



<http://iotopon.com>

MeteoTracker, una piccola ma promettente stazione meteo portatile

Giuliano Antoniciello - Socio SMI e assegnista di ricerca al Politecnico di Torino - DIMEAS, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Introduzione

Ottenere dati meteorologici affidabili con un'alta risoluzione spaziale e temporale è una delle sfide attuali della meteorologia. Il MeteoTracker prodotto dalla IoTopon srl è uno strumento portatile che va decisamente in quella direzione ed è una delle novità tecnologiche più interessanti e con le maggiori potenzia-



1-2. Dettaglio del MeteoTracker ed esempio della sua collocazione sul tettuccio di un'automobile. Gli appositi algoritmi di correzione del software permettono una misura ragionevolmente affidabile di temperatura e umidità relativa anche con lo strumento esposto alla radiazione solare, purché il veicolo sia in movimento con velocità da circa 10 km/h in su (f. G. Antoniciello).

lità sul mercato. Presentiamo qui una recensione dell'apparecchio, economicamente accessibile e utilizzabile senza difficoltà anche dai meteorologi amatoriali, e mostriamo alcuni esempi di applicazioni scientifiche dei dati che è in grado di raccogliere, per illustrare le sue potenzialità.

IoTopon srl, la startup che produce il MeteoTracker, è stata fondata da due ingegneri elettronici, e dopo alcune sessioni di finanziamento tramite crowdfunding su Kickstarter ha già iniziato a distribuire le prime versioni della piccola stazione meteorologica portatile. Questa è progettata per misurare **temperatura e umidità relativa** con buona affidabilità anche qualora montata **sul tetto dell'auto o su una bicicletta, purché in movimento, grazie ad algoritmi appositamente studiati per ovviare al disturbo generato dalla radiazione solare**. La struttura di base del MeteoTracker potrà essere in futuro integrata con ulteriori moduli di sensori, per cui ci auguriamo che lo sviluppo del progetto abbia il successo che merita. Il costo del MeteoTracker al momento varia da 77 Euro a 119 Euro, a seconda del tipo di account per l'accesso ai dati che si desidera associare al dispositivo.

La struttura

La montatura dei sensori appare solida e ben costruita. L'aderenza alla carrozzeria dell'auto (Fig. 2) è assicurata da tre magneti, rivestiti in gomma per non danneggiare la vernice. Il risultato è ottimo, il MeteoTracker è rimasto saldo in ogni circostanza, compresi pioggia battente e un forte vento laterale in autostrada, viaggiando vicini al limite di velocità. Ottimi risultati si ottengono anche montando il MeteoTracker sul manubrio della bicicletta, utilizzando la piccola montatura in plastica che viene

fornita dal costruttore. Una piccola cinghia di gomma consente di regolare la stretta sul manubrio, fatto importante perché su percorsi accidentati le vibrazioni possono far muovere il MeteoTracker se la presa non è sufficientemente serrata.

Le misurazioni

Sia in auto sia in bici il comportamento del MeteoTracker è stato ottimale. L'inerzia termica dei sensori è molto bassa: basta in genere **una ventina di secondi di marcia per portarli in equilibrio** con la temperatura esterna. Ogni misurazione è preceduta da alcuni secondi di autocalibrazione dei sensori, ma la registrazione inizia già a basse velocità. Usandolo in bicicletta abbiamo notato che basta un'andatura leggera, appena più veloce di una camminata (tra 7 e 10 km/h), perché inizi la raccolta dei dati. Diversi confronti con altri termometri e igrometri della rete ARPA Piemonte negli immediati dintorni hanno consentito di verificare una soddisfacente accuratezza delle misurazioni in ogni condizione di illuminazione: l'algoritmo di correzione per l'effetto dell'irraggiamento, il RECS (*Radian Error Correction System*), che è stato brevettato dalla stessa IoTopon, sembra in grado di svolgere il proprio compito in modo efficace anche sotto il più cocente sole estivo. Anche in questo caso siamo stati colpiti dalla rapidità con cui il sistema di correzione riesce a rendere accurata la misurazione, anche a basse velocità (circa 10 km/h).

Il software

La **app mobile** del MeteoTracker è ben fatta e risponde bene alle esigenze dell'utente. I dati e i grafici sono mostrati in modo chiaro, consentendo una valutazione delle condizioni esterne al colpo d'occhio. In Fig. 3 ab-

3. (in alto a destra) Esempio di visualizzazione dei dati tramite la app MeteoTracker su smartphone. Lo strumento esegue una registrazione ogni 50 m percorsi, oppure ogni 3 secondi qualora il veicolo non percorra questa distanza in tale lasso di tempo.

Gli altri grafici di queste pagine non derivano da visualizzazioni della app, ma da elaborazioni appositamente realizzate dall'autore a partire dai dati grezzi.

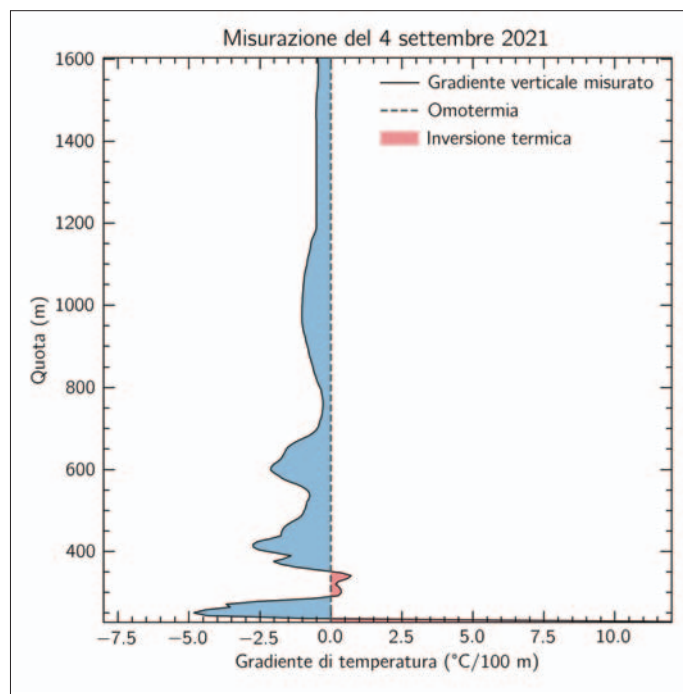
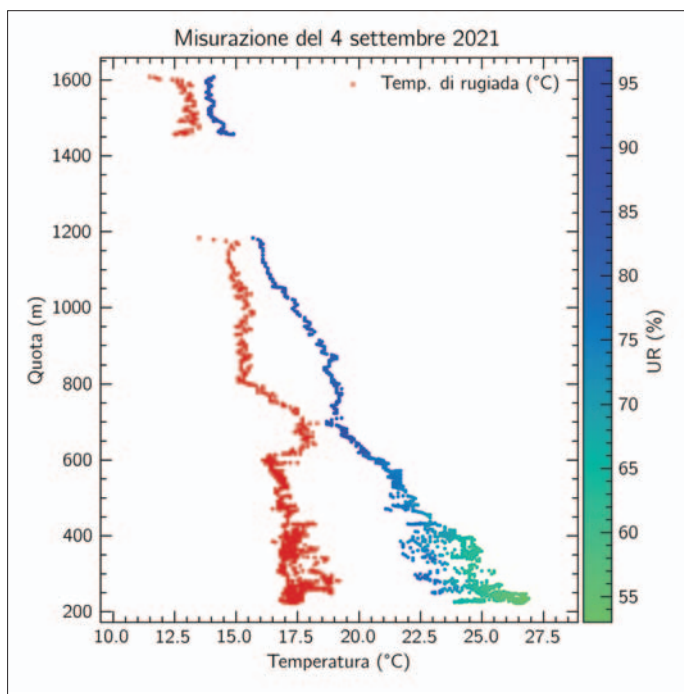
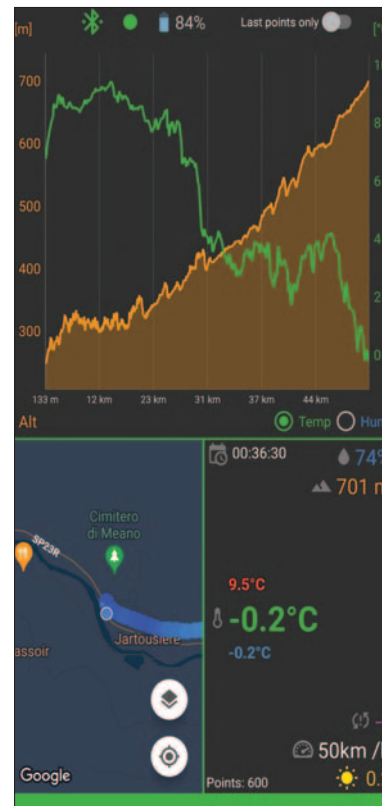
Abbiamo riportato uno screenshot dell'app mobile in esecuzione, per mostrare la ricchezza di informazioni che vengono comunicate attraverso lo schermo dello smartphone durante la registrazione. A questo proposito, il **consumo di batteria** dello smartphone **non è eccessivo**, specialmente se la registrazione avviene con lo schermo spento. Su tragitti lunghi (superiori a 2-3 ore) tuttavia è consigliabile provvedere alla ricarica dello smartphone. L'**autonomia del MeteoTracker** (ricaricabile con apposito cavo, come un cellulare) è invece **molto duratura, almeno 300 ore**.

Soltanto due volte abbiamo avuto dei problemi, e in un solo caso abbiamo perso i dati che avevamo raccolto. La prima volta che l'app si è bloccata è stato attraversando un tratto di strada con frequenti gallerie. In galleria normalmente non vengono registrati i dati, presumibilmente perché lo smartphone non riceve il segnale GPS necessario

ad assegnare una posizione geografica alla misurazione. In quel caso, dopo aver perso e recuperato il segnale GPS per cinque o sei volte, la registrazione si è bloccata, ma i dati sono stati salvati.

La seconda volta l'app si è bloccata mentre ci trovavamo in coda nella tangenziale di Torino, tra frequenti soste e ripartenze a passo d'uomo. In questo caso, dopo circa dieci minuti di coda, l'app del MeteoTracker si è bloccata del tutto ed è stato necessario riavviarla. Sfortunatamente i dati registrati fino a quel momento sono andati persi. Si tratta comunque, in entrambi i casi, di blocchi avvenuti in condizioni limite per l'uso del MeteoTracker (assenza di segnale GPS, velocità troppo bassa).

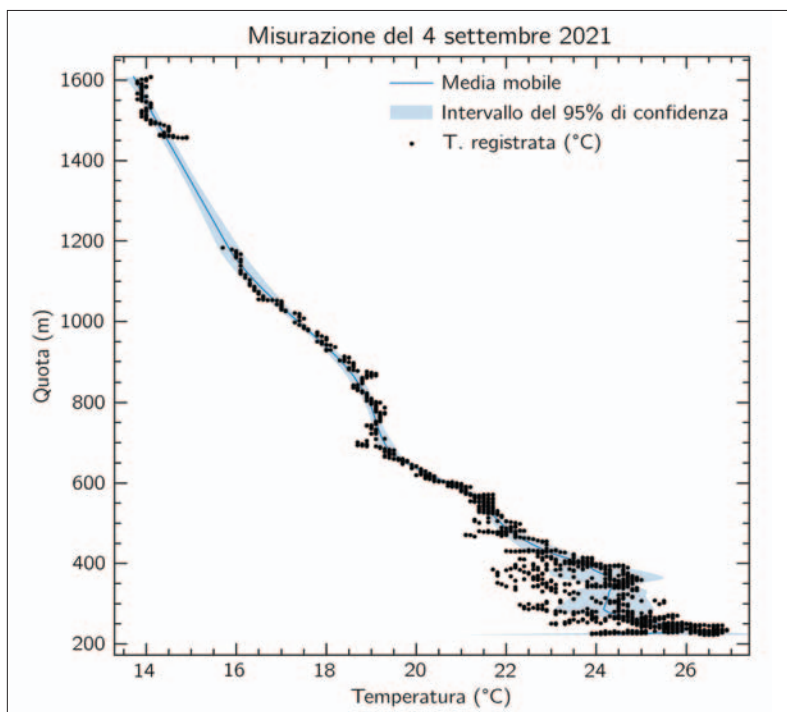
A parte questi due casi, non sono da segnalare altri problemi o inconvenienti con l'app. La **app web** invece è ancora in rodaggio. L'aggiornamento della mappa è spesso lento, a volte restituisce una schermata vuota e tende a



4a. (a sinistra) Rappresentazione, in funzione della sola altitudine, dei valori di temperatura di bulbo asciutto (punti dal blu al verde) e di temperatura di rugiada (punti rossi) rilevati dal MeteoTracker il 4 settembre 2021 lungo il tragitto Torino - Ceresole Reale (Valle Orco). Ogni punto corrisponde a un campionamento/registrazione (nel tratto di pianura e fondovalle, sotto i 600 m, sono presenti molti punti a quote pressoché identiche lungo il tragitto). Il divario tra i due parametri esprime l'umidità relativa, in funzione della quale è assegnato il colore dei punti della temperatura di bulbo asciutto, in base alla scala colorata a destra. Più i valori (e i fasci di punti) sono lontani, più l'umidità relativa è bassa, come avviene nel primo tratto di percorso alle quote inferiori (verde); viceversa laddove i valori sono più vicini ci si approssima alla saturazione (UR >90%, blu), come avviene lungo la Valle Orco in atmosfera nuvolosa e talora nebbiosa/piovosa. Si noti l'assenza di dati tra i 1200 e i 1450 m, a causa del passaggio nella lunga galleria tra Noasca e Ceresole Reale.

4b. (a destra) Evoluzione del gradiente puntuale di temperatura con la quota durante il percorso: come prevedibile in una giornata nuvolosa e con deboli precipitazioni, a parte una lieve inversione termica tra 300 e 350 m (zona di Rivarolo Canavese-Salassa, area rossa) prevale un gradiente termico negativo (azzurro, ovvero la temperatura diminuisce con la quota), con valori più marcati nel primo tratto fuori Torino (basso Canavese), all'ingresso in Valle Orco tra 400 e 600 m (fin quasi a -3 °C/100 m), e poi più ridotti e costanti nel tratto superiore della valle tra -0,5 °C/100 m e -1 °C/100 m. Tuttavia si tenga presente che questo grafico, come quello di Fig. 5b, **a differenza di un radiosondaggio tramite pallone sonda in libera atmosfera, integra variazioni di temperatura che avvengono non solo con l'altitudine, ma anche nello spazio orizzontale, in un tragitto di 80 km che attraversa peraltro territori morfologicamente complessi e soggetti a situazioni meteo-climatiche locali e variegata, dipendenti anche dall'interazione con l'orografia e il suolo.**

4c. Percorso da Torino a Ceresole Reale, 4 settembre 2021. Andamento della temperatura di bulbo asciutto con la quota, singole misurazioni e media mobile con intervallo del 95% di confidenza (area azzurra). Sotto i 400 m si evince una forte dispersione dei valori a parità di altitudine, a causa della lunghezza del percorso attraverso zone con condizioni atmosferiche diverse.



bloccarsi se si cerca di visualizzare più di due o tre sessioni. Per gli account per cui questa funzione è abilitata, il **download delle misurazioni** è possibile solo per i dati visualizzati nei grafici del pannello di destra, ma per ciascuna sessione sembra che non sia possibile visualizzare contemporaneamente nei grafici tutti i parametri registrati. Abbiamo constatato che oltre al timestamp e alle coordinate geografiche, solo sei dei nove parametri disponibili possono essere scaricati nello stesso file.

I test e l'analisi scientifica dei dati

Tra l'inizio di settembre e la metà di novembre 2021 abbiamo condotto 46 sessioni di misura in auto e 6 in bicicletta, in diverse condizioni meteorologiche. Le misurazioni sono state fatte all'interno della Città Metropolitana di Torino, in un intervallo di quota che va dai 210 m ai 1650 m. I dati ottenuti sono stati scaricati in formato CSV e analizzati con le librerie Numpy, Pandas, Scipy, Matplotlib, Seaborn e Statsmodel di Python (versione 3.6). Qui presentiamo i risultati di due analisi che abbiamo scelto come esempi tra le decine di sessioni che abbiamo registrato e analizzato finora. Il primo esempio è relativo alla misurazione del **4 settembre 2021**, eseguita tra le 12:30 e le 14:30. Siamo partiti **da Torino** (quota 220 m) per raggiungere **Ceresole Reale** (quota 1600 m), nel Parco Nazionale del Gran

Paradiso.

Il grafico della Fig. 4a mostra la temperatura di bulbo asciutto (rappresentata dai punti verdi e blu) e il punto di rugiada (punti rossi) in corrispondenza della quota a cui sono stati rilevati i valori. La colorazione dei punti della temperatura di bulbo asciutto si riferisce all'umidità relativa associata (UR %), secondo la scala di colore rappresentata sulla destra del grafico, che si estende dal 53% al 97% (più la differenza tra temperatura di bulbo asciutto e quella di rugiada è elevata, più l'umidità relativa è bassa, e viceversa).

Questa sessione di misura è particolarmente interessante come test per via del fatto che presenta una lunga interruzione, dovuta alla galleria che porta da Noasca a Ceresole Reale (circa 200 m di dislivello nel tunnel), e per il tratto di pioggia debole e nebbia attraversato nella media valle Orco, poco oltre Locana. L'interruzione è evidente dall'assenza di punti tra i 1200 e i 1400 m di quota. Il tratto di pioggia e di nebbia è invece visibile dall'aumento della temperatura di rugiada tra i 600 e gli 800 m, dove i punti rossi arrivano quasi a toccare i punti blu intorno ai 700 m (atmosfera quasi satura, UR prossima al 100%). Quando temperatura e punto di rugiada coincidono, il vapore condensa: in questa fascia di quota abbiamo infatti attraversato delle nuvole basse (strati), da cui la nebbia osservata.

Per valutare il gradiente termico altitudinale (Fig. 4b), abbiamo isolato i valori di temperatura e abbiamo applicato un filtro LOESS per ottenere una media mobile smussata (Fig. 4c). La banda in azzurro associata alla linea continua blu indica l'intervallo di confidenza al 95% e rappresenta l'incertezza del valore di temperatura in funzione della quota.

La lacuna dovuta alla galleria è stata ricostruita ipotizzando che non fosse presente, all'esterno, una fascia di inversione termica in quelle quote.

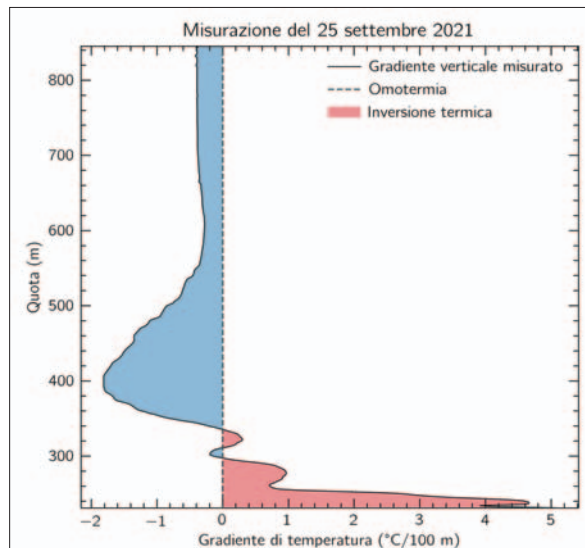
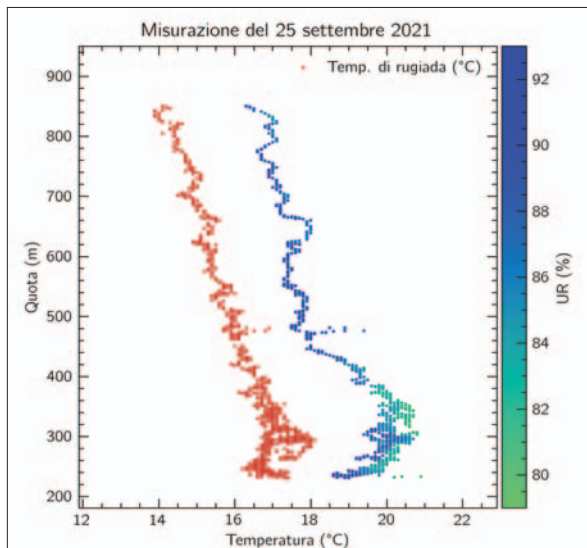
Dalla media mobile della Fig. 4c abbiamo **ottenuto il gradiente termico altitudinale calcolando la derivata numerica della curva blu**. Il risultato è mostrato nel grafico della Fig. 4b, in cui abbiamo indicato in rosso le regioni di inversione termica.

Oltre a un sottile strato di inversione termica in prossimità di Torino, alla partenza, abbiamo rilevato un'altra leggera inversione tra i 300 e i 350 m (tra Rivarolo Canavese e Salassa), in realtà molto vicina a condizioni di isoterma verticale, e a quote superiori un gradiente termico altitudinale costantemente negativo, molto vicino al gradiente adiabatico saturo, dati gli alti valori di umidità relativa (intorno al 95%).

Tornando al calcolo della media mobile, in generale, l'applicazione di un filtro per smussare i dati serve a far emergere l'andamento medio sottostante dal rumore statistico indotto da rapide fluttuazioni di temperatura associate a caratteristiche particolari del percorso, influenzato dall'interazione con il suolo e l'orografia, più che a reali proprietà fisiche della massa d'aria circostante. Oltre a un diverso intervallo di quote campionabili, in questo sta la principale **differenza tra le misurazioni ottenute con il MeteoTracker e quelle derivanti dai tradizionali radiosondaggi**. Tuttavia, dato che le misure sono accurate e che è possibile raccogliere un gran numero di punti, applicando i metodi statistici adatti all'analisi si possono ottenere risultati comunque molto validi. Il secondo esempio è quello della misurazione condotta tra le 9:30 e le 11:00 del **25 settembre 2021**. In questa occasione abbiamo portato il MeteoTracker **dalla periferia Nord di Torino alle pendici del gruppo dell'Orsiera, in Val Chisone**. La

5a. (sinistra) Grafico analogo a 4a, riferito al percorso Torino-Pinerolo-Val Chisone e al 25 settembre 2021. In questo caso il tempo era grigio sia nel tratto di pianura sia in quello montano, e il divario tra temperatura di bulbo asciutto e temperatura di rugiada, dunque l'umidità relativa, è più costante rispetto al 4 settembre (Torino-Ceresole), con valori di UR tra 80 e 90%.

5b. (destra) Evoluzione del gradiente di temperatura. I valori termici aumentano (gradiente positivo) procedendo da Torino (circa 230 m) fin verso Pinerolo (330 m) come indica l'area rossa. Imboccando la Val Chisone le temperature invece calano (gradiente negativo, in azzurro), e sopra i 600 m il gradiente si stabilizza a circa $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.



quota di partenza è intorno ai 230 m, dove abbiamo rilevato una temperatura di $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, identica a quella misurata dalla stazione meteorologica del Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino posta grosso modo alla stessa quota. L'altitudine di arrivo è di 850 m. In questo intervallo, la temperatura ha raggiunto un massimo di circa $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ intorno ai 330 m di quota e un minimo di $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 850 m. Dall'andamento dei punti con la quota (Fig. 5a) si evince che nei primi 120 m, da Torino fino a 320-330 m, dunque fin verso Pinerolo, è presente una forte inversione termica, con un gradiente che supera in certi punti i $+4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, mentre al di sopra dei 340 m, e fino agli 850 m a cui si spinge la misurazione, il gradiente è negativo. Oltre i 550 m in effetti il gradiente termico altitudinale si stabilizza intorno a $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,

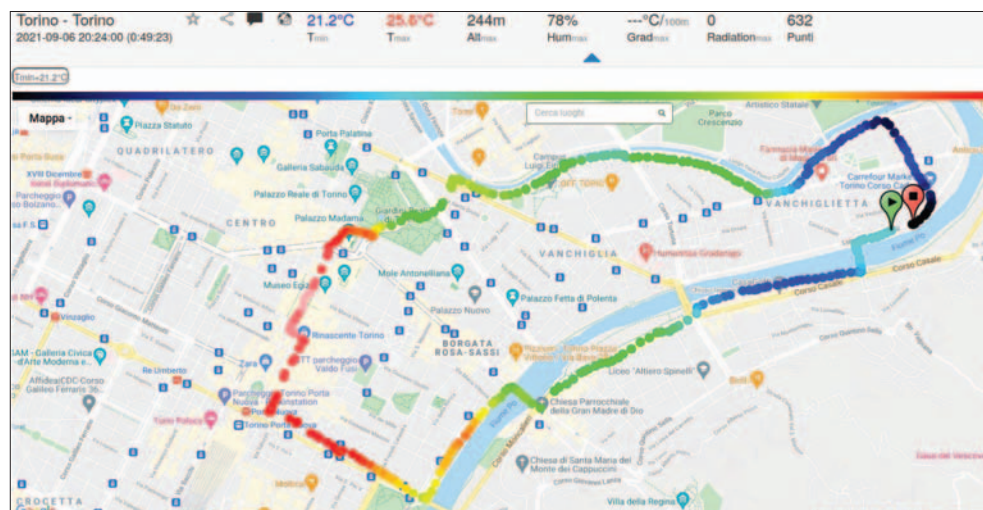
un valore vicino a quello del gradiente adiabatico umido. Questo in effetti era un risultato atteso, perché in quella fascia l'UR superava il 90%. I punti a cavallo dei 450 m di quota, dove si nota un apparente aumento di temperatura di circa $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, corrispondono al passaggio in una galleria, in cui tuttavia la raccolta dei punti si è interrotta. Gli outliers corrispondono ai momenti di entrata e di uscita dalla galleria e registrano una temperatura più elevata proprio perché l'aria all'interno di una galleria è solitamente più calda di quella esterna, quanto meno in una giornata autunnale nuvolosa e fresca.

Conclusioni

La valutazione complessiva sul MeteTracker è molto positiva. Si tratta di un'eccellente combinazione di qualità e accuratezza,

che costituisce una vera e propria stazione meteorologica. Le potenzialità applicative di questo dispositivo sono notevoli e interessanti. Non solo sarà possibile raccogliere dati preziosi sullo stato dell'atmosfera con misure dirette dotate di una risoluzione spaziale senza precedenti, ma saranno possibili anche analisi approfondite di fenomeni locali che sarebbe altrimenti difficile ricostruire dai dati delle (relativamente) poche stazioni fisse sparse sul territorio. Gli esempi che abbiamo mostrato, relativi a misure in ambiente montano, sono solo un piccolo campionario delle possibilità.

Un ulteriore esempio di possibile applicazione, che però richiederebbe un'analisi più approfondita, è quello della stima dell'**isola di calore urbana**. In Fig. 6 è riportata la mappa di una sessione di misurazione avvenuta la sera del 9 settembre 2021 a Torino, ottenuta montando il MeteTracker sul manubrio di una bicicletta. La mappa mostra una differenza apprezzabile di temperatura tra il centro e la periferia, e la qualità dei dati lascia intravedere la possibilità di combinare più misurazioni fatte contemporaneamente e soprattutto un modello di distribuzione spaziale degli edifici, per ricostruire con grande precisione le variazioni di temperatura tra i centri urbani e le zone di campagna circostante. In conclusione, le analisi che abbiamo suggerito, e altre a cui ancora non abbiamo ancora pensato ma che certamente emergeranno dalla comunità degli utenti, rivelano il grande potenziale scientifico dello strumento.



6. Dati rilevati la sera del 9 settembre 2021 durante un percorso in bicicletta a Torino, che rivelano il passaggio a temperature inferiori dal centro (elementi rossi, massimo di $25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ in zona Porta Nuova) verso la periferia (elementi blu scuro, minimo di $21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel quartiere Vanchiglietta, presso la confluenza Dora Riparia-Po) evidenziando il potenziale di MeteTracker nel mappare l'isola di calore urbana.