

DETERMINAZIONE DELL'EFFETTO "ISOLA DI CALORE URBANA" IN UNA CITTÀ ALPINA MEDIANTE UTILIZZO DI RETI DI SENSORI A BASSO COSTO

Chiara Lora¹, Massimiliano de Franceschi¹, Marco Sitta¹, Dino Zardi¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Trento – Trento (IT)
e-mail: Dino.Zardi@unitn.it

Parole chiave: atmosfera, strato limite, isola di calore urbana, interazione suolo-atmosfera, inquinamento.

SOMMARIO

La misura della temperatura dell'aria al suolo è una delle procedure di base del monitoraggio meteorologico convenzionale. In molte condizioni meteorologiche complesse la temperatura atmosferica presenta significative variazioni spaziali, che si possono adeguatamente risolvere solo mediante misure puntuali distribuite. In passato tale obiettivo poteva essere raggiunto solo nell'ambito di campagne di misura mirate mediante l'utilizzo di strumentazione ad hoc. Più recentemente si sono sviluppati datalogger di temperatura e umidità relativa di nuova generazione, caratterizzati da piccole dimensioni e poco costosi, e tuttavia dotati di buona accuratezza in un ampio intervallo di misura. Ciò permette di utilizzarne un gran numero per osservare in dettaglio il campo di temperatura in aree di dimensioni anche ragguardevoli, quali possono essere quelle di aree urbane. Nel presente lavoro si presentano i risultati di una campagna di misure condotta nella Valle dell'Adige, nell'area della città di Trento, dal 3 al 17 Novembre 2005 mediante la collocazione di cinque sensori in posizioni rappresentative dell'area. Tre datalogger sono stati posizionati nel fondovalle all'interno dell'area urbana mentre altri due sui pendii ad est ed ovest della Valle dell'Adige. Tali misure si sono aggiunte ai dati registrati nello stesso periodo da quattro stazioni meteorologiche presenti in città e nelle immediate vicinanze.

1 INTRODUZIONE

Una particolarità climatica dell'ambiente urbano è la frequente presenza di un'anomalia di temperatura che prende il nome di "isola di calore urbana" ("Urban Heat Island": Geiger, 1961): una città presenta spesso valori di temperatura di qualche grado superiori rispetto all'ambiente circostante, e questa differenza può essere molto marcata, specialmente nella stagione invernale, in presenza di condizioni di alta pressione e calma di vento. Nel ciclo diurno la differenza è particolarmente apprezzabile a partire da qualche ora dopo il tramonto, in quanto l'ambiente urbano comincia a raffreddarsi con notevole ritardo, rispetto a quello rurale circostante, e più lentamente, a causa del calore accumulato principalmente dagli edifici.

Le possibili cause che portano alla formazione dell'isola di calore sono state investigate da Oke (1987) e più recentemente da Christen & Vogt (2004), e possono essere riassunte nei seguenti processi:

- raffreddamento radiativo minore a causa della riduzione dello fattore di vista del cielo (*sky view factor*) causato dalla presenza di edifici elevati;
- aumento dell'assorbimento della radiazione solare a causa di una differente *albedo*, unito a riflessioni multiple nei canyon urbani;
- grande accumulo diurno di calore negli edifici e successiva cessione notturna;
- aumento del rapporto di Bowen (*Bowen Ratio*, B_0) fra flusso di calore latente e sensibile, a causa della scarsa presenza di vegetazione e dell'elevata impermeabilità dei materiali;
- immissione diretta o indiretta di calore nei canyon urbani;
- riduzione del mescolamento atmosferico a causa della scarsa ventilazione provocata dalla presenza di edifici alti che aumentano la scabrezza.

I fenomeni che generano queste variazioni nella distribuzione orizzontale del campo di temperatura producono anche modificazioni della struttura verticale dello Strato Limite Atmosferico (SLA), fenomeno questo di particolare interesse in un contesto ad orografia complessa quale quello della città di Trento qui esaminato.

2 LA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Negli ultimi anni i progressi nel campo delle componenti elettroniche e della loro miniaturizzazione hanno permesso di produrre sistemi integrati per la memorizzazione di misure di temperatura (*datalogger*) di dimensioni e costi sempre più contenuti. In particolar modo possono beneficiare grandemente di questa tecnologia gli studi sui fenomeni atmosferici di micro-/meso-scala (*Whiteman et al., 2000*).

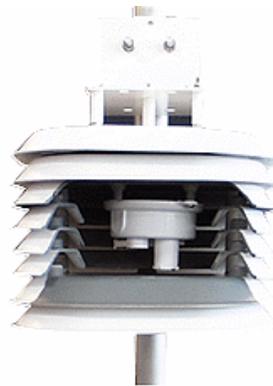


Figura 1: Immagine del datalogger HOBO H8 Pro RH/Temp (Onset Inc.) all'interno dello schermo protettivo.

Gli strumenti utilizzati per il presente lavoro sono degli Onset Inc. Mod. HOBO H8 PRO, costituiti da un guscio esterno cilindrico in materiale plastico (dimensioni 81 x 51 mm, peso di 104 g) contenente i sensori di temperatura (termistore) e umidità relativa (igrocapacitivo) a contatto con l'esterno (Fig. 1).

I sensori presentano le seguenti caratteristiche:

- risoluzione della temperatura: 8 o 12 bit (standard e alta risoluzione);
- batteria di durata di 3 anni e memoria non volatile;
- intervallo misura temperatura: - 30° a 50°C ;
- accuratezza della temperatura: $\pm 0.2^\circ$ a 21°C in alta risoluzione; $\pm 0.41^\circ$ C in risoluzione normale;
- risoluzione variabile, $< 0.1^\circ$ C nell'intervallo 0° - 40°C;
- tempo di risposta sensore temperatura interna: < 35 min (con RH a 90%);
- accuratezza delle misure di tempo: ± 1 min per settimana a 20°C;
- intervallo misura RH: 0% a 100% RH;
- accuratezza RH: $\pm 3\%$ nell'intervallo di temperatura 0° - 50°C; $\pm 4\%$ RH in ambienti in condensazione;
- tempo di risposta RH: 5 min fino al 90% (indipendentemente dalla temperatura);
- deriva del sensore RH: 1% ogni anno.

L'intervallo di campionamento può esser impostato da un minimo di 0.5 s a un massimo di 9 ore: la misura è "istantanea" e non è prevista la possibilità di calcolare on-line valori medi e deviazioni standard in un certo intervallo di tempo. I test condotti prima dell'avvio della campagna di misure e descritti di seguito hanno permesso di stabilire come intervallo di campionamento adeguato agli scopi del presente studio 2 minuti.

2.1 Test dei sensori

Per ottenere una caratterizzazione iniziale del loro funzionamento i sensori sono stati posizionati in un ambiente interno alla struttura della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Trento, in cui la temperatura variava lentamente, mantenendosi sempre compresa tra 20° e 24 °C. Si sono disposti i sensori a distanza molto ravvicinata, in modo da "indagare" lo stesso volume d'aria, e lontani da fonti dirette di calore e dalla radiazione solare diretta, per ridurre al minimo le possibili differenze di temperatura e umidità relativa.

Dal confronto delle temperature raccolte in modalità alta precisione si osserva che tutti i sensori reagiscono concordemente anche a piccole variazioni di temperatura. Si osserva inoltre che le variazioni del misurando rispetto al valore medio di tutti i sensori (assunto come rappresentativo del valore "vero") sono ben confrontabili con l'accuratezza del sensore (entro $\pm 0.2^\circ\text{C}$). In aggiunta, dal confronto degli errori relativi percentuali delle temperature (Fig. 2) si può osservare che l'errore massimo è di -1.2% , che corrisponde a -0.27°C : tenuto conto che l'accuratezza è di $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (a tali temperature) si può ritenere che i termometri presentino ottime caratteristiche di accuratezza.

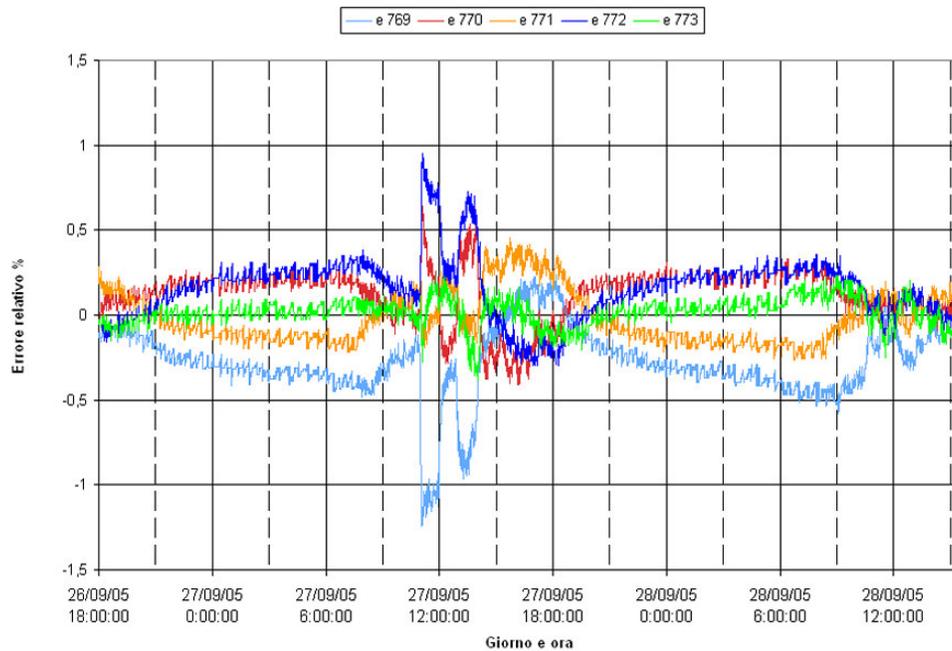


Figura 2: Andamento degli errori relativi percentuali per il test condotto all'interno della Facoltà di Ingegneria.

I sensori sono poi stati posizionati all'esterno, protetti da schermi per la radiazione solare, su di un terrazzino al quarto piano dell'edificio della Facoltà d'Ingegneria (lato Ovest) ad un'altezza di circa 1.80 m dal pavimento. Anche in questo caso i risultati sono stati molto positivi, come testimoniato dall'andamento nel tempo dei 5 segnali di temperatura registrati dai sensori (Fig. 3): le discrepanze che si evidenziano in corrispondenza delle temperature massime nei giorni 8 e 9 Ottobre sono imputabili alla diversa successione temporale con cui i sensori vengono investiti dalla radiazione solare diretta. Se si eccettuano queste fasi, il calcolo dell'errore percentuale relativo al valore medio mostra come esso si attesti su valori pari a $\pm 1\%$, comunque sempre inferiori al 2%, confermando quindi la possibilità di proseguire con l'indagine facendo affidamento su tali sensori.

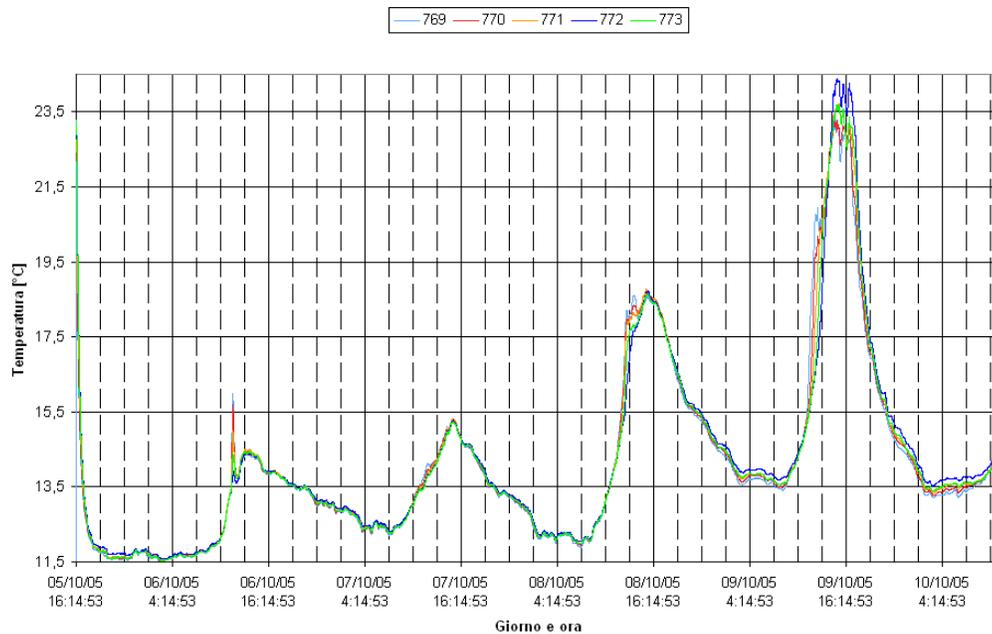


Figura 3: Andamento delle temperature dell'aria per il test condotto presso la Facoltà di Ingegneria utilizzando lo schermo di protezione dalla radiazione solare diretta.

3 LA CAMPAGNA DI MISURE

Le misure condotte nel periodo 3–17 Novembre 2005 avevano lo scopo di determinare la struttura termica orizzontale e verticale della Val d'Adige nell'area della città di Trento, delle zone agricole circostanti e sui versanti della valle stessa. L'interesse era rivolto, in particolar modo, ad osservare le differenze che intercorrono tra le temperature misurate nei diversi siti durante l'intero ciclo giornaliero e in particolare nei due casi opposti di giorni con cielo sereno o con cielo coperto. Inoltre si volevano evidenziare la presenza e la dinamica dell'inversione termica all'interno della valle e dell'isola di calore urbano che si presenta nell'area della città di Trento.

3.1 Topografia e posizione degli strumenti

La Val d'Adige si sviluppa lungo la direzione Sud-Nord: è delimitata a Sud dalla Pianura Padana, prosegue verso Nord con la Valle Lagarina e Trento, quindi con la Pianura Rotaliana e la Bassa Atesina fino a Bolzano. La città di Trento si posiziona a circa 120 km dall'inizio della valle e i rilievi che qui delimitano la conca sono: ad Ovest il Monte Bondone (1537 m) e a Est la Marzola (1738 m).

I sensori sono stati disposti lungo due direzioni: quella Nord-Sud sul fondovalle su una distanza di circa 2 km, e quella Est-Ovest, sulle pareti della Valle, su una distanza di circa 3 km (Fig. 4). Tali misure sono state integrate con i dati delle stazioni meteorologiche di:

- Molino Vittoria, gestita dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Trento;
- Trento Sud, dell'Istituto Agrario di San Michele all'Adige;
- Trento Nord e Trento Laste, dell'Ufficio Previsioni e Organizzazione della Provincia Autonoma di Trento.

In particolare il posizionamento dei sensori era il seguente:

- sensore 769 presso la Facoltà di Ingegneria a Mesiano, frazione di Trento che sale lungo il pendio che delimita ad Est la Valle; fissato al parapetto di un terrazzo al terzo piano, verso Nord;
- sensore 770 in centro città, in un cortile interno della Facoltà di Lettere vicino a Piazza Fiera; fissato al parapetto di un terrazzo sporgente dal tetto dell'edificio principale all'altezza di circa 15 m dal suolo;
- sensore 771 in centro città su un edificio in via Marsala, fissato ad un parapetto al terzo piano, esposto a Nord-Ovest;
- sensore 772 presso il Centro Congressi Panorama di Sargagna, frazione di Trento, lungo il pendio che delimita ad Ovest la Valle; fissato al parapetto di un grande terrazzo che dall'edificio si sporge verso la valle, esposto a sud-est;
- sensore 773 in centro città su un edificio in via della Cervara, fissato al parapetto di un terrazzo al terzo piano, esposto a Ovest.

Le località di Sargagna e Mesiano sono poste sui versanti della Valle dell'Adige, ed in particolare Sargagna si trova sul versante Ovest a circa 600 m s. l. m., mentre Mesiano si trova sul versante Est a circa 300 m s. l. m. . Gli altri punti posti in città sono ad una altezza media di circa 190 m s.l.m.m..

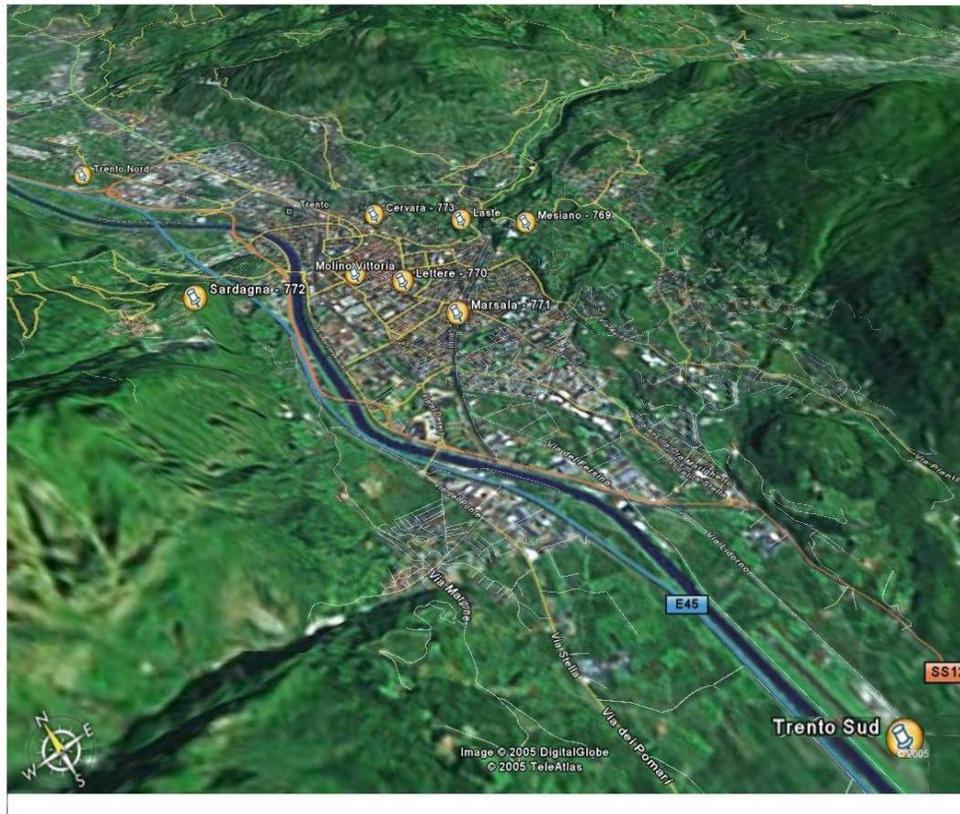


Figura 4: Vista prospettica della Valle dell'Adige nella zona della città di Trento. Sono indicate le località, il numero di serie dei sensori e le stazioni meteorologiche utilizzate nel presente studio.

3.2 Considerazioni preliminari all'analisi dei dati

È bene premettere che la campagna di misure, accanto alla peculiarità dell'area investigata, presenta diverse particolarità, sia dal punto di vista del posizionamento dei sensori e delle loro caratteristiche locali, sia per quanto riguarda il confronto con le stazioni meteorologiche.

I sensori sono stati posizionati in modo da minimizzare eventuali effetti microclimatici, cercando luoghi abbastanza lontani da fonti dirette di calore (come ad esempio scarichi di autovetture o riscaldamento domestico), possibilmente protetti dalla radiazione solare diretta e da particolari correnti locali. Per facilitarne l'installazione si sono scelti luoghi facilmente raggiungibili (come i terrazzi), preferibilmente ad una altezza di circa 10 m da terra. Quanto alla rappresentatività delle misure, l'analisi *a posteriori* mostra che le temperature rilevate dai sensori posti in città mostrano sempre andamenti molto simili e gli scostamenti massimi durante la notte, cioè quando scompare l'influsso diretto del sole, sono minori di 0.5 °C. Per quanto riguarda i due sensori posti lungo i versanti, le caratteristiche delle superfici circostanti sono molto diverse dalle precedenti: è dominante lo strato limite del pendio, che presenta inoltre una copertura fortemente vegetata. Per ottenere una più accurata rappresentazione dell'andamento "pseudovericale" della temperatura nella valle sarebbe necessario un maggior numero di sensori sparsi sul territorio. Nel lavoro di *Whiteman et al. 2004* vengono riportate le misure ottenute da tre linee di datalogger disposte sui lati di un bacino, in direzione Nord-Ovest, Sud-Est, Sud-Ovest, per un totale di 38 sensori. Per questo è stato essenziale integrare i dati dei cinque sensori con quelli provenienti dalle stazioni meteorologiche fisse nella Valle, per avere più punti di misura e poter così osservare anche zone rurali nel fondovalle.

I dati provenienti dalle stazioni meteorologiche presentano diversi intervalli di registrazione della misura (Molino Vittoria 10 min, Trento Laste a 15 min, Trento Nord e Trento Sud a 1 h), mentre i datalogger hanno raccolto dati ad intervalli 2 min. Quindi per poter effettuare un corretto confronto delle misure di temperatura, senza incappare in errori di sfasamento delle misure, è conveniente effettuare una media oraria dei dati registrati dagli HOBO. Pur essendo una approssimazione dei dati originali, in alcuni casi risulta utile perché facilita l'analisi dei dati dei sensori. Ad esempio per il sensore n. 772 posto a Sardagna i valori presentavano piccole oscillazioni molto frequenti, oltre all'oscillazione giornaliera, molto probabilmente dovute alla particolare posizione del sensore. Calcolandone la media si ottiene una attenuazione delle oscillazioni e ciò facilita il confronto con le altre temperature.

La stazione meteorologica di Trento Laste è posta sul versante ad est della valle, circa alla stessa altezza di Mesiano. Quindi ci si attende che l'andamento delle temperature del sensore n. 769 a Mesiano sia molto simile a quello di Trento Laste, infatti, escludendo le differenze legate prettamente alle caratteristiche locali della posizione del sensore, le due posizioni risentono degli stessi influssi dovuti alla Valle sottostante, all'esposizione ad Ovest e alla radiazione solare. La stazione meteorologica del Molino Vittoria è posta sopra la torre dell'edificio omonimo nel centro di Trento, e si innalza maggiormente rispetto alle coperture degli edifici circostanti. Data la distanza da fonti dirette di calore, superfici riflettenti e da pareti che influiscono sul campo di moto si può presupporre di osservare le caratteristiche dell'aria influenzata dagli effetti della città, ma non da effetti locali che possono nascere all'interno dei canyon urbani.

3.3 Condizioni sinottiche durante la campagna

Le condizioni meteorologiche sinottiche del periodo della campagna di misure sono state inizialmente variabili. Nei giorni 5, 6 e 7 Novembre si sono avute condizioni di tempo perturbato con deboli piogge, finché il pomeriggio del 7 e poi nella giornata dell'8 la zona di studio è interessata da una corrente anticiclonica che ha riportato cielo sereno. Nei giorni seguenti fino al 17 rimane stabile l'alta pressione.

Il giorno 5 Novembre ad esempio la radiazione globale misurata al Molino Vittoria è stata al massimo di 160 W m⁻², il 6 Novembre è scesa a 58 W m⁻². L'umidità relativa dell'aria è stata sempre molto elevata: mai inferiore a 85%. Mentre, per quanto riguarda la pioggia, durante la notte tra 5 e 6 Novembre sono state rilevate altezze di pioggia massime di 0.6 mm, per un totale 10 mm in sei ore; e piogge sporadiche durante il giorno 6 Novembre. In Figura 3 sono riportate le piogge registrate nel mese di Novembre presso la stazione di Trento Sud. Dal 7 al 17 Novembre i dati delle stazioni meteorologiche indicano giorni con

tempo sereno, con una radiazione globale misurata al Molino Vittoria di circa 300-400 W m⁻².

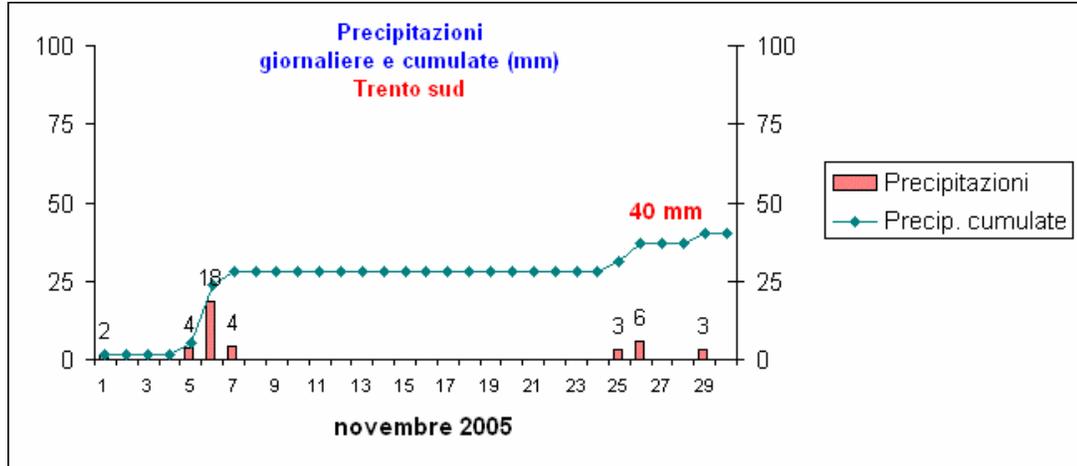


Figura 5: Precipitazioni giornaliere e cumulate rilevate dalla stazione di Trento Sud nel mese di Novembre.

Dal grafico della direzione dei venti di Molino Vittoria si nota una prevalenza del vento proveniente da Nord, durante la seconda settimana della campagna e nel pomeriggio una inversione di direzione (Fig. 6 e 7). Si può quindi ritenere presente una debole brezza di monte e di valle. Questi, infatti, sono venti di bel tempo che si presentano nelle valli dalla primavera fino all'autunno, lungo l'asse principale della valle e spirano con un marcato ritmo giornaliero. Con cielo coperto e durante l'inverno la radiazione solare che giunge al suolo è troppo debole per riuscire a creare le differenze termiche necessarie per avviare questo processo. Anche venti sinottici intensi (come ad es. il Föhn) possono impedire la formazione delle brezze, nonostante condizioni di bel tempo.

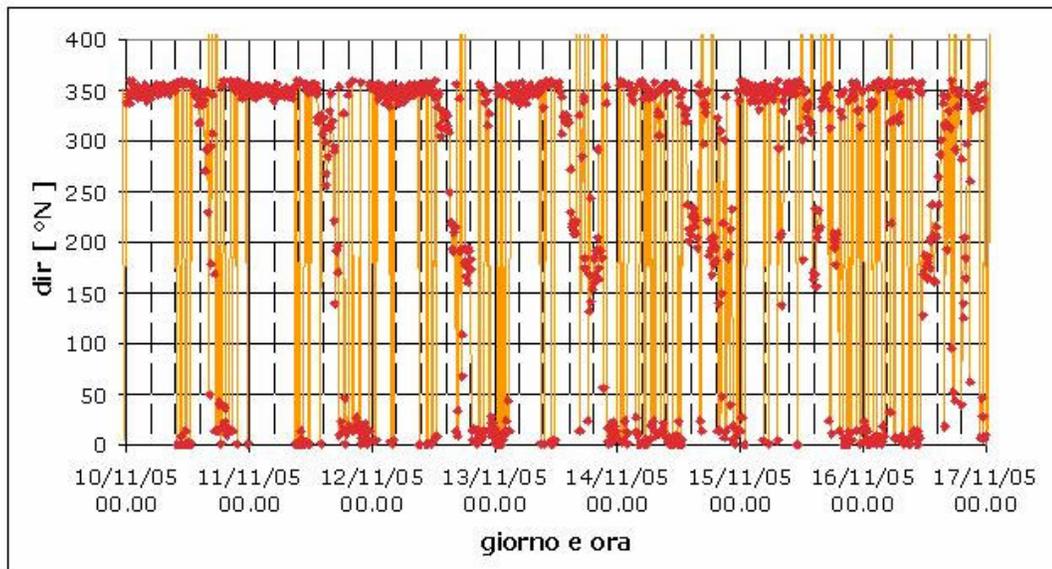


Figura 6: Grafico direzione del vento dal 10 al 17 Novembre, rilevato da stazione Meteorologica di Molino Vittoria. Prevalenza di vento proveniente da Nord. I valori superiori a 360°N stanno ad indicare condizioni di direzione non valida o calma di vento.

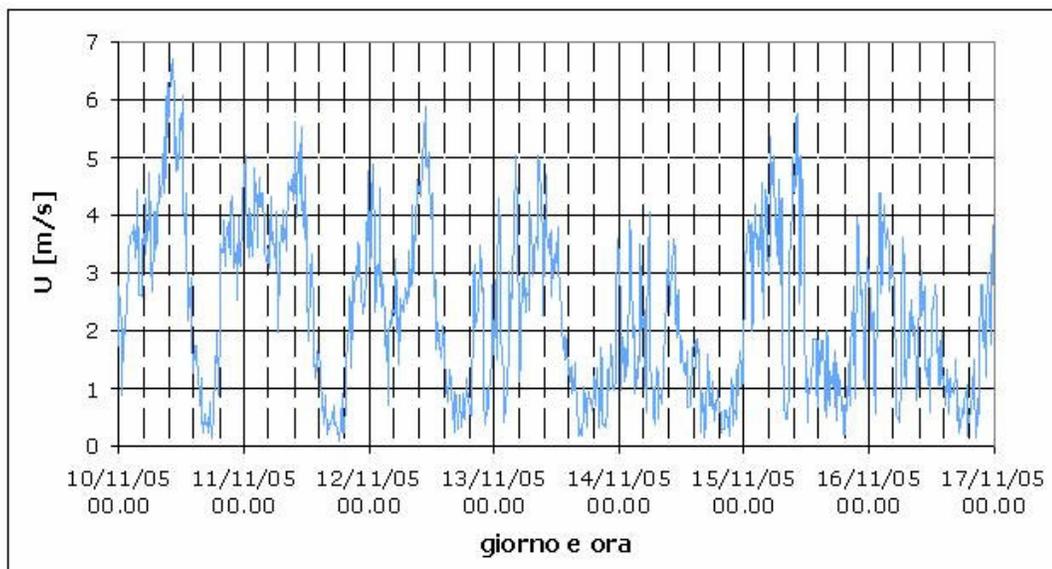


Figura 7: Grafico della velocità del vento dal 10 al 17 Novembre, rilevato da stazione meteorologica di Molino Vittoria. Si notano diminuzioni di velocità associate alla variazione di direzione.

4 ANALISI DEI DATI

4.1 Inquadramento generale dei risultati

Dal confronto dei dati raccolti dai cinque sensori, durante i 15 giorni di misure, si osserva che nei primi giorni (dal 4 all'8 Novembre) le temperature presentano un comportamento quasi monotono con un'evidente tendenza all'abbassamento delle temperature stesse, ma senza spiccate variazioni di temperatura tra giorno e notte. Dall'8 al 17 Novembre si osservano invece cicli giornalieri molto marcati che si sovrappongono al generale calo di temperatura dovuto all'avvicinarsi della stagione invernale.

Il grafico riferito ai giorni 12-14 Novembre presenta le tipiche giornate di cielo sereno (Fig. 8): anche qui, come presumibile, i tre sensori posti in città hanno rilevato misure di temperatura molto simili tra loro, con l'eccezione dei picchi dovuti alla radiazione solare diretta delle ore 15:00. Mesiano presenta una crescita delle temperatura quasi lineare, con un massimo che è sempre inferiore rispetto agli altri. La causa di tale differenza è presumibilmente la posizione del sensore nel lato dell'edificio rivolto a Nord che, quindi, non è mai illuminato direttamente dal sole. La fase discendente delle temperature è molto più "ondulata", come anche la discesa delle temperature di Sardagna. Le fluttuazioni, dell'ordine di 0.1 °C, sono probabilmente legate a delle piccole oscillazioni in direzione verticale degli strati di aria fredda che si accumulano nella valle e che lambiscono il versante.

Al mattino si nota uno sfasamento dei valori di temperatura: infatti il sole verso le ore 7:00 illumina Sardagna, che subito rivela un rapido incremento della temperatura; seguita, verso le 9, dai sensori posti in città ed in fine dal sensore posto a Mesiano, che però a causa della sua posizione riparata dall'ombra dell'edificio rimane sempre con temperature inferiori agli altri. In particolare verso le 7:00, mentre la temperatura a Sardagna sale, quella a Mesiano presenta un massimo locale e poi ritorna ad abbassarsi. Questa piccola fluttuazione può essere collegata ad una debole brezza di versante tra i due pendii. Infatti l'aria a Sardagna si riscalda e tende a salire richiamando l'aria nella vicina atmosfera libera. Questo gradiente di pressioni tende a richiamare l'aria fredda del versante opposto, che scende da sopra Mesiano verso la valle.

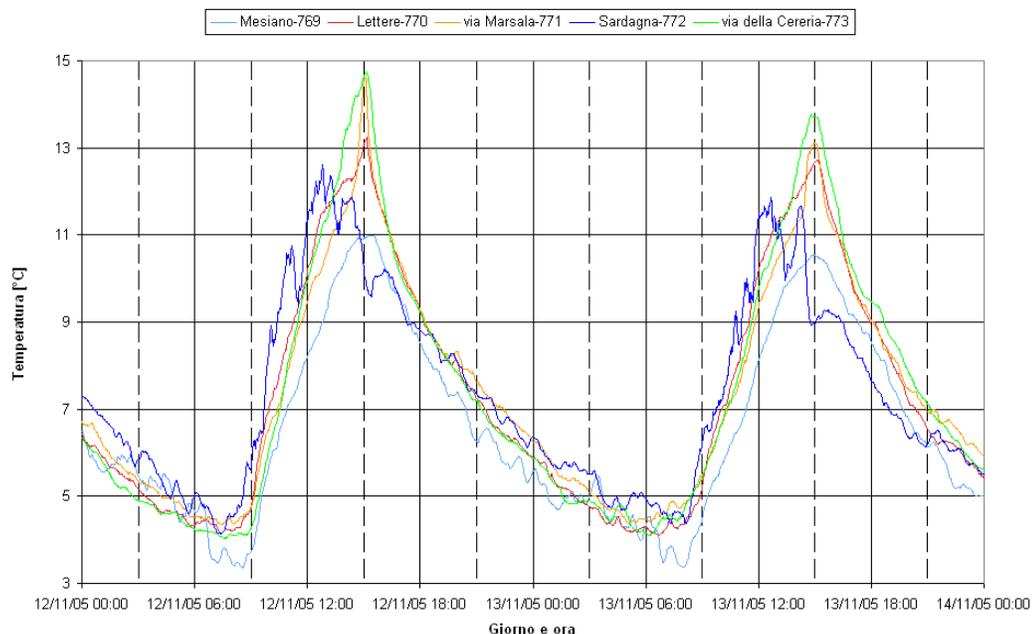


Figura 8: Confronto delle temperature registrate dai 5 sensori nei giorni caratterizzati da cielo sereno.

Da questa analisi generale è lecito dedurre che le misure di temperatura effettuate a Mesiano rappresentano con sufficiente attendibilità il comportamento dell'atmosfera libera vicina al pendio, soprattutto perché il sensore è sempre in ombra e quindi risente relativamente poco degli effetti superficiali di terreno

e strutture circostanti. Il sensore posto a Sardagna è invece poco rappresentativo delle condizioni in centro valle nelle ore diurne perché è molto influenzato dagli effetti locali generati dalla radiazione solare; al contrario i dati raccolti durante la notte e nei giorni di cielo coperto sono più attendibili.

4.2 Analisi di dettaglio

Per meglio analizzare le caratteristiche del campo di temperatura nel tratto di Valle dell'Adige prossimo alla città di Trento si è scelto di effettuare un confronto delle temperature secondo due tipi di analisi:

- in direzione trasversale alla valle: sensore a Sardagna (772) e Mesiano (769), stazioni meteorologiche di Trento Sud, Laste e Trento Nord;
- in direzione della valle: stazioni meteorologiche di Trento Sud, Molino Vittoria e Trento Nord, sensore alla facoltà di Lettere (770), in via Marsala (771) e in via Cervara (773).

Inoltre per meglio analizzare la struttura termica verticale (seppure ottenuta da dati rilevati in prossimità dei pendii) di questo tratto della Valle dell'Adige, si è scelto un confronto delle temperature al variare della quota degli HOB0 e delle stazioni meteorologiche:

- analisi verticale dell'inversione termica: stazioni meteorologiche di Trento Sud e Trento Nord, sensori a Mesiano (769) e Sardagna (772);
- analisi verticale dell'isola di calore urbano: sensori a Lettere (770), in via Marsala (771), in via Cervara (773), a Mesiano (769) e a Sardagna (772), cui si aggiunge la stazione meteorologica del Molino Vittoria.

In tutti i casi si è preferito concentrare l'attenzione sulle sole giornate di bel tempo, in cui i fenomeni oggetto di studio si presentano con maggiore intensità. In particolare per l'analisi della struttura termica verticale si è scelto di analizzare nello specifico la notte tra il 13 e il 14 Novembre 2005, dalle ore 18:00 alle ore 9:00, ad intervalli di tre ore.

4.2.1 Analisi in direzione trasversale alla valle

Dalle 12:00 del 4 Novembre, alle 12:00 del 7 Novembre il cielo sopra Trento è stato coperto, con modesti eventi di precipitazione. Durante questo periodo le temperature si sono mantenute oscillanti tra i valori di 8 °C e poco più di 13 °C. Trento Sud presenta quasi sempre temperature più alte di circa 1 °C rispetto a Mesiano, Trento Laste e Trento Nord, e questi ultimi a loro volta hanno temperature maggiori di circa un grado rispetto a Sardagna. Ciò evidenzia l'effetto dell'altezza rispetto al fondovalle: le temperature maggiori infatti si hanno in centro valle e diminuiscono alzandosi di quota. Unica eccezione è Trento Nord che, pur essendo alla stessa altezza di Trento Sud, presenta temperature minori, più vicine a quelle di Mesiano e Laste.

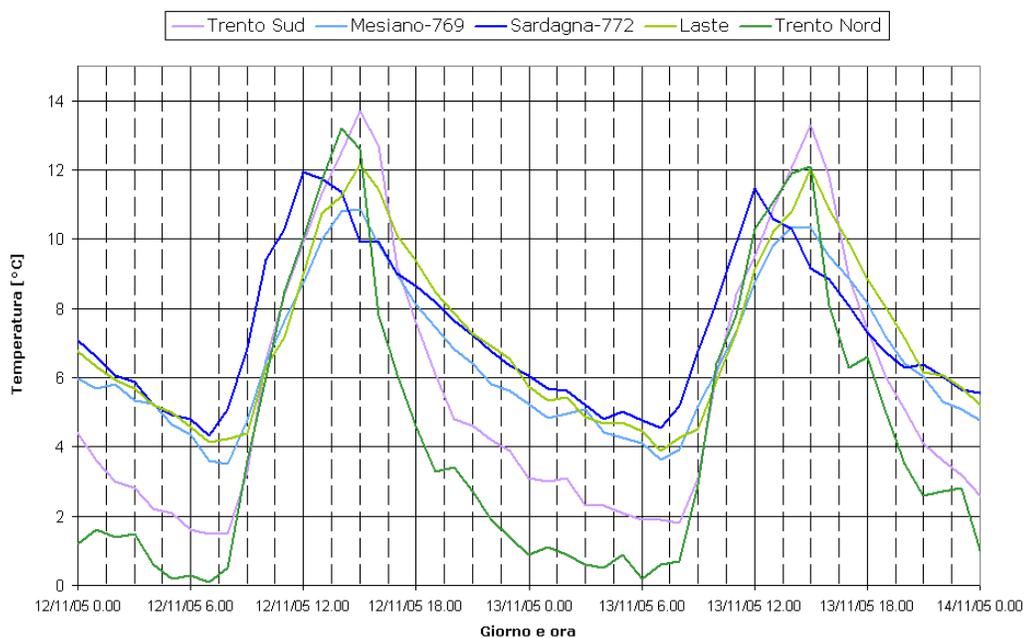


Figura 9: Confronto delle temperature medie orarie in direzione trasversale rispetto all'asse della valle.

I giorni dal 12 Novembre al 14 Novembre sono stati caratterizzati da cielo abbastanza sereno (Fig. 9). Il confronto delle temperature evidenzia che le stazioni di Trento Sud e Trento Nord presentano la maggiore escursione termica giornaliera, pari a circa 13 °C, e rispettivamente oscillante negli intervalli 2–14 °C e 0–13 °C. Come già detto tali stazioni presentano il tipico comportamento derivante dall'insolazione giornaliera della superficie e del veloce riscaldamento dell'aria sovrastante, e dalla persistenza notturna di aria fredda nel fondovalle. La mattina, dalle ore 7:00 circa in avanti, la temperatura a Sardagna sale più velocemente perché illuminata dal sole, ma poi verso le 13:00 viene superata da quella di Trento Sud e Nord e da quella di Laste mentre quella di Mesiano rimane sempre un po' più bassa. Si nota che Laste e Trento Sud raggiungono contemporaneamente il massimo della giornata. Nel pomeriggio le temperature di Trento Sud e Nord cominciano a calare bruscamente e scendono a valori inferiori a quelli di Sardagna, Laste e Mesiano. La temperatura di questi ultimi due rimangono quasi sempre sotto quella di Sardagna tranne per qualche ora del pomeriggio quando Sardagna torna in ombra, mentre il sole illumina ancora il versante Est. Bisogna ricordare che il sensore di Mesiano, a differenza degli altri, rimane sempre in ombra. Dal confronto di Mesiano e Laste è evidente che il contributo della radiazione diretta del sole accentua le differenze di temperatura misurata, infatti le maggiori differenze tra i due si notano verso le 13:00, quando la radiazione solare a terra è massima.

Da questo confronto delle temperature in direzione trasversale alla valle si nota la presenza di un'inversione termica che dal fondovalle si estende probabilmente fino a Sardagna. Questo è un fenomeno generato dall'irraggiamento notturno indotto dal cielo sereno e dall'assenza di moti d'aria. In queste condizioni il raffreddamento del suolo e dello strato d'aria a contatto con esso avviene rapidamente ed intensamente e la mancanza di vento inibisce lo scambio con gli strati sovrastanti. In inverno l'inversione termica si può mantenere per parecchi giorni, poiché l'irraggiamento solare è troppo debole per rompere la stratificazione stabile che si forma. A ciò si aggiunga che in un ambiente orograficamente complesso la formazione di zone in cui ristagna aria fredda (*cold pools*) è fortemente favorita dalla morfologia del terreno: più stretta è la valle più profondo è il "lago"; più largo è il bacino idrografico in questione maggiore è la produzione d'aria fredda e maggiore la dimensione del "lago".

4.2.2 Analisi in direzione longitudinale alla valle

Dal grafico tra il 12 e 14 Novembre, cielo sereno (Fig. 10), risulta evidente che le differenze tra le misurazioni sono dovute alle diverse posizioni dei sensori relativamente all'area urbana. I sensori posti in città (tra le case) (via Cervara (773), via Marsala (771), Lettere (770)) rilevano temperature molto simili tra loro che, in particolare nelle notti di cielo sereno, sono maggiori sia delle temperature dei sensori posti nelle zone rurali (Trento Sud e Trento Nord), sia della temperatura dell'aria sopra gli edifici più alti della città (Molino Vittoria).

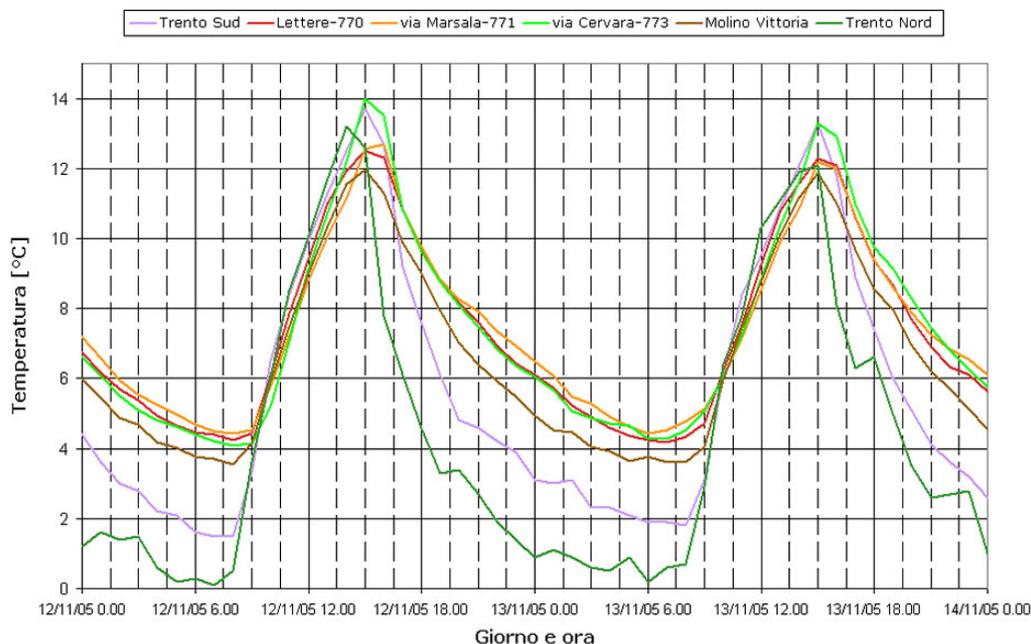


Figura 10: Confronto delle temperature medie orarie lungo l'asse della valle.

È interessante confrontare Trento Sud e Nord (Fig. 10): durante la mattina l'aumento delle temperature è praticamente coincidente fino al raggiungimento del valore massimo, che per Trento Sud si esplica in un picco molto evidente e uguale ogni giorno, mentre per Trento Nord è meno marcato e un po' più variabile. Il pomeriggio le temperature di Trento Nord cominciano a diminuire circa un'ora prima di quelle di Trento Sud e questa differenza si mantiene tutta la notte, portando le temperature a scostarsi di circa 2 °C. Questo comportamento è legato al fatto che il pomeriggio la stazione di Trento Nord viene velocemente coperta dall'ombra del Monte Bondone, mentre quella di Trento Sud rimane illuminata un po' più a lungo.

I minimi notturni delle due stazioni di Trento Sud e Nord sono più bassi di 2 °C e 4 °C rispetto ai minimi dei sensori in città, mentre il minimo di Molino Vittoria è minore di circa 0.5 °C sempre rispetto a quelli della città. Questo confronto di temperature lungo la Valle rivela il tipico effetto dell'isola di calore urbano che è un'anomalia della temperatura dell'aria del centro cittadino rispetto a quella delle zone rurali circostanti. Tale fenomeno si registra tutto l'anno e in media la città risulta più calda di 1–2 °C, ma in condizioni di alta pressione e vento debole questa differenza di temperatura può diventare notevole (10–12 °C). L'intensità dell'isola di calore urbano dipende dalla diversa velocità di raffreddamento della zona urbana e della zona rurale: quest'ultima infatti, dopo il tramonto, raffredda più velocemente, mentre la zona urbana raffredda più lentamente. Quindi, di solito, si raggiunge l'intensità massima dell'isola di calore urbano 3 – 5 h dopo il tramonto nel centro dell'abitato.

4.2.3 Analisi verticale dell'inversione termica

Come già osservato nell'analisi trasversale, si nota la presenza di una inversione termica nella Val d'Adige, durante i giorni della campagna di misure. Questa inversione si sviluppa su tutta la larghezza della valle.

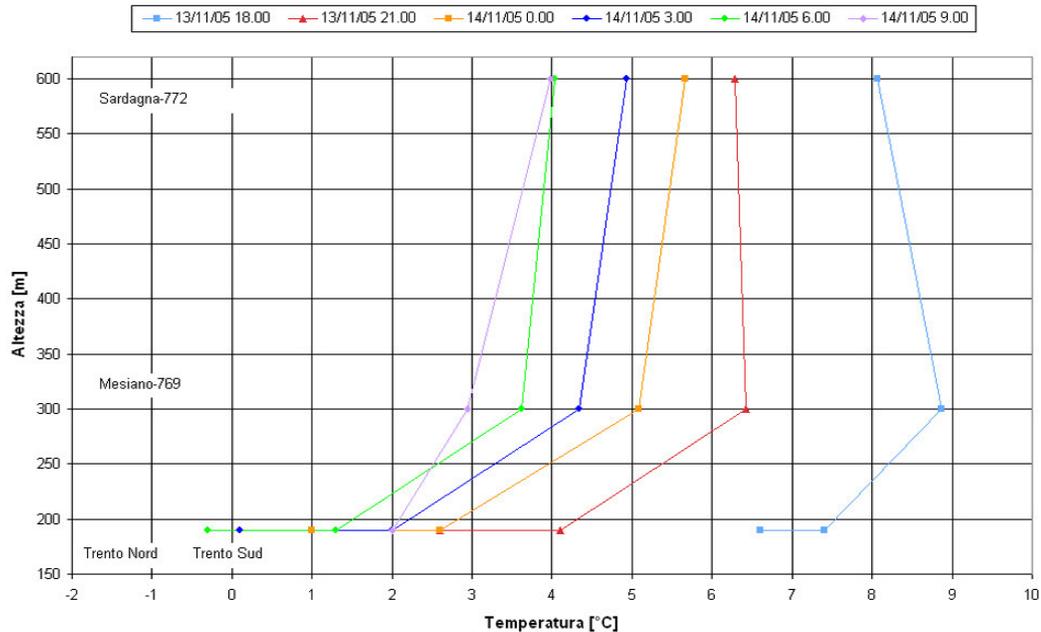


Figura 11: Evoluzione dell'inversione termica tra le ore 18.00 del 13/11 e le ore 09.00 del 14/11.

Dal grafico di Figura 11 si nota una generale diminuzione delle temperature con il passare delle ore. Quelle dei sensori posti nel fondovalle variano da 7.4 °C (alle ore 18:00) fino a -0.3 °C (alle ore 6:00), per poi tornare a crescere qualche ora dopo l'alba e alle 9:00 si hanno temperature coincidenti tra Trento Sud e Nord a 2 °C. La temperatura a Mesiano parte da 8.86 °C (alle ore 18:00) per scendere fino a 2.94 °C (alle ore 18:00). Mentre quella di Sardagna varia da 8.07 °C (alle ore 18:00) a 3.98 °C (alle ore 9:00).

Alle ore 18:00 si nota un principio di inversione termica nella bassa valle, infatti Mesiano presenta ancora una temperatura più elevata rispetto a Sardagna, ma con il tramonto la differenza delle due temperature comincia a calare fino a quando alle 00:00 si nota un completo sviluppo dell'inversione termica nella valle, in tutto lo spessore indagato.

4.2.4 Analisi verticale dell'isola di calore urbano

In questa parte si osserva l'evoluzione temporale della struttura verticale di tale fenomeno a partire dalle ore 18:00 del 13 Novembre fino alle ore 9:00 del 14 Novembre.

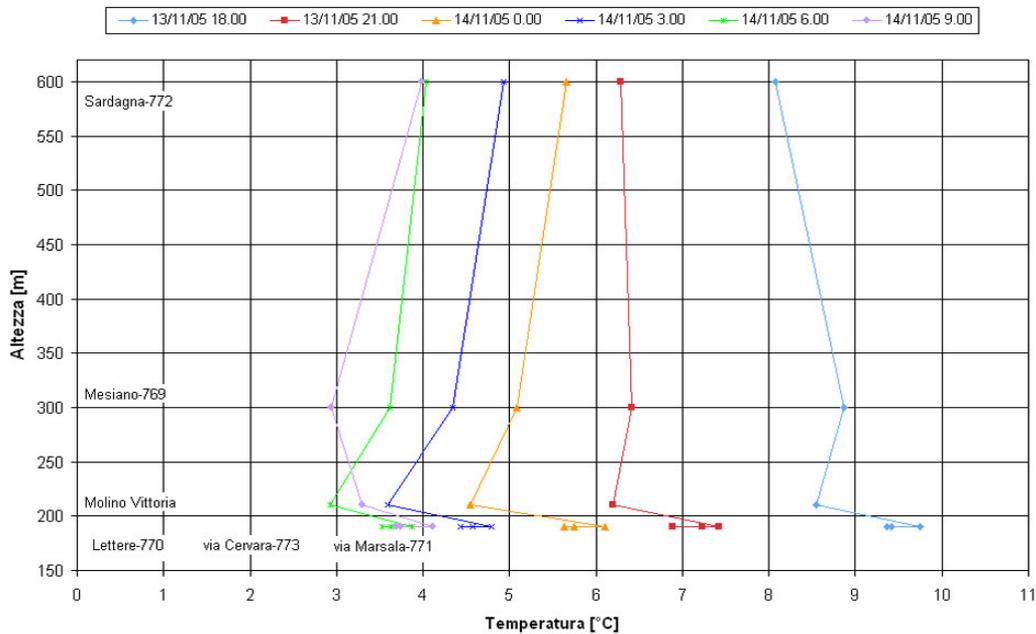


Figura 12: Struttura verticale dell'isola di calore urbano tra le 18.00 del 13/11 e le 09.00 del 14/11.

Dal grafico di Figura 12 si osserva la presenza di due fenomeni in parte sovrapposti: nella parte bassa della Valle, ed in particolare nelle stazioni poste all'interno della città (via Cervara (773), via Marsala (771), Lettere (770)), si osserva l'isola di calore urbano indicata da un aumento della temperatura, mentre al di sopra della città fino a Sardagna si osserva la presenza dell'inversione termica.

Con la prima serie di misure (ore 18:00) si nota che la temperatura a Mesiano (8.86 °C) è maggiore rispetto a quella di Molino Vittoria (8.55 °C). Questo fenomeno è probabilmente dovuto al rapido raffreddamento dell'aria sopra la città (al di fuori dei canyon urbani), mentre Mesiano essendo sul versante Est a circa 300 m di altezza rimane illuminata più a lungo e comincia a raffreddarsi più tardi rispetto al fondovalle. Salendo ancora con la quota il gradiente termico comincia a farsi prevalere, infatti Sardagna con 8.07 °C presenta la temperatura minore.

Durante le successive serie delle notte, in città continua ad essere rilevata la temperatura maggiore, ma già da Molino Vittoria si nota la presenza dell'inversione termica nella Valle, con lo stesso profilo osservato dalla analisi verticale precedente.

Con la serie delle misure delle ore 09:00 si osserva come la presenza della radiazione solare sul versante Ovest e sul fondovalle inverte la tendenza al raffreddamento: le temperature in città e al Molino Vittoria cominciano ad aumentare e quella a Sardagna rimane stabile. La temperatura a Mesiano, invece, continua a diminuire con la stessa tendenza delle ore precedenti. Ma già dalle 10:00 questa tendenza si inverte e comincia ad aumentare la temperatura anche a Mesiano.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo studio si è analizzata, mediante l'uso del datalogger HOBO Pro RH/Temp, la struttura termica della bassa atmosfera in un tratto di Val d'Adige prossimo alla città di Trento.

Si sono presentati i risultati di alcuni test preliminari condotti prima di procedere con le indagini di campo per verificare le caratteristiche di accuratezza e precisione dei sensori, nonché la loro risposta dinamica.

Si è dovuto tenere conto di molti fenomeni peculiari per poter interpretare correttamente i dati: i sensori posti all'interno della città risentono infatti degli influssi dell'ambiente urbano e di diversi fenomeni fisici quali il riscaldamento delle superfici durante il giorno e le emissioni a onda lunga nella notte, la riflessione, le circolazioni nei canyon urbani, fenomeni locali di evaporazione, convezione e condensazione. Per quanto riguarda i due sensori posti sui pendii, la particolare collocazione ha permesso di considerare le temperature registrate in assenza di irraggiamento solare diretto come rappresentative dell'atmosfera alle stesse quote al centro della Valle dell'Adige.

L'analisi dei dati raccolti si è svolta confrontando le distribuzioni delle temperature secondo le direzioni trasversali e longitudinali rispetto all'asse della valle, evidenziando la presenza di due diversi fenomeni tipici della bassa atmosfera e che si manifestano in modo marcato già nella stagione tardo-autunnale: l'inversione termica e l'isola di calore urbano, processi il cui sviluppo richiede condizioni meteorologiche di cielo sereno o poco nuvoloso e assenza di vento.

Le precedenti analisi nelle due direzioni della Valle dell'Adige hanno evidenziato la presenza di due diversi fenomeni tipici della bassa atmosfera: l'inversione termica e l'isola di calore urbano. I processi di origine di tali fenomeni sono molto diversi: il primo è di natura puramente atmosferica ed è legato soprattutto alle caratteristiche morfologiche del terreno; il secondo è generato dalla presenza di un nucleo urbano che comporta notevoli variazioni delle caratteristiche della superficie terrestre. Inoltre, per lo sviluppo di entrambi i fenomeni, sono necessarie delle particolari condizioni meteorologiche: la presenza di cielo sereno o poco nuvoloso e l'assenza di vento.

Nella campagna in valle i sensori sono stati schermati dalla radiazione solare diretta e riflessa dalle superfici circostanti, ma si è visto che durante le ore di massima illuminazione gli schermi generano il massimo errore sulle misure. Quindi per ricostruire un profilo pseudovericale di temperatura è più corretto basarsi sulle misure effettuate durante le notti o nei giorni con il cielo coperto o su pendii in ombra. Inoltre non sono da sottovalutare tutti gli effetti locali legati alla specifica posizione del sensore e alla superficie circostante che può comportare parecchie variazioni rispetto alla temperatura dell'aria in centro alla Valle.

Dai confronti delle temperature delle analisi nelle direzioni longitudinale e trasversale rispetto all'asse della valle si sono evidenziati due fenomeni tipici delle valli nei giorni con cielo sereno e poco ventilati: l'inversione termica e l'isola di calore urbano. La prima si presenta tipicamente nelle valli alpine con carattere più intenso e persistente durante l'inverno, e si può vedere anche solo osservando, la mattina, la presenza di foschia nella parte bassa della valle dovuta alla stagnazione di aria fredda. L'isola di calore urbano, invece, è meno evidente ma è spesso presente in una città come Trento posta in una topografia chiusa o semichiusa.

Per un studio più completo di questi fenomeni sarebbe utile integrare i dati di temperatura con delle analisi di direzione e velocità del vento della bassa atmosfera. Infatti con vento forte gli effetti della stratificazione dell'aria fredda sul fondovalle e dell'isola di calore urbano vengono di molto attenuate o possono anche scomparire.

L'utilizzo di datalogger di temperatura posti su terreni di misura, seguendo degli andamenti pressoché lineari, potrebbe facilitare le ricerche meteorologiche della bassa atmosfera per applicazioni agricole, forestali, di pianificazione territoriale e migliorare la comprensione degli effetti dei cambiamenti della stessa sulle comunità biologiche, e sulla dispersione di inquinanti aerei.

I risultati di questo studio hanno permesso di giungere ad una prima caratterizzazione dei fenomeni di stratificazione termica e di isola di calore per l'area urbana della città di Trento, grazie all'utilizzo di più sensori in un'area confinata. Si sono confermati gli effetti che le condizioni meteorologiche a mesoscala determinano sullo sviluppo di questi fenomeni a scala locale, mentre restano da approfondire le interazioni esistenti tra il campo termico e il campo di moto che si realizza nel passaggio tra area rurale e area urbana, specialmente per quanto riguarda la riduzione della stratificazione termica e l'attenuazione dell'isola di calore urbano. Tutti questi fenomeni rivestono grande importanza per i processi di trasporto degli inquinanti in aree urbane, in particolare nella stagione invernale, quando alle emissioni contribuisce anche il riscaldamento domestico e le condizioni meteorologiche sono meno favorevoli.

BIBLIOGRAFIA

- R. Geiger, *"The climate near the ground"*, Harvard University Press, (1961).
- A. Christen, R. Vogt, *"Energy and Radiation Balance of a Central European City"*. International Journal of Climatology, (2004), pp. 24 1395-1421.
- T.R. Oke, 1987. *"Boundary Layer Climates"*, 2nd Edition, Routledge: New York.
- T.R. Oke, 2004. *"Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Site"*. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report no. 81.
- R.G. Barry, 1992, *"Mountain weather and climate"*, 2nd Edition, Routledge, pp.402.
- J. D. Fast, J.C. Torcolini, R. Redman, *"Pseudovertical temperature profiles and the urban heat island measured by a temperature datalogger network in Phoenix, Arizona"*, "Journal of applied meteorology", vol. 44, January 2005, pp. 2-13
- R. Geiger, R. H. Aron, P. Todhunter, *"The climate near the ground"*, Lanham, Rowman & Littlefield, 2003, cap. 51-52-53.
- M. H. Mccurtchan, D. G. Fox, *"Effects of elevation and aspect of wind, temperature and humidity"*, Journal of Applied Meteorology, vol. 25, 1986, pp. 1996-2013.
- R. Stull, *"Meteorology for scientists and engineers"*, Pacific Grove, Brooks-Cole, (2000).
- C. D. Whiteman, J. M. Hubbe, W. J. Shaw, *"Evaluation of an inexpensive temperature datalogger for meteorological applications"*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, (2000), vol. 17, pp. 76-81.
- C. D. Whiteman, S. Zhong, W. J. Shaw, J. M. Hubbe, X. Bian, *"Cold pools in the Columbian Basin"*, Weather and Forecasting, vol. 16, 2001, pp. 432-447.
- C. D. Whiteman, S. Eisenbach, B. Pospichal, R. Steinacker, *"Comparison of vertical soundings and sidewall air temperature measurements in a small alpine basin"*, Journal of Applied Meteorology, (2004), vol. 43, pp. 1635-1647.
- C. D. Whiteman, B. Pospichal, S. Eisenbach, P. Weihs, C. B. Clements, R. Steinacker, E. Mursch-Radlgruber, M. Dorninger, *"Inversion breakup in small Rocky Mountain and Alpine basins"*, Journal of Applied Meteorology, (2004), vol. 43, pp.1069-1082.
- S. Zhong, C. D. Whiteman, X. Bian, *"Diurnal evolution of three-dimensional wind and temperature structure in California Central Valley"*, Journal of Applied Meteorology, (2004), vol. 43, pp. 1679-1699.