dopo il tramonto il suolo cessa di ricevere energia dal sole, mentre continua a irradiare nell'infrarosso, raffreddandosi. L'aria

a contatto con il suolo si raffredda a sua volta, generando un'inversione termica (uno strato di aria fredda al di sotto di uno strato d'aria più calda) e perciò una stratificazione stabile, lo strato limite stabile.<sup>3</sup>

La principale causa delle differenze tra lo strato limite atmosferico appena descritto e la struttura dello strato limite urbano (*urban boundary layer, UBL*) è la presenza di ostacoli (soprattutto edifici), inusuali in un ambiente naturale.

Nello strato limite urbano si possono distinguere tre substrati (*Figura 2*):

1. lo strato che va dalla superficie fino all'altezza media degli edifici si chiama strato di copertura urbana (*urban canopy layer, UCL*); elemento strutturale caratteristico di questo strato sono i cosiddetti canyon urbani, all'interno dei quali si sviluppano vortici trasversali rispetto all'asse;
2. il substrato di rugosità (*roughness sublayer, RSL*) include lo strato di copertura urbana e si definisce come lo strato in cui il flusso e la turbolenza sono direttamente influenzati dalla presenza di ostacoli (edifici) ed assumono quindi una struttura variabile nelle tre dimensioni;
3. sopra il substrato di rugosità c'è il substrato inerziale, all'interno del quale i flussi turbolenti non risentono dell'effetto locale dei singoli edifici, e sono quindi omogenei, in particolari condizioni poi il substrato inerziale non esiste.<sup>3</sup>



*Figura 2* Schema della struttura dello strato limite atmosferico urbano

### 1.3 Regime pluviometrico

Il regime pluviometrico è la distribuzione della quantità di pioggia caduta in un anno tra le varie stagioni o tra i singoli mesi dell'anno.

La quantità di pioggia caduta si misura in millimetri e può riferirsi a diversi intervalli di tempo: un'ora, un giorno, un mese, una stagione o un anno.<sup>4</sup>

I millimetri in questione indicano l'altezza raggiunta dall'acqua piovana su un suolo pianeggiante, nell'ipotesi che non ci siano perdite dovute all'evaporazione o allo scorrimento superficiale.

In Italia è possibile individuare una grande varietà di regimi pluviometrici:

- Il regime alpino, che presenta un unico massimo annuale di precipitazioni in estate e un minimo in inverno;
- Il regime prealpino, caratterizzato da due massimi distinti, di cui uno, più accentuato in primavera e uno secondario in autunno;
- Il regime adriatico, con il massimo autunnale di gran lunga superiore a quello primaverile;
- Il regime submediterraneo, tipico del versante tirrenico e della Sardegna, dove l'inverno diviene la stagione più piovosa dell'anno dopo l'autunno;
- Il regime mediterraneo, caratteristico delle estreme regioni meridionali, nel quale la piovosità presenta un unico massimo nella stagione invernale e una prolungata siccità in estate.
- Il regime padano, che presenta due massimi tra i quali prevale quello autunnale.<sup>4</sup> Nello specifico, la città di Milano 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. Le precipitazioni sono ben distribuite nell'arco dell'anno, con le massime riscontrabili nelle stagioni primaverile ed autunnale, cui segue l'estate le cui precipitazioni sono a carattere temporalesco, quindi caratterizzate da rovesci intensi e di breve durata. In inverno, invece, le precipitazioni sono di debole intensità ma prolungate nel tempo.

#### 1.4 Regime termometrico

La temperatura è insieme alla precipitazione l'elemento che influenza maggiormente l'ambiente urbano.

Il regime termometrico è l'andamento delle temperature medie mensile nell'arco dell'anno. In base alle temperature medie annue, sulla superficie terrestre si possono distinguere cinque zone termiche: l'Italia si trova nella fascia climatica denominata zona temperata boreale e caratterizzata da una temperatura media annua tra i 12° e i 16° C.

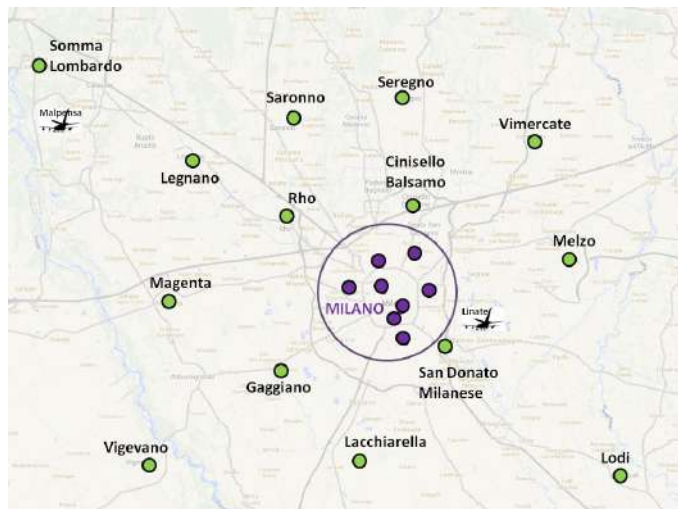
Le temperature medie più basse si possono registrare nelle zone settentrionali, in quanto sono caratterizzate da aree montuose e da pianure e non sono soggette all'azione del mare. Per quanto riguarda in particolare la Pianura Padana, essa è caratterizzata da un clima continentale umido con ampie escursioni termiche giornaliere e annuali.

## 2. Stazioni e strumenti

La Fondazione OMD è dotata di una rete di stazioni meteorologiche automatiche specializzata nell'ambito urbano, denominata Climate Network (nel seguito per brevità CN) che conta ad oggi 50 stazioni installate su gran parte del territorio nazionale italiano, di cui 8 presenti nella città metropolitana di Milano (*Figura 3*).<sup>5</sup>

Per far in modo che i dati misurati siano compatibili tra loro e rappresentino le condizioni meteorologiche delle zone urbane sono stati adottati i seguenti criteri:

- installazione di tutte le stazioni in contesti tipicamente urbani, posizionate alla sommità di edifici al fine di misurare la parte superiore del Canopy Layer;
- utilizzo dei medesimi sensori di ultima generazione in tutte le stazioni;
- omogeneo posizionamento delle stazioni sulla sommità di edifici con analoghe caratteristiche;
- prestabilite modalità di taratura con riferibilità dei dati agli standard e manutenzione pianificata.<sup>6</sup>



*Figura 3* Stazioni attive nell'area metropolitana di Milano e dintorni

In questo modo è possibile ottenere una rete del tutto omogenea e far sì che le stazioni del CN siano direttamente rappresentative dei centri cittadini dove risiede la maggior parte della popolazione nazionale.

Le stazioni meteorologiche del CN sono costituite da sensori di ultima generazione, compatti e facili da usare, senza parti mobili, che garantiscono misure più affidabili.

Questi sensori sono costituiti da un trasmettitore meteorologico WXT520 (*Figura 4*), che offre sei parametri meteorologici in uno strumento compatto. WXT520 misura la velocità e la direzione del vento, le precipitazioni, la pressione atmosferica, la temperatura e l'umidità relativa.<sup>7</sup>

In ogni stazione CN è presente anche un sensore di temperatura aggiuntivo (PT100) come controllo del termometro WXT520, essendo la temperatura la variabile più rilevante per le normali applicazioni di rete.

L'utilizzo delle stazioni WXT520 ha molti vantaggi per quanto concerne l'economia di gestione e quindi la sostenibilità: in primo luogo sono autonome perché usano pannelli solari

e non richiedono un collegamento alla rete elettrica, in questo modo ci sono meno vincoli per quanto riguarda il loro posizionamento. Infatti sono tutte situate in modo tale da consentire di valutare il clima della città senza essere influenzate dalle condizioni locali ma tenendo conto di una somma di esse. Inoltre sono piccole, senza parti mobili e non richiedono molta manutenzione. Allo stesso tempo, però, hanno anche qualche svantaggio, ovvero il fatto che questi trasmettitori non sono di primaria qualità.

Il sensore compatto e il termometro ridondato, insieme al pannello solare, alla batteria e al datalogger<sup>1</sup> sono montati su pali abbastanza alti (2-4 m).

Il controllo quotidiano dei sensori remoti, l'acquisizione dei dati, la validazione e l'archiviazione vengono eseguiti sia da procedure automatiche che da meteorologi esperti mediante un database appositamente progettato (denominato Datamet).<sup>6</sup> Il database CN contiene dati mediati sui 10 minuti per ciascuna variabile meteorologica che possono essere aggregati in valori orari e giornalieri.

Una volta all'anno, a seguito di un cambio programmato, ogni WXT520 che opera per CN viene sostituita con un'altra WXT520 precedentemente pulita e calibrata. Questa rotazione è realizzabile grazie allo stesso tipo di sensore installato in ogni stazione CN e grazie alla stessa catena di calibrazione a cui sono soggette tutte le WXT520.

Per cui ogni anno tutte le stazioni vengono regolarmente sottoposte a manutenzione: il trasmettitore viene smontato, pulito e il suo schermo verniciato con vernici bianche in caso di ingiallimento, al fine di evitare una deriva dei valori di temperatura registrati a causa dell'invecchiamento della stazione.<sup>8</sup>

Tutte le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria (ad es. in caso di danni o anomalie verificatesi nella stazione CN) sono registrate su un "database di manutenzione" dedicato che contiene la storia passata di ogni WXT520 e di ogni stazione CN.

Una volta pulita, ogni WXT520 viene calibrata in una camera climatica, di proprietà della Fondazione OMD, seguendo una catena di calibrazione rigorosa e definita.

La procedura di calibrazione della temperatura viene eseguita nella speciale camera climatica utilizzando un termometro di resistenza al platino di riferimento secondario come standard di prima linea e tre termometri di resistenza come standard di trasferimento. Lo



*Figura 4* Trasmettitore meteorologico Vaisala WXT520

---

<sup>1</sup> Codificatore digitale dei dati.



standard di prima linea viene periodicamente (ogni 5 anni) calibrato presso un Istituto Nazionale di Metrologia.

Gli standard di seconda linea sono calibrati (ogni anno) con il termometro a resistenza al platino utilizzando un blocco di rame come comparatore di temperatura. Infine, la WXT520 è calibrata nella camera climatica, posizionandola vicino ai tre PT100.

L'intervallo di calibrazione è compreso tra  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $+50^{\circ}\text{C}$ , con incrementi di  $10^{\circ}\text{C}$ .

La curva di calibrazione ottenuta viene interpolata con una funzione polinomiale di secondo grado. I loro coefficienti vengono inseriti nel software di acquisizione per correggere i dati misurati.

L'intera procedura di calibrazione viene gestita automaticamente utilizzando uno strumento applicativo appositamente progettato. In questo modo, il processo di calibrazione è standardizzato e l'errore dovuto all'operatore è ridotto al minimo.

Ad ogni processo di calibrazione, viene compilato un registro specializzato con le seguenti informazioni: numero seriale WXT, coefficienti di calibrazione e curva di incertezza stimata.

Il datalogger corregge i dati grezzi WXT con i parametri di calibrazione e fornisce una media di 10 minuti trasmessa via GSM al server Datamet. Ogni record di 10 minuti contiene quindi la marca temporale, il numero seriale della WXT e anche i parametri della curva di correzione della calibrazione utilizzata. Ciò garantisce la totale tracciabilità dei dati per un'eventuale correzione successiva.<sup>1</sup>

Per quanto riguarda il pluviometro a bascula, la calibrazione non viene effettuata e quindi è necessario fare affidamento ai dati di confronto o a quelli dichiarati dal produttore.

## 2.1 Stazioni prese in esame

Sono state analizzate le stazioni di Milano Bicocca e Milano Sarpi (*Figura 5*) perché in esse sono presenti i sensori accoppiati, ovvero la WXT520, il pluviometro a bascula e il termometro modello 107.



**Figura 5** Collocazione delle 8 stazioni presenti nella città metropolitana di Milano, in particolare la stazione di Milano Bicocca e Milano Sarpi

Nella stazione di Milano Bicocca sono presenti due WXT520 e due sensori di temperatura, un modello 107 e un sensore di temperatura ventilato. Quest'ultimo è dotato di una ventola sempre in funzione che facilita la circolazione dell'aria nello schermo per evitare riscaldamenti localizzati al suo interno dovuti a calme di vento e forte irraggiamento solare. Per questo motivo in seguito si parlerà della stazione di Bicocca ventilata per il confronto tra una WXT520 e il pluviometro a bascula e il termometro della stessa WXT520 e il termometro ventilato.

Di seguito vengono riportate le coordinate di posizionamento delle stazioni analizzate:

Milano Bicocca (*Figura 6*):

Latitudine 45,510154 e longitudine 9,211565

131 m slm

10 m altezza dell'edificio

2,6 m altezza della stazione

143,6 m altezza totale



*Figura 6* Stazione meteorologica Milano Bicocca della rete Climate Network

Milano Sarpi (*Figura 7*):

Latitudine 45,479822 e longitudine 9,175951

122 m slm

15 m altezza dell'edificio

4 m altezza della stazione

141 m altezza totale



*Figura 7* Stazione meteorologica Milano Sarpi della rete Climate Network

## 2.2 Pluviometri

### Pluviometro a bascula Lastem DQA130 e 131 (Figura 8)

Il pluviometro è uno strumento costituito da un imbuto ad asse verticale che raccoglie la pioggia e ne misura la quantità tramite un opportuno meccanismo a scatto: registrando il numero degli scatti, ciascuno dei quali corrisponde a un quantitativo minimo di acqua prefissato (in genere 0,1 o 0,2 mm), si risale alla quantità totale di pioggia caduta.

Le principali cause di errore nella misura delle precipitazioni risiedono, oltre che nelle perdite per evaporazione, soprattutto nella posizione dello strumento. Il pluviometro va posizionato lontano da ostacoli che possono fare “ombra”, in modo che le correnti aeree che trasportano la pioggia fluiscano liberamente intorno al pluviometro e lontano dalle sorgenti di calore che possono far evaporare velocemente l’acqua raccolta. Poiché poi lo strumento deve misurare le precipitazioni che raggiungono il suolo, occorre che esso sia posto il più vicino possibile al terreno.

In generale, la determinazione della quantità di precipitazione caduta è sempre affetta da larghi margini d’errore o d’incertezza.<sup>4</sup>

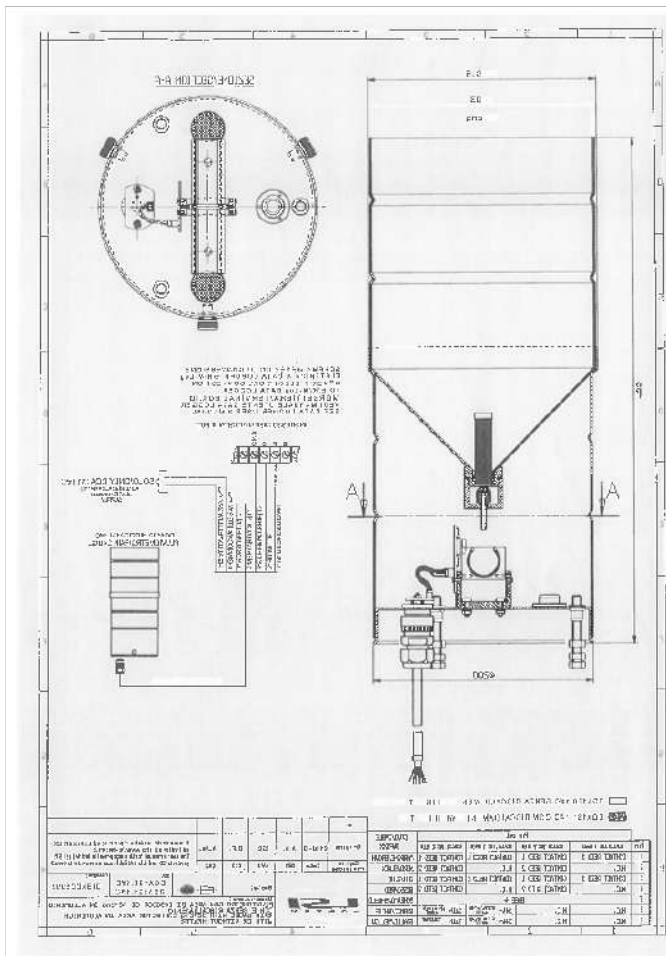


Figura 8 Scheda del pluviometro a bascula Lastem presente nelle stazioni di Milano Bicocca e Milano Sarpi

### Stazione automatica Vaisala WXT520 (Figura 4)

Il trasmettitore meteorologico WXT520 misura la velocità e la direzione del vento, le precipitazioni, la pressione atmosferica, la temperatura e l'umidità relativa.

#### Principio di misurazione del vento

Il sensore del vento ha una serie di tre trasduttori ultrasonici equidistanti su un piano orizzontale. La velocità e la direzione del vento sono determinate misurando il tempo impiegato dagli ultrasuoni per spostarsi da ciascun trasduttore agli altri due. Il sensore del vento misura il tempo di transito (in entrambe le direzioni) lungo i tre percorsi stabiliti dalla disposizione dei trasduttori. Questo tempo di transito dipende dalla velocità del vento lungo il percorso ultrasonico.

La velocità del vento viene calcolata dai tempi di transito misurati utilizzando la seguente formula:  $V_w = 0.5 \times L \times (1/t_f - 1/t_r)$

dove

$V_w$  = Velocità del vento

$L$  = Distanza tra i due trasduttori

$t_f$  = Tempo di transito in avanti

$t_r$  = Tempo di transito in direzione inversa

Misurando i sei tempi di transito è possibile calcolare  $V_w$  per ciascuno dei tre percorsi ultrasonici. Le velocità del vento calcolate sono indipendenti dall'altitudine, dalla temperatura e dall'umidità, che vengono cancellate quando i tempi di transito sono misurati in entrambe le direzioni, sebbene i singoli tempi di transito dipendano da questi parametri. L'uso dei valori  $V_w$  di due percorsi del vettore è sufficiente per calcolare la velocità e la direzione del vento. Viene utilizzata una tecnica di elaborazione del segnale in modo che la velocità del vento e la direzione del vento siano calcolate dai due percorsi del vettore di migliore qualità. La velocità del vento è rappresentata come velocità scalare in unità selezionate (m/s, km/h).

I valori medi di velocità e direzione del vento sono calcolati come media scalare di tutti i campioni nel tempo di media selezionato (1 ... 3600 s) con un intervallo di aggiornamento selezionabile.

La WXT520 monitora costantemente la qualità del segnale di misurazione del vento. Se viene rilevata una scarsa qualità, i valori del vento vengono contrassegnati come non validi. Se oltre la metà dei valori di misurazione può essere considerata non valida, gli ultimi valori di vento validi vengono restituiti come dati mancanti.

## Principio di misurazione delle precipitazioni

Il sensore di precipitazione comprende un coperchio in acciaio e un sensore piezoelettrico montato sulla superficie inferiore del coperchio. Il sensore di precipitazione rileva l'impatto delle singole gocce di pioggia. I segnali dall'impatto sono proporzionali al volume delle gocce. Quindi, il segnale di ogni goccia può essere convertito direttamente in pioggia accumulata. La tecnica avanzata di filtraggio del rumore viene utilizzata per filtrare i segnali provenienti da altre fonti diverse dalle gocce di pioggia. I parametri misurati sono la pioggia accumulata, l'intensità e la durata di un evento piovoso. Il rilevamento di ogni singola goccia consente il calcolo della quantità e dell'intensità della pioggia ad alta risoluzione. Il sensore è anche in grado di distinguere la grandine dalle gocce di pioggia.<sup>7</sup>

## 2.3 Termometri

### **Sonda di temperatura modello 107 (Figura 9)**

La sonda di temperatura 107 viene utilizzata per misurare accuratamente la temperatura dell'aria, del suolo o dell'acqua in una varietà di applicazioni.

Il sensore è costituito da un termistore incapsulato in un alloggiamento di alluminio riempito con resina epossidica. Quando si misura la temperatura dell'aria, viene normalmente utilizzato uno scudo di radiazione a sei piastre per proteggere la sonda e limitare il carico di radiazione solare.<sup>9</sup>



*Figura 9* Installazione di una sonda di temperatura 107 e di uno schermo di radiazione su un braccio trasversale

### **Termometro della stazione automatica Vaisala WXT520 (Figura 4)**

Principio di misurazione PTU (Pressione, Temperatura e Umidità)

Il modulo PTU contiene sensori separati per la misurazione di pressione, temperatura e umidità.

Il principio di misurazione dei sensori di pressione, temperatura e umidità si basa su un oscillatore RC<sup>2</sup> avanzato e su due condensatori di riferimento rispetto ai quali viene misurata continuamente la capacità dei sensori.

---

<sup>2</sup> L'oscillatore è un circuito in grado di generare un segnale elettrico, in questo caso un segnale sinusoidale, portando in oscillazione "spontanea" un amplificatore con reazione positiva. Siccome la rete di reazione è costituita da resistenze e condensatori, questo tipo di oscillatore prende il nome di oscillatore RC.

Il modulo PTU include:

- sensore capacitivo in silicio per la misurazione della pressione,
- sensore capacitivo in ceramica per la misurazione della temperatura dell'aria,
- sensore polimerico a film sottile capacitivo per la misurazione dell'umidità.<sup>7</sup>

### 3. Selezione dei dati

I dati utilizzati consistono nella serie storica dei dati pluviometrici, relativi alla stazione di Milano Bicocca e di Milano Sarpi, a partire da novembre 2015 fino a marzo 2019. Sono stati presi in considerazione i dati di questo periodo in quanto l'installazione del pluviometro a bascula è stata effettuata a novembre 2015 nella stazione di Milano Bicocca e a marzo 2016 nella stazione di Milano Sarpi, mentre la stazione automatica WXT520 era già presente.

Relativamente ai dati termometrici, sono stati analizzati quelli relativi allo stesso periodo di tempo, ovvero da novembre 2015 a marzo 2019 per la stazione di Milano Bicocca e Milano Sarpi.

Per quanto riguarda Milano Bicocca, una seconda stazione WXT520 e un secondo sensore di temperatura dotato di ventilazione sono stati installati nel 2018, per cui per la stazione di Milano Bicocca ventilata si analizzano i dati dal 2018 al 2019.

I dati analizzati sulla precipitazione sono circa 180 000 raccolti nella stazione di Milano Bicocca e Milano Sarpi e circa 66 000 nella stazione di Milano Bicocca ventilata.

I valori della temperatura, invece, sono circa 155 000 per quanto riguarda le stazioni di Milano Bicocca e di Milano Sarpi e circa 51 200 per la stazione di Milano Bicocca ventilata. Tutti questi dati sono stati raccolti con una frequenza di 10 minuti sia per quanto riguarda la precipitazione che la temperatura e sono stati trattati in modo da eliminare le voci non disponibili o i dati non attendibili. Di conseguenza sono stati studiati il 100% dei dati rilevati dalle WXT520 e dal termometro modello 107, mentre per quanto riguarda i dati raccolti dai pluviometri, sono stati analizzati il 99,6% della stazione di Bicocca, il 99,4% della stazione di Sarpi e il 95,9% della stazione di Bicocca ventilata.

Il database usato è stato il software Datamet delle stazioni meteorologiche del CN di proprietà della Fondazione OMD.

Le variabili considerate sono la precipitazione (mm), l'intensità del vento medio (m/s) e la temperatura (°C) mediati nei 10 minuti, il numero di giorni con e senza precipitazione, la percentuale delle cumulate nei 10 minuti.



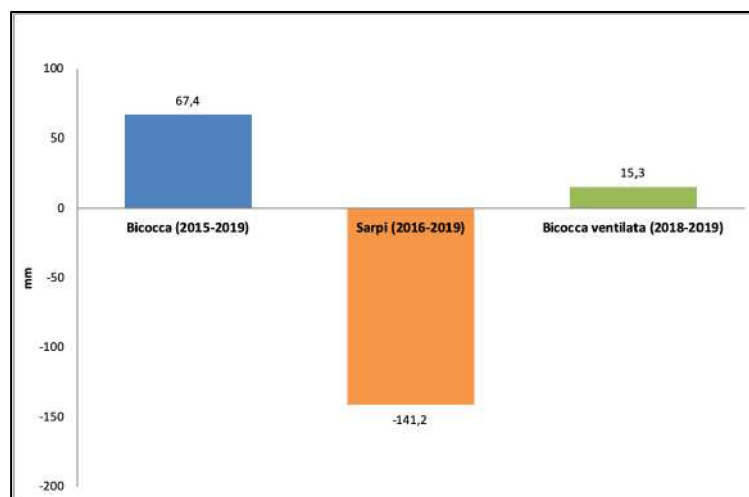
## 4. Analisi dei dati

### 4.1 Dati pluviometrici

Come primo passo dell'analisi è stata fatta una valutazione complessiva dei dati pluviometrici rilevati ogni 10 minuti, calcolando la somma totale di precipitazioni misurate dal pluviometro a bascula (PP\_b) e dalla WXT520 (PP) nel periodo da novembre 2015 fino a marzo 2019 ed effettuando la differenza tra il totale delle misure rilevate dai due strumenti.

	PP (mm)	PP_b (mm)	PP – PP_b (mm)	%
Bicocca (2015-2019)	2746,2	2678,8	67,4	2,5
Sarpi (2016-2019)	2413,4	2554,6	-141,2	5,9
Bicocca ventilata (2018-2019)	986,1	970,8	15,3	1,6

*Tabella 1* Somma complessiva di precipitazioni rilevate dalla WXT520 (PP) e dal pluviometro a bascula (PP\_b), differenza tra i valori delle somme e percentuale delle differenze calcolate prendendo come totale la cumulata rilevata dalle WXT520.



*Figura 10* Istogramma delle differenze della precipitazione cumulata tra la WXT520 e il pluviometro a bascula dal 2015 al 2019.

Dalla *Tabella 1* e dal grafico in *Figura 10* si può notare che nella stazione di Bicocca la differenza delle misure rilevate dai due tipi di strumenti (WXT520 - pluviometro a bascula) è di 67,4 mm, mentre la differenza delle misurazioni in Sarpi è -141,2 mm.

In questo caso, il fatto che il valore sia negativo vuol dire che il pluviometro a bascula rileva un valore di precipitazione maggiore rispetto alla WXT520.

Esprimendo le differenze sul totale di precipitazioni misurate dalla WXT520 e dal pluviometro a bascula in percentuale è emerso che in Bicocca sono circa il 2,5 %, mentre

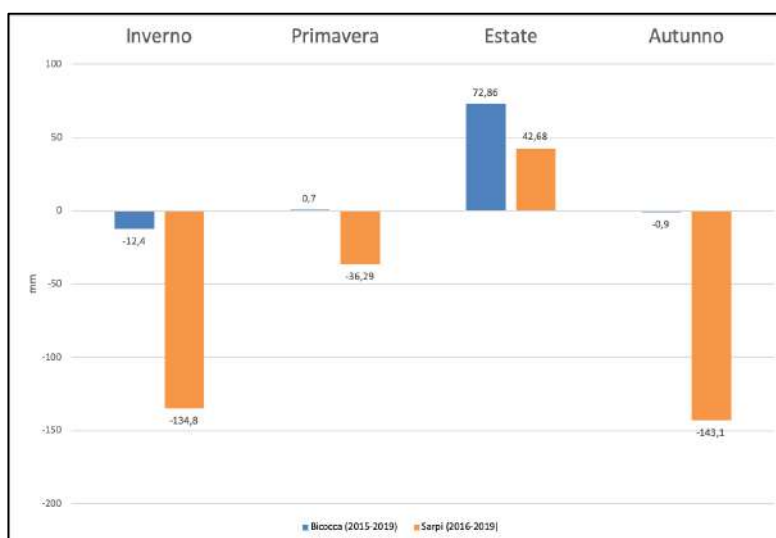
sono circa il 5,9 % quelle rilevate dalla WXT520 e dal pluviometro a bascula di Sarpi ed infine le differenze misurate dai due strumenti in Bicocca ventilata sono circa 1,6 %.

Pertanto, essendo tutte percentuali piccole, il fatto che nella stazione di Sarpi la differenza sia di segno negativo rispetto alle altre due stazioni può rientrare nelle generiche incertezze di misura, nella diversa localizzazione o dovuto a effetti locali.

Per capire meglio questo risultato, si sono analizzate le misure stagionali calcolando prima la somma delle precipitazioni di ogni stagione e poi la differenza tra i due strumenti (WXT520 – Pluviometro a bascula).

Non è stata presa in considerazione la stazione di Milano Bicocca ventilata per la scarsità dei dati, pertanto un confronto stagionale non avrebbe avuto senso.

Inoltre la stagione invernale 2015-2016 di Milano Sarpi non rientra nell'analisi per la mancanza dei dati relativi al pluviometro a bascula in questa stazione.



*Figura 11* Grafici stagionali delle differenze tra le misurazioni della WXT520 e del pluviometro a bascula nelle stazioni di Milano Bicocca e Milano Sarpi dal 2015 al 2019.

Nelle stagioni inverno e autunno (*Figura 11*), la differenza delle misure è negativa sia per gli strumenti nella stazione di Bicocca sia per quelli di Sarpi. Questo significa che durante queste due stagioni, che di solito sono caratterizzate da rovesci di debole intensità e costanti nel tempo, il pluviometro a bascula rileva un valore maggiore di precipitazione rispetto alla WXT520.

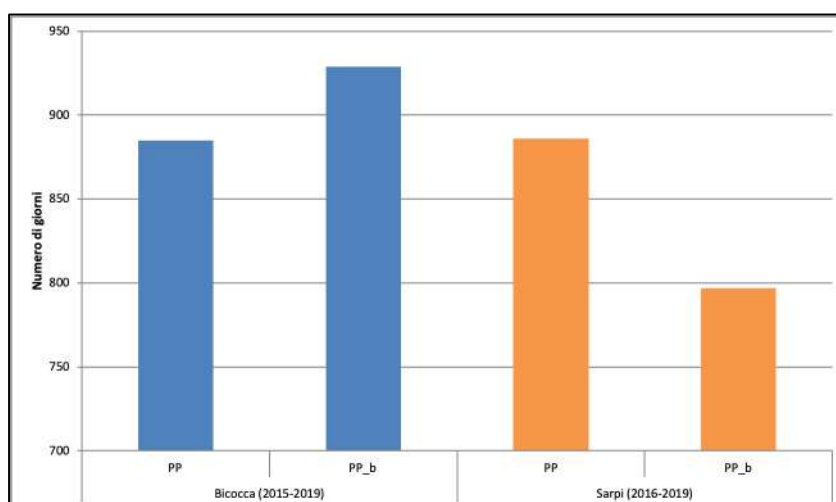
Nelle stagioni primavera ed estate, durante le quali di solito le precipitazioni sono di breve durata ma intense, si possono cogliere delle differenze più marcate: per quanto riguarda l'estate, si può notare sia in Bicocca che in Sarpi un valore positivo come differenza delle

misure tra gli strumenti e ciò significa che la WXT520 ha segnalato una maggiore quantità di precipitazione.

Mentre in primavera, nella stazione di Bicocca, la differenza ha un valore quasi nullo, invece nella stazione di Sarpi la differenza tra le misurazioni è negativa.

In questo grafico è stato messo in evidenza il fatto che nelle stagioni caratterizzate da precipitazioni di lunga durata e di debole intensità, la WXT520 sottostima le misurazioni. Invece durante le stagioni in cui le precipitazioni sono di forte intensità ma brevi, il pluviometro a bascula sottostima le misure.

Per approfondire ulteriormente il risultato ottenuto, è stata fatta la somma del numero di giorni in cui la WXT520 (PP) e il pluviometro a bascula (PP\_b) non rilevano valori, ovvero in assenza di precipitazione.



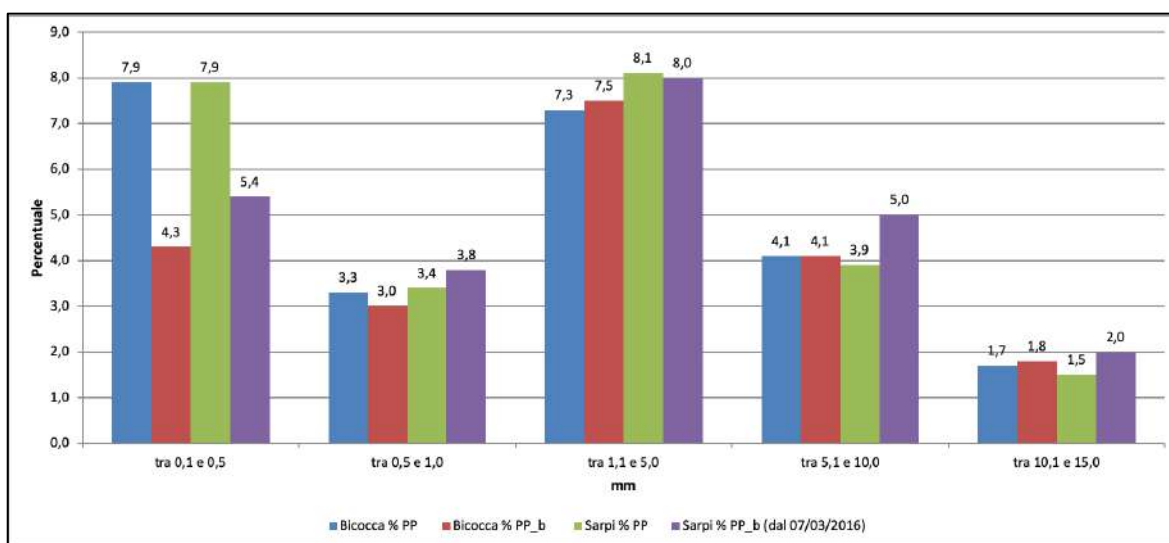
**Figura 12** Numero di giorni della serie presa in esame in cui il pluviometro a bascula (PP\_b) e la WXT520 (PP) non rilevano precipitazioni dal 2015 al 2019.

Per quanto riguarda le WXT520 di entrambe le stazioni (*Figura 12*), i giorni di assenza di precipitazioni sono molto simili, invece i due pluviometri a bascula mostrano un diverso valore l'uno rispetto all'altro. Nel dettaglio, nella stazione di Milano Bicocca il pluviometro a bascula rileva più giorni di assenza di precipitazioni, ovvero il 75% sul totale del numero di giorni della serie presa in esame, rispetto al 71% della WXT520 posizionata sempre in Bicocca. Invece, al contrario, nella stazione di Milano Sarpi la WXT520 misura un numero di giorni senza precipitazioni lievemente maggiore, ovvero il 71% rispetto al 64% del pluviometro a bascula.

Per analizzare il comportamento dei due diversi tipi di strumenti in relazione all'intensità di precipitazione, è stata poi fatta una classificazione individuando diversi intervalli di intensità di precipitazione giornaliera.

La percentuale è stata calcolata dividendo il numero di giorni in cui lo strumento rileva un certo valore, per esempio tra 0,1 e 0,5 mm, per il numero totale di giorni in cui lo stesso strumento segnala un valore qualsiasi che comprende 0 mm, il tutto moltiplicato per 100.

Si è deciso di concentrare l'attenzione su intervalli di intensità che vanno da 0,1 mm a 15,0 mm, per mettere in evidenza le classi in cui le precipitazioni sono deboli.



**Figura 13** Confronto tra la percentuale sul totale di giorni dal 2015 al 2019 in cui gli strumenti misurano un certo valore (anche uguale a 0) e l'intervallo di intensità di precipitazione che va da 0,1 mm a 15,0 mm.

Dalla *Figura 13* si può cogliere il fatto che le classi di intensità di precipitazione più rilevanti sono quelle che corrispondono a valori di precipitazione tra 0,1 e 0,5 mm, 0,5 e 1,0 mm ed infine 1,1 e 5,0 mm.

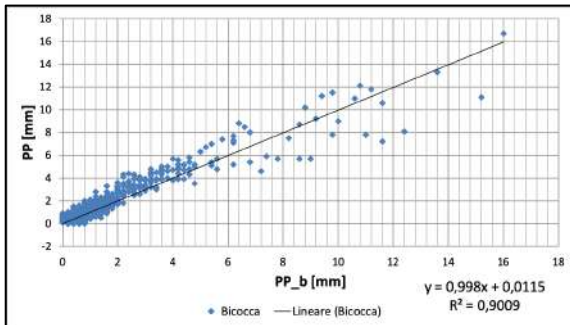
Si può notare che nell'intervallo che va da 0,1 mm e 0,5 mm il valore misurato dalle WXT520 presenti in entrambe le stazioni è lo stesso, ma ci sono delle differenze tra la WXT520 e il pluviometro a bascula collocati nella stessa stazione. La WXT520, infatti, rileva una percentuale maggiore di precipitazioni rispetto al pluviometro a bascula.

Nell'intervallo tra 0,5 mm e 1,0 mm gli strumenti nelle due stazioni hanno un comportamento abbastanza simile, fatta eccezione per la WXT520 che rileva una percentuale lievemente maggiore rispetto al pluviometro a bascula nella stazione di Milano Bicocca, mentre la WXT520 presente in Milano Sarpi si comporta nel modo opposto.

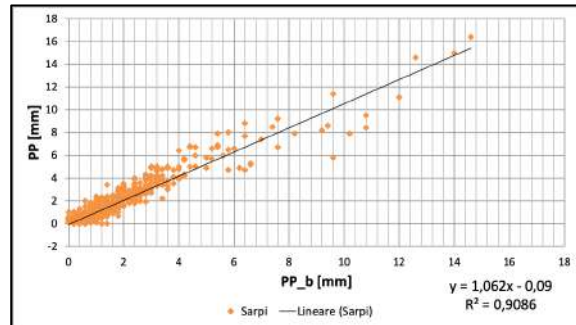
Più aumenta la quantità di precipitazione e più simile diventa il comportamento della WXT520 e della bascula nelle due stazioni.

Al fine di una migliore analisi, si è deciso di concentrarsi sulle correlazioni tra la WXT520 e il pluviometro a bascula escludendo quando entrambi gli strumenti misurano valori uguali a 0 mm contemporaneamente (Appendice A).

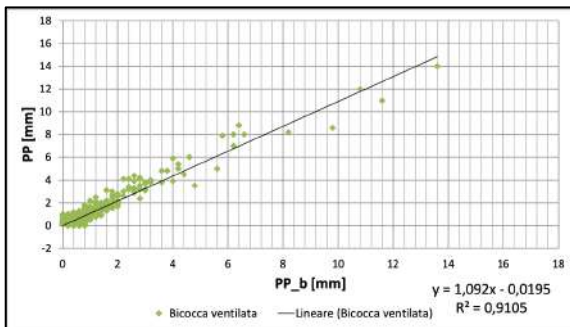
Stazione di Milano Bicocca



Stazione di Milano Sarpi



Stazione di Milano Bicocca ventilata



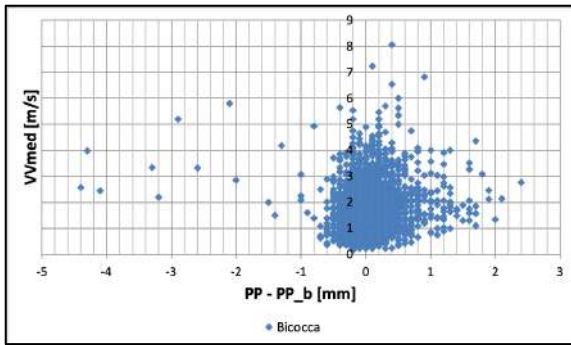
**Figura 14** Confronto tra i valori di precipitazione rilevati dal pluviometro a bascula (PP\_b) e dalla WXT520 (PP) ogni 10 minuti nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata, esclusi i valori uguali a 0 mm rilevati contemporaneamente dagli strumenti.

Nel caso delle stazioni studiate,  $R^2$  assume il valore prossimo a 0,9 (*Figura 14*), quindi si può affermare che la qualità delle tre rette di regressione è buona. Questo significa che i valori rilevati dai due tipi di strumenti non si discostano molto l'uno dall'altro.

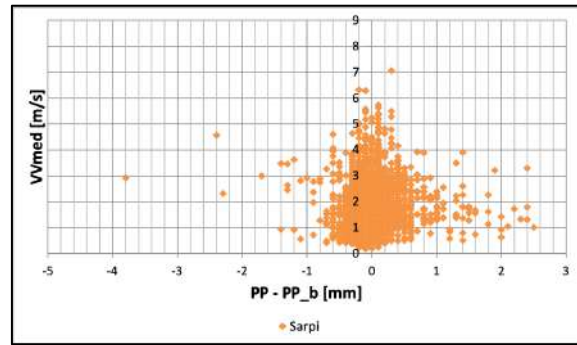
Per entrare ancora di più nel dettaglio, sono state calcolate le differenze ( $PP - PP_b$ ) tra i valori misurati ogni 10 minuti su tutto il periodo preso in esame, escludendo i casi in cui i due pluviometri abbiano rilevato misure uguali a 0 mm nello stesso istante, e sono state messe a confronto con i dati riguardanti l'intensità del vento medio.

Questa analisi è stata fatta per verificare se la presenza di condizioni di vento potesse influenzare il comportamento della WXT520 (PP) diversamente dal pluviometro a bascula ( $PP_b$ ).

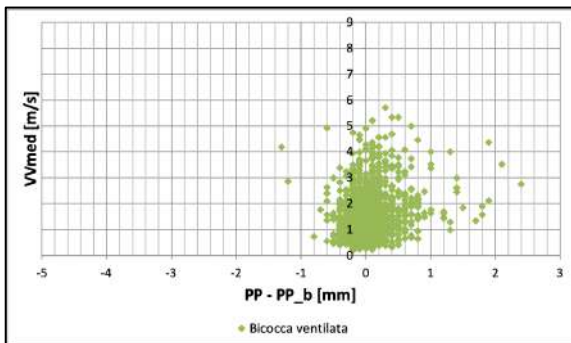
Stazione di Milano Bicocca



Stazione di Milano Sarpi



Stazione di Milano Bicocca ventilata



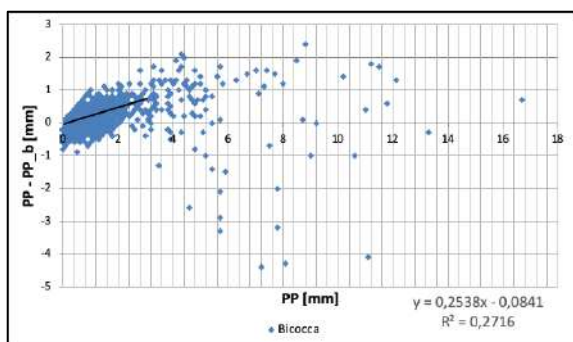
*Figura 15* Confronto tra le differenze delle precipitazioni rilevate, ogni 10 minuti dal 2015 al 2019, dalla WXT520 (PP) e dal pluviometro a bascula (PP\_b) e l'intensità del vento medio nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata.

Dai grafici rappresentati nella *Figura 15* è possibile notare che l'intensità del vento non causa forti differenze tra i due strumenti, infatti la maggior parte dei dati si concentrano nell'intervallo tra -1,0 mm e 1,0 mm.

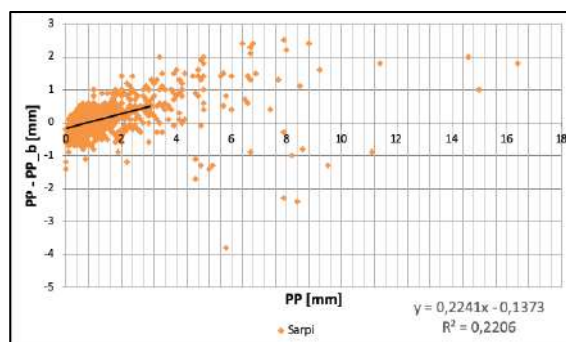
Inoltre si può osservare che è presente una maggiore differenziazione sui valori di differenza positiva in tutte e tre le stazioni.

Per capire se le differenze tra le misure dei due strumenti sono influenzate dall'intensità di precipitazione, è stata fatta un'analisi tra le differenze (PP – PP\_b) utilizzate nel grafico in *Figura 15* e i valori rilevati dalla sola WXT520, che è stata presa come riferimento.

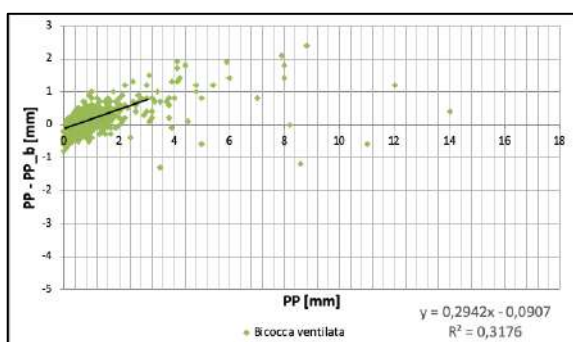
Stazione di Milano Bicocca



Stazione di Milano Sarpi



Stazione di Milano Bicocca ventilata



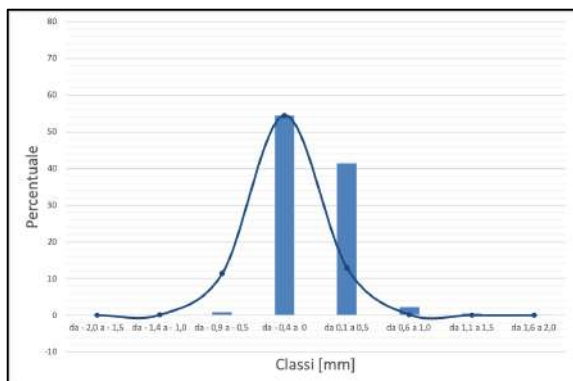
**Figura 16** Confronto tra le differenze tra le precipitazioni rilevate dalla WXT520 (PP) e dal pluviometro a bascula (PP\_b) e i valori misurati dalla WXT520 nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata.

Le differenze tra le misure dei due strumenti sono per lo più concentrate quando le precipitazioni sono deboli, ovvero tra 0 e 2 mm, come si può notare nella *Figura 16*.

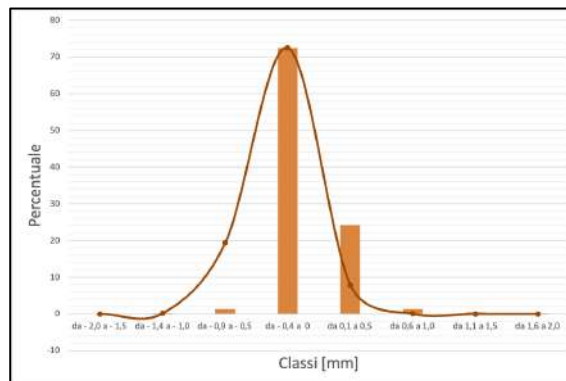
Quando la precipitazione è più intensa, ovvero da 4 mm, è presente una maggiore dispersione dei valori delle differenze e dalla *Figura 16* si può vedere che questi casi sono molto pochi. Tracciando la retta di regressione solo per i valori fino a 3 mm rilevati dalla WXT520, si può notare che il coefficiente di determinazione è basso in tutte e tre le stazioni, ma risulta comunque evidente un trend per cui le WXT520 possono sottostimare le precipitazioni rispetto agli strumenti a bascula per intensità molto basse, mentre per intensità superiori tendono a sovrastimare.

Per comprendere meglio il risultato è stato calcolato il valore percentuale delle differenze. La percentuale è stata calcolata sul totale di dati delle differenze (PP – PP\_b), utilizzate nella *Figura 15* e nella *Figura 16*, tra -2,0 mm e 2,0 mm per focalizzare l'attenzione su questa classe di intensità.

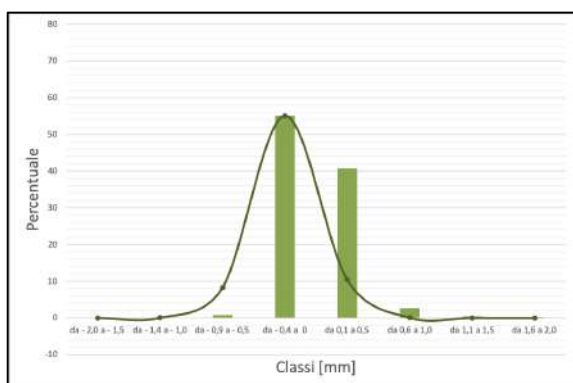
Stazione di Milano Bicocca



Stazione di Milano Sarpi



Stazione di Milano Bicocca ventilata



**Figura 17** Grafici che rappresentano le frequenze dei dati raccolti nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata classificate secondo le differenze tra le precipitazioni rilevate dalla WXT520 e dal pluviometro a bascula. Sono stati sovrapposti i grafici che rappresentano la distribuzione normale delle differenze nelle tre stazioni.

I dati raccolti si concentrano principalmente quando le differenze tra gli strumenti sono piccole e vicine al valore 0 (*Figura 17*).

Infatti, in tutte le stazioni si può notare che nell'intervallo in cui le differenze tra i due strumenti va da  $-0,4$  mm a  $0,5$  mm il numero dei dati raggiunge il massimo valore.

È stata calcolata la distribuzione normale o Gaussiana partendo dalla media ( $\mu$ ) e dalla deviazione standard ( $\sigma$ ), ipotizzando che i valori siano casuali (Appendice B). Quest'ultima ha un valore di  $0,3$  mm in tutte le stazioni, mentre la media varia.

Nella stazione di Bicocca la media delle differenze è  $0,01$  mm. Quindi si può affermare che con una probabilità del 68% (un sigma) la differenza sistematica tra le misure degli strumenti in Bicocca è  $0,01 \pm 0,3$  mm.

Nella stazione di Sarpi la media calcolata è  $-0,06$  mm, per cui sempre con una probabilità del 68% la differenza sistematica è  $-0,06 \pm 0,3$  mm.

Infine, nella stazione di Bicocca ventilata con la stessa percentuale di probabilità delle altre stazioni la differenza sistematica tra le misure dei due strumenti è  $0,02 \pm 0,3$  mm.



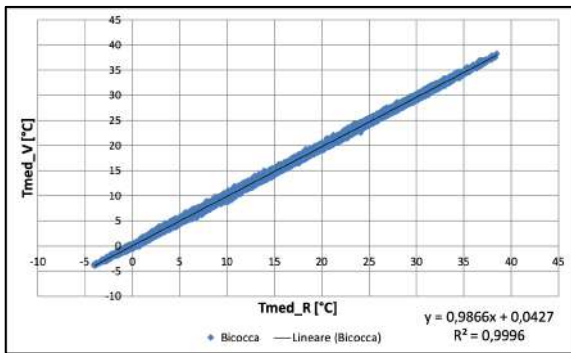
## 4.2 Dati termometrici

È stata effettuata la stessa analisi già eseguita per i dati pluviometrici sui dati riguardanti la temperatura.

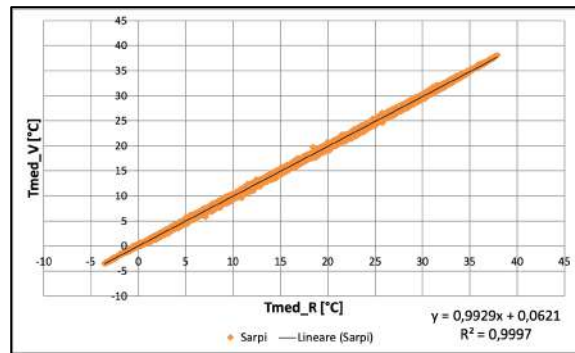
Sono state messe in relazione le misure rilevate ogni 10 minuti, nel periodo dal 2015 al 2019, dal termometro modello 107 (Tmed\_R) e quelle effettuate dal termometro della WXT520 (Tmed\_V) nelle stazioni di Milano Bicocca e Milano Sarpi.

Per quanto riguarda la stazione di Milano Bicocca, come spiegato nel Capitolo 2.1, in essa è presente sia un termometro modello 107 non ventilato sia un termometro ventilato. Il confronto tra WXT520 e il termometro modello 107 riguarderà la stazione di Milano Bicocca, mentre il confronto tra WXT520 e il termometro ventilato riguarderà la stazione di Milano Bicocca ventilata.

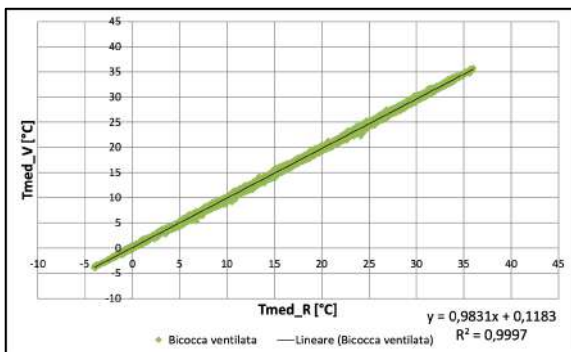
Stazione di Milano Bicocca



Stazione di Milano Sarpi



Stazione di Milano Bicocca ventilata



**Figura 18** Grafici a dispersione che rappresentano il confronto tra le misure rilevate ogni 10 minuti dal termometro modello 107 (Tmed\_R) e quelle del termometro della WXT520 (Tmed\_V) nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata dal 2015 al 2019.

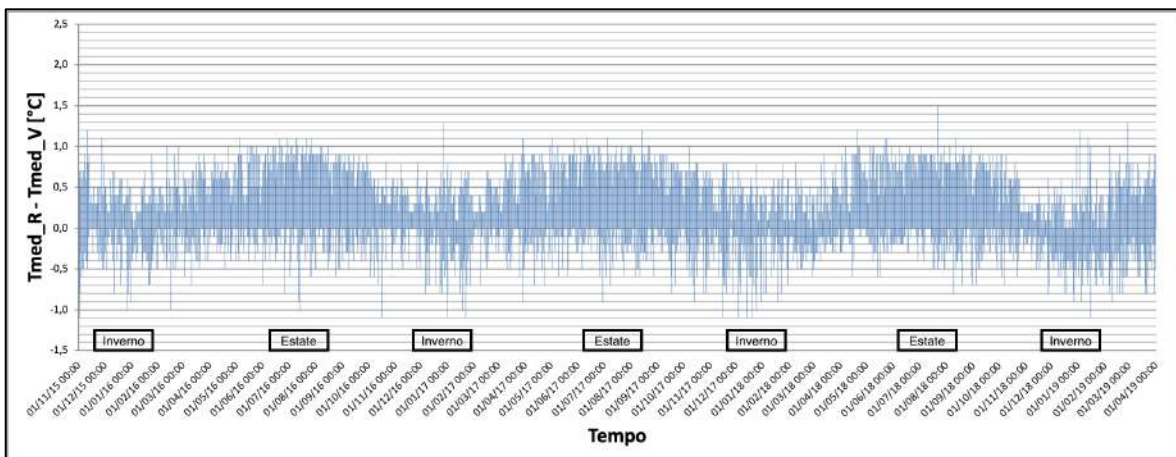
Il valore del coefficiente di determinazione  $R^2$  (Appendice A) per tutte e tre le stazioni è uguale a 0,99, per cui la maggior parte dei valori giacciono sulla retta di regressione (*Figura 18*). Per questo motivo si può affermare che i due tipi di termometri misurano valori molto simili e non ci sono grosse differenze di misurazione.

Inoltre il coefficiente angolare delle tre rette è molto vicino a 1 e questo significa che i valori dei due termometri sono direttamente proporzionali. Un altro valore importante è quello dell'intercetta che è 0,02 per Bicocca, 0,08 per Sarpi e 0,1 per Bicocca ventilata e quindi la retta di regressione passa quasi esattamente dall'origine degli assi.

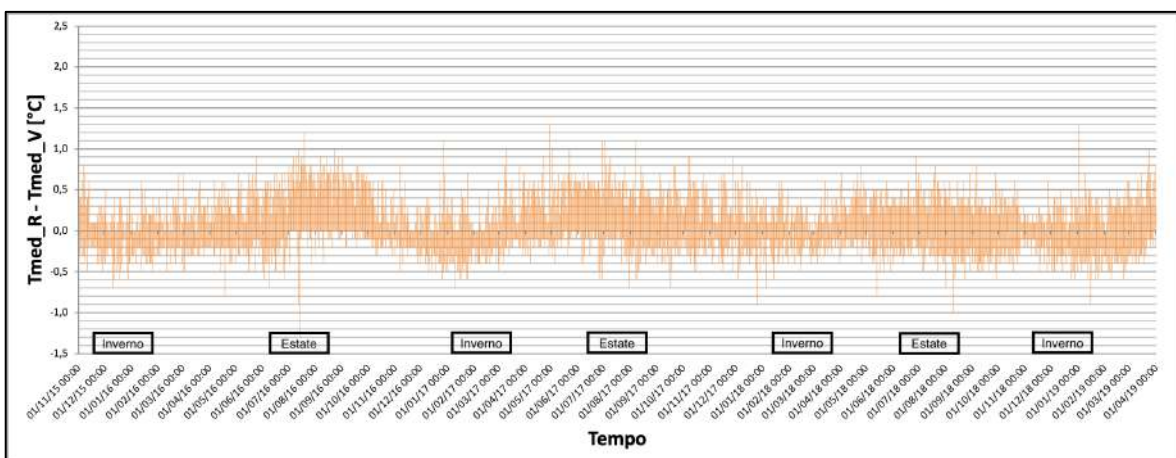
Per quanto riguarda Bicocca ventilata, il termometro della WXT rileva sistematicamente un decimo di grado in più del termometro modello 107.

Tuttavia, per meglio approfondire l'analisi, sono state calcolate le differenze tra i valori del termometro modello 107 e del termometro della WXT520 ( $T_{med\_R} - T_{med\_V}$ ) e sono stati creati dei grafici per mettere in evidenza il comportamento relativo dei due sensori nel tempo.

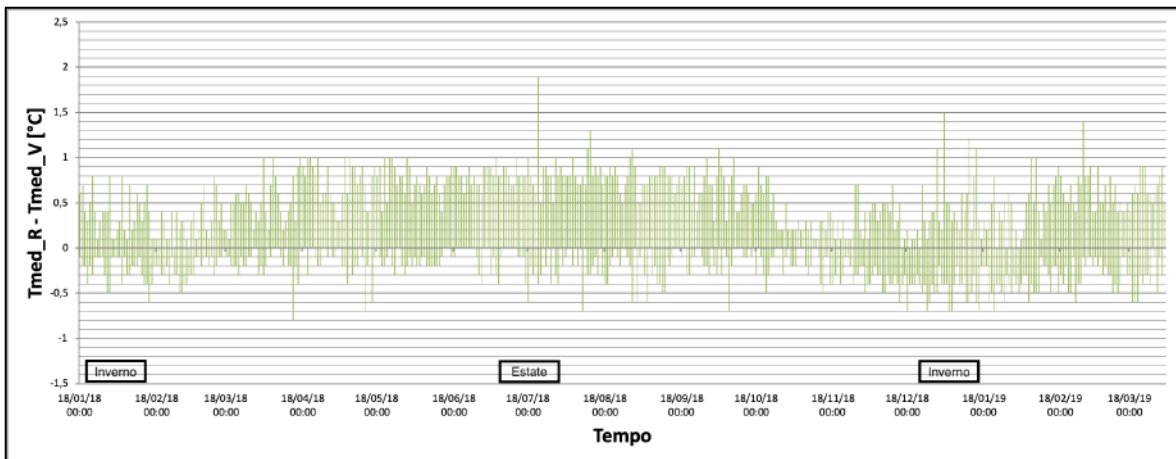
a) Stazione di Milano Bicocca



b) Stazione di Milano Sarpi



c) Stazione di Milano Bicocca ventilata



**Figura 19** Grafici (a, b e c) in cui si mette a confronto i valori delle differenze ricavate dai dati raccolti ogni 10 minuti tra il termometro modello 107 (Tmed\_R) e il termometro della WXT520 (Tmed\_V) e il tempo nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata dal 2015 al 2019.

Nel grafico della stazione di Milano Bicocca (*Figura 19a*) si può notare come la rilevazione della temperatura sia influenzata dalla stagione.

Infatti nel periodo estivo i valori delle differenze sono maggiori e per la maggior parte positivi, quindi significa che in questi casi il termometro modello 107 ha rilevato temperature più alte.

Invece per quanto riguarda i mesi invernali, da novembre a marzo, si possono notare alcuni episodi in cui le differenze sono negative, ma rispetto ai mesi estivi sono più piccole, quindi i due strumenti hanno misurato più o meno lo stesso valore.

Queste osservazioni si possono fare anche per le altre stazioni rappresentate in *Figura 19b* e *19c*.

La dipendenza stagionale delle misurazioni riscontrata dai grafici appena descritti potrebbe essere causata dal sole e quindi dal riscaldamento dello schermo.

Infatti, come già accennato, un altro problema che può causare anomalie nelle misurazioni della temperatura è il cambiamento di colore dello schermo (*Figura 20*), che in origine è bianco, ma poi col tempo si ingiallisce e questo, se non viene rinfrescato, potrebbe riflettersi in una sistematica differenza di rilevazione della temperatura.<sup>8</sup>

Nella *Figura 19*, infatti, è evidente la variazione di colore del rivestimento dello schermo dovuta all'invecchiamento. Per evitare cambiamenti



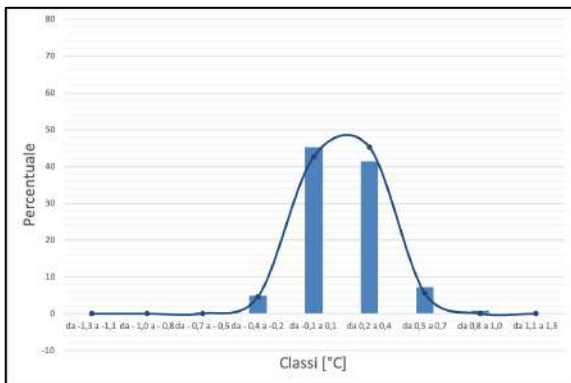
**Figura 20** Fotografia di due WXT520. A sinistra WXT520 dopo 1 anno, a destra WXT520 dopo 3 anni.

significativi nella valutazione della temperatura, ogni anno ogni WXT520 che opera per CN viene sostituita con un'altra WXT520 precedentemente pulita e calibrata, come spiegato nel Capitolo 2. Tuttavia questa ipotesi dev'essere ulteriormente indagata e studiata.

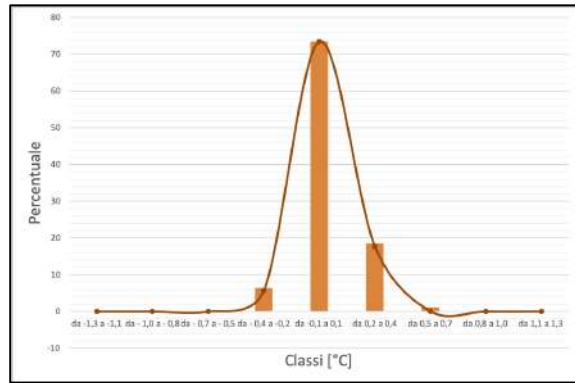
Come fatto precedentemente con i dati delle precipitazioni, per capire se l'intensità della temperatura influenzi la differenza tra le misure dei due termometri, è stata fatta un'analisi tra la percentuale delle differenze tra le misure del termometro modello 107 e del termometro della WXT520 ( $T_{med\_R} - T_{med\_V}$ ) e l'intensità della temperatura.

La percentuale, come per lo studio delle precipitazioni, è stata calcolata sul totale di dati delle differenze tra  $-1,3^{\circ}C$  e  $1,3^{\circ}C$ .

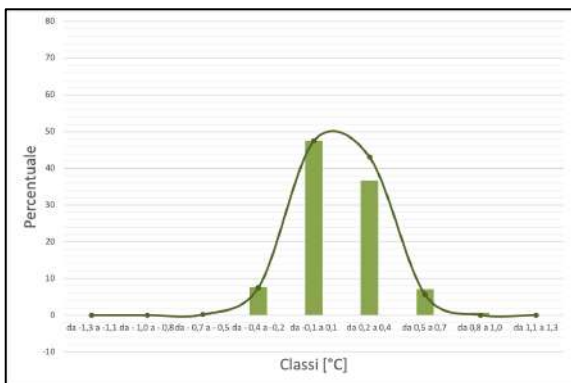
Stazione di Milano Bicocca



Stazione di Milano Sarpi



Stazione di Milano Bicocca ventilata



**Figura 21** Grafici che rappresentano le frequenze dei dati raccolti ogni 10 minuti nelle stazioni di Bicocca, Sarpi e Bicocca ventilata classificate secondo le differenze tra le temperature rilevate dal termometro della WXT520 e dal termometro modello 107 dal 2015 al 2019. Sono stati sovrapposti i grafici che rappresentano la distribuzione normale delle differenze nelle tre stazioni.

Dalle *Figura 21* emerge che nell'intervallo in cui le differenze tra i due termometri va da  $-0,1^{\circ}C$  a  $0,4^{\circ}C$  è presente il maggior numero di dati in tutte e tre le stazioni.

Sono stati costruiti anche dei grafici che raffigurano la distribuzione normale o Gaussiana (Appendice B).

Dal calcolo della media ( $\mu$ ) e della deviazione standard ( $\sigma$ ) si è riscontrato che quest'ultima rimane invariata in tutte le stazioni con un valore di  $0,2^\circ\text{C}$ , mentre la media cambia.

Nella stazione di Bicocca si può affermare che con una probabilità del 68% (un sigma) la differenza sistematica tra i due strumenti è  $0,12 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , mentre nella stazione di Sarpi con la stessa probabilità la differenza sistematica è  $0,04 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Infine, nella stazione di Bicocca ventilata, sempre con una probabilità del 68% la differenza sistematica è  $0,14 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Queste incertezze potrebbero essere causate dal fatto che il termometro ventilato necessita di corrente elettrica per mantenere attiva la ventola e se questa si ferma a causa di rottura, sporcizia, mancanza di elettricità, le misure potrebbero essere caratterizzate da un'incertezza maggiore. Questo risultato richiede tuttavia un'indagine più approfondita.

## 5. Conclusioni

Questo progetto ha riguardato l'analisi di una serie di dati pluviometrici e termometrici rilevati in ambito urbano dal 2015 al 2019 da diversi tipi di strumenti, quali la WXT520, il pluviometro a bascula e il termometro modello 107, che fanno parte della rete di stazioni automatiche specializzata nelle misurazioni in ambienti urbani CN.

Le stazioni che sono state prese in considerazione sono Milano Bicocca e Milano Sarpi, le sole dotate di strumenti ridondati.

I dati che sono stati utilizzati sia per l'analisi delle precipitazioni sia per l'analisi delle temperature sono stati raccolti con una frequenza di 10 minuti e sono circa 180 000 nella stazione di Milano Bicocca e Milano Sarpi e circa 66 000 nella stazione di Milano Bicocca ventilata per quanto riguarda le precipitazioni.

I valori della temperatura analizzati, invece, sono circa 155 000 nelle stazioni di Milano Bicocca e di Milano Sarpi e circa 51 200 per la stazione di Milano Bicocca ventilata.

Come primo risultato nello studio delle precipitazioni è emerso che dalle cumulate su tutto il periodo rilevate dal pluviometro a bascula (PP\_b) e dalla WXT520 (PP) sono presenti delle differenze che sono circa il 2,5 % per quanto Bicocca, mentre sono circa il 5,9 % quelle rilevate dalla WXT520 e dal pluviometro a bascula di Sarpi ed infine in Bicocca ventilata sono circa 1,6 %.

Inoltre un altro risultato dell'analisi ha messo in evidenza che nelle stagioni inverno e autunno, che come noto sono caratterizzate prevalentemente da precipitazioni deboli o moderate e meno variabili nel tempo, la WXT520 sottostima le misure rispetto al pluviometro a bascula. Mentre in estate, in cui i rovesci sono per lo più intensi ma di breve durata perché associati a nubi di tipo convettivo, il pluviometro a bascula sottostima le misurazioni rispetto alla WXT520. In primavera il comportamento degli strumenti nelle due stazioni è diverso: il pluviometro a bascula di Bicocca rileva valori abbastanza simili a quelli della WXT520 affiancata, invece la WXT520 di Sarpi sottostima le misure rispetto al pluviometro a bascula.

Analizzando il comportamento degli strumenti nei giorni di assenza di precipitazione si è visto che le WXT520 presenti in Bicocca e in Sarpi rilevano un valore molto simile, mentre confrontando la WXT520 e il pluviometro a bascula, entrambi collocati in Bicocca, si è potuto notare che il pluviometro a bascula segna più casi di assenza di precipitazione (75%) rispetto alla WXT520 (71%). Mentre nella stazione di Sarpi, la WXT520 rileva un valore percentuale del 70% e il pluviometro a bascula un valore di 64%.

Prendendo in considerazione la serie totale di differenze (WXT520 – Pluviometro a bascula) tra - 2,0 mm e 2,0 mm e calcolando la deviazione standard si è notato che le incertezze sono  $\pm 0,3$  mm in tutte le stazioni.

Dall'analisi si è constatato che le differenze riscontrate tra le misure rilevate dai due tipi di strumenti, seppur poco significative, sono presenti soprattutto quando le precipitazioni sono di debole intensità e che la WXT520 in queste condizioni sottostima le misurazioni. Pertanto si può affermare che nella stazione di Bicocca sono presenti differenze molto piccole (0,01 mm), come nella stazione di Milano Bicocca ventilata (0,02 mm), mentre nella stazione di Sarpi si possono notare differenze di segno opposto (-0,06 mm) che mettono in evidenza prevalentemente come la WXT520 rilevi un valore minore di precipitazione in tutte le stagioni, eccetto l'estate.

Un possibile motivo delle divergenze tra le misure effettuate dal pluviometro a bascula e dalla WXT520 e della presenza di incertezze della misurazione potrebbe essere il fatto che la WXT520 ogni anno viene sostituita con un'altra precedentemente pulita e calibrata, mentre il pluviometro a bascula non viene sottoposto a procedure di taratura così accurate come nel caso della WXT520.

Un altro motivo potrebbe riguardare il diverso meccanismo proprio dei due tipi di strumenti: il pluviometro a bascula è dotato di un meccanismo più semplice e meccanico, che però può andare incontro a problemi di blocco dell'imbuto per sporcizia oppure in caso di neve e questo potrebbe provocare delle incertezze sulle misure. La WXT520 è caratterizzata da un meccanismo digitale più complesso e quindi più frequentemente controllato.

Dall'analisi sui dati termometrici è risultato che i due tipi di termometri non rilevano misure con grosse differenze in quanto, facendo un confronto tra i valori raccolti dal termometro modello 107 (Tmed\_R) e dal termometro della WXT520 (Tmed\_V), si è visto che la retta di regressione costruita ha una qualità ottima, ovvero il valore del coefficiente di determinazione  $R^2$  è di 0,99. Inoltre dall'equazione della retta si può notare che i valori misurati dai due termometri sono direttamente proporzionali e che la retta passa molto vicino all'origine degli assi.

Il motivo di questa buona corrispondenza è il fatto che entrambi i termometri vengono periodicamente tarati e quindi le misurazioni sono più precise.

Nell'analisi sono state quantificate le differenze (Termometro modello 107 – Termometro WXT520) che per Milano Bicocca sono  $0,12^\circ$  C, per Milano Sarpi sono  $0,04^\circ$  C e per Milano Bicocca ventilata sono  $0,14^\circ$  C.

Inoltre è stato riscontrato che calcolando la deviazione standard sul totale di dati delle differenze, l'incertezza è  $0,2^{\circ}$  C in tutte le stazioni.

Un altro risultato che è emerso nello studio dei valori delle differenze tra i due termometri nel tempo è stato il fatto che le misure della temperatura sono influenzate dalla stagione e questo potrebbe essere causato da effetti di soleggiamento con conseguente riscaldamento dello schermo.

Un altro possibile motivo che potrebbe causare differenze nelle misure termometriche potrebbe essere l'invecchiamento e quindi la variazione di colore dello schermo che protegge il termometro, ma in questa analisi tale problema può considerarsi superato grazie al fatto che ogni anno la WXT520 è stata sostituita con un'altra il cui schermo è stato precedentemente riverniciato.

In conclusione si può affermare che lo scopo che ha dato vita a questo progetto è stato raggiunto, ovvero sono state quantificate le differenze sistematiche tra strumenti di tipo diverso posizionati in un ambiente urbano con un'incertezza di  $\pm 0,3$  mm per le precipitazioni e di  $\pm 0,2^{\circ}$  C per le temperature.

L'analisi ha anche evidenziato ulteriori elementi che richiedono successive verifiche, in particolare l'influenza stagionale sui termometri.



## 6. Bibliografia

<sup>1</sup> Frustaci G., Curci S., Pilati S., Lavecchia C., Paganelli C. *The AWS based operational urban network in Milano: achievements and open questions*. Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo – Milano

<sup>2</sup> Christen A., Millis G., Oke T. R., Voogt J. A. *Urban climates*. Gran Bretagna, Cambridge University Press, 2017

<sup>3</sup> *Microclima urbano: impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione*. A cura di Giovanni Bonafè. Area Meteorologia Ambientale-Servizio IdroMeteorologico, ARPA Emilia-Romagna, 2006

<sup>4</sup> Giuliacci, Mario. *Manuale di meteorologia*. Milano, Alpha test, 2010

<sup>5</sup> Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo, <https://www.fondazioneomd.it/>

<sup>6</sup> Frustaci G., Curci S., Lavecchia C., Pilati S., *Improving uncertainty in the urban canopy layer monitoring for climatological services*. 1° Congresso AISAM. Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo – Milano

<sup>7</sup> Vaisala, <https://www.vaisala.com/en>

<sup>8</sup> G. Lopardo, F. Bertiglia, S. Curci, G. Roggero e A. Merlone. *Comparative analysis of the influence of solar radiation screen ageing on temperature measurements by means of weather stations*. International journal of climatology, Int. J. Climatol. (2013).

<sup>9</sup> Instruction manual: Model 107 Temperature Probe. Campbell Scientific, Inc.

<sup>10</sup> Holl P. *Elementi di statistica*. Bologna, il Mulino, 1990

## 7. Appendice A

### Retta di regressione e coefficiente di determinazione $R^2$

Si sono individuate le equazioni delle rette dei tre grafici della *Figura 14a, b e c* e della *Figura 17a, b e c*, che possono essere scritte in forma generale come:

$$y = ax + b$$

Tale retta viene definita retta di regressione bivariata di  $y$  su  $x$ . Essa permette di approfondire le relazioni tra  $x$  e  $y$ , ovvero tra i valori delle differenze PP-PP\_b e l'intensità del vento per quanto riguarda la *Figura 14* e tra i valori del termometro ridondato (Tmed\_R) e il termometro della WXT520 (Tmed\_V) nella *Figura 17*.

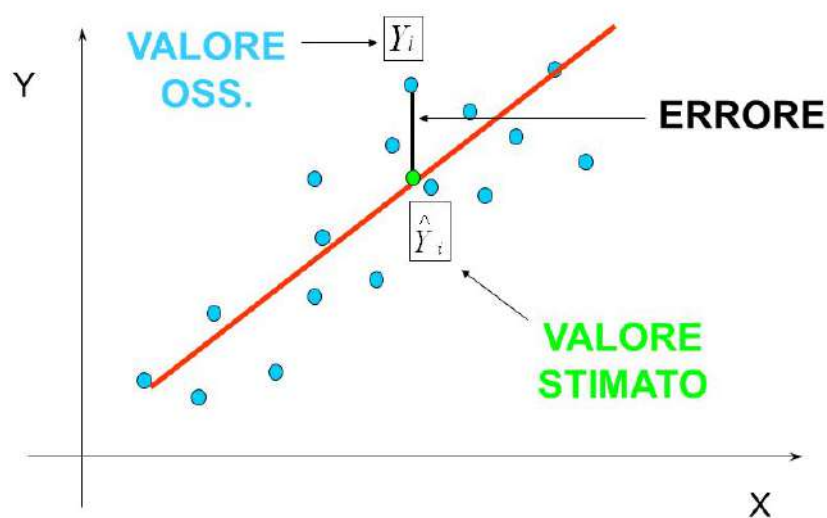
Per individuare le equazioni delle rette di regressione è stato utilizzato il metodo dei minimi quadrati che permette di scegliere quella retta per la quale i valori di  $a$  e  $b$  sono tali da rendere la quantità della somma dei quadrati dei residui più piccola possibile.

I coefficienti  $a$  e  $b$  definiscono la relazione di regressione tra  $x$  e  $y$ , ovvero tra i valori della WXT520 e quelli misurati dal pluviometro a bascula.

Il coefficiente  $a$  indica la pendenza ed esprime l'effetto su  $y$  di una unità di variazione di  $x$ . Il segno indica il verso dell'inclinazione.

Il coefficiente  $b$  è l'intercetta e indica il valore di  $y$  quando  $x = 0$ , rappresenta quindi il punto in cui la retta di regressione incontra l'asse verticale assumendo come origine degli assi  $x = 0$  e  $y = 0$ . La funzione principale dell'intercetta è quella di fissare la posizione della retta.

Il valore  $R^2$ , chiamato coefficiente di determinazione, serve a misurare la bontà di adattamento del modello di regressione ai dati che si stanno studiando e a capire in quale misura la variabile indipendente è in grado di spiegare la variabilità della dipendente nei dati analizzati.<sup>10</sup>



*Figura 22* Esempio di retta di regressione, in particolare i valori  $y_i$  e  $\hat{y}_i$

Il coefficiente di determinazione è dato dal rapporto tra due somme di quadrati:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

dove RSS è la somma dei quadrati dei residui e TSS è la somma totale dei quadrati.

La somma dei quadrati dei residui è data da:

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

in cui  $y_i$  è il valore sperimentale dell' $i$ -esima risposta e  $\hat{y}_i$  è il valore stimato mediante la retta, come si vede nella *Figura 22*.

La somma totale dei quadrati invece è data da:

$$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

in cui  $y_i$  è il segnale misurato e  $\bar{y}$  è la media della stessa variabile.

Il coefficiente di determinazione  $R^2$  può assumere valori compresi tra 0 e 1. Quando  $R^2$  è prossimo a 0 significa che la variabile indipendente  $x$  non è in grado di spiegare il comportamento della variabile dipendente  $y$ . Al contrario, quando  $R^2$  è vicino a 1, la maggior parte dei punti giacciono sulla retta di regressione, ovvero la variabile indipendente  $x$  è in grado di spiegare il comportamento della variabile dipendente  $y$ .

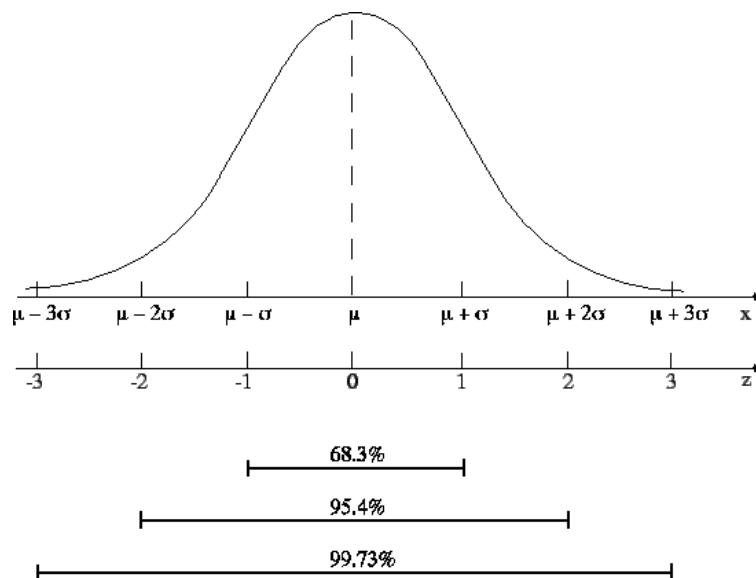
Nei minimi quadrati ordinari i coefficienti di regressione del modello sono calcolati in modo da rendere minima la somma dei quadrati dei residui (RSS) tra il valore sperimentale dell' $i$ -esima risposta ed il valore stimato mediante il modello stesso (la retta del grafico).

## 8. Appendice B

### La distribuzione normale o Gaussiana e la deviazione standard

Un modo per presentare i dati di una analisi è quello di costruire una curva a campana, detta anche curva Gaussiana, che rappresenta la distribuzione di dati casuali simmetrica rispetto a un valore medio.

La distribuzione Gaussiana o distribuzione normale è una distribuzione di probabilità di variabili casuali continue che approssima la distribuzione di errori commessi nel misurare ripetutamente una stessa grandezza.



*Figura 23* Esempio di distribuzione Gaussiana con media ( $\mu$ ) e deviazione standard ( $\sigma$ ).

La distribuzione normale è caratterizzata dalla seguente funzione di densità di probabilità:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

in cui  $\sigma$  indica la deviazione standard e  $\mu$  è la media, come si può notare nella *Figura 23*.

Questi due parametri definiscono rispettivamente la posizione e l'ampiezza della curva.

La media ( $\mu$ ) si calcola con la seguente formula:

$$\mu = \frac{\sum x}{N}$$

dove  $x$  è il valore di ogni misurazione e  $N$  è la somma delle misurazioni.

La deviazione standard ( $\sigma$ ) indica la dispersione dei valori attorno alla media ed è data da:<sup>10</sup>

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \mu)^2}{N}}$$

## 9. Ringraziamenti

Mi piacerebbe spendere due parole per ringraziare tutti coloro che mi hanno sostenuta e incoraggiata durante il mio percorso.

Vorrei ringraziare tutte le persone che ho avuto il piacere di incontrare durante lo stage presso la Fondazione OMD perché mi hanno accolta con grande premura e disponibilità. In particolare un ringraziamento speciale al mio Correlatore Giuseppe Frustaci, che mi ha aiutata moltissimo sia durante lo svolgimento dello stage sia per la stesura della tesi, la sua incredibile disponibilità e i suoi consigli sono stati preziosissimi.

Vorrei ringraziare inoltre il prof. Maggi, Relatore di questa tesi, per tutto l'aiuto e la disponibilità che mi ha rivolto per la stesura e la preparazione di questo lavoro.

Un grande ringraziamento va ai miei genitori, senza la loro forza e il loro supporto non ce l'avrei mai fatta! E grazie di cuore anche a mia sorella Alice, la mia roccia, a cui auguro con tutta me stessa che possa raggiungere tutti i suoi obiettivi nella vita.

Grazie anche ai miei parenti più cari che mi sono stati vicino per tutto il mio percorso, grazie di cuore.

Per ultimi, ma di sicuro non meno importanti, vorrei fare un enorme ringraziamento ai miei amici più cari, sia a quelli storici che a quelli conosciuti durante gli ultimi anni, ci siamo sempre sostenuti a vicenda nei momenti belli e brutti, mi avete dato un aiuto immenso.

È un piacere condividere con tutti voi questo giorno speciale, grazie!