

Effetto della temperatura e umidità del suolo sullo sviluppo delle termiche in atmosfera: simulazioni con il modello meteorologico WRF per il volo in parapendio



POLITECNICO
MILANO 1863

Autore: **Christian Nardon**, relatore: **Alessandro Ceppi**,
co-relatore: **Enrico Gambini**, controrelatore: **Alessandro Perotto**



Introduzione

Questo studio analizza come le caratteristiche del suolo, in particolare **temperatura e umidità**, influenzino la formazione delle **termiche** nello strato limite atmosferico (ABL). Le termiche sono correnti ascensionali generate dal riscaldamento disomogeneo del terreno, un fenomeno cruciale per il volo libero con mezzi privi di motore come parapendii e alianti. Queste correnti sono ben note per la loro importanza nel mantenere la quota di volo, ma il loro comportamento è fortemente influenzato da variabili locali, come il tipo di terreno, l'albedo, la rugosità e l'umidità, che rendono complessa una previsione efficace del fenomeno.

L'obiettivo principale di questa tesi è comprendere meglio come il suolo, specialmente attraverso variazioni di umidità, possa ridurre o amplificare la formazione di termiche. L'acqua presente nel suolo può infatti sottrarre energia al processo di riscaldamento per via dell'evapotraspirazione, riducendo il numero di correnti ascensionali rispetto a un suolo più secco.

Per esplorare questi fenomeni, abbiamo utilizzato il **modello meteorologico WRF (Weather Research and Forecasting)** per simulare le interazioni tra suolo e atmosfera. I risultati ottenuti dal modello sono stati poi **validati tramite tracce GPS di voli in parapendio**. La validazione con dati reali permette di migliorare la precisione delle simulazioni e di offrire un contributo innovativo rispetto ai modelli attuali (spesso basati solo su dati storici di voli passati o limitati dalla possibilità di prevedere solo una tendenza allo sviluppo di termiche senza considerarne una loro distribuzione spaziale).

L'innovazione di questo lavoro risiede nella possibilità di creare un sistema di previsione più adattabile e preciso per il volo libero, integrando condizioni atmosferiche dinamiche con le caratteristiche del terreno.

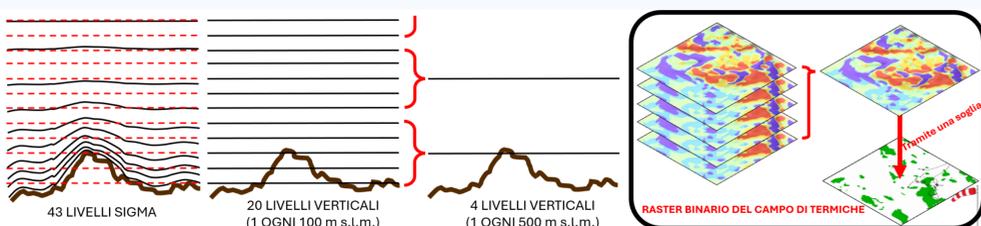
L'**approccio multidisciplinare** proposto in questa tesi permetterebbe non solo di comprendere meglio la dinamica e lo sviluppo delle termiche in relazione alle caratteristiche del suolo, ma potrebbe aprire nuove prospettive nella previsione meteorologica operativa applicata al volo libero (mezzi privi di motore) grazie al supporto di strumenti modellistici avanzati come il WRF e l'utilizzo di dati osservati di facile reperibilità e raccolti generalmente per scopi diversi dalla ricerca scientifica.

Lo studio è stato condotto nell'**area** nei pressi del monte **Cornizzolo in Lombardia** durante le giornate anticicloniche di **luglio 2023**



Materiali e metodi

Le simulazioni col **modello WRF** sono state eseguite utilizzando dati meteorologici del Global Forecast System (**GFS**) come **input**, con una risoluzione spaziale progressivamente maggiore in tre sottodomini (fino a **celle di 104x104 metri** circa) e con un passo temporale di 30 secondi. Il WRF è stato configurato per simulare i fenomeni atmosferici su **43 livelli verticali sigma**²



Schema semplificato della rielaborazione degli output del modello WRF

Gli **output del modello** sono stati quindi **rielaborati e confrontati con i dati di volo di parapendii**, raccolti attraverso le **tracce GPS** in formato IGC.³ Le tracce GPS sono state scaricate da un portale pubblico,⁴ filtrando i voli per area geografica e intervalli temporali specifici (durante luglio 2023).

Per la validazione, il confronto si è basato sulla **velocità verticale del vento**, dato che le termiche generano moti ascendenti. Le tracce sono state elaborate con il software R, individuando i tratti di volo in termica e fuori da essa.

Il **confronto tra simulazioni WRF e dati di volo** è stato eseguito tramite una mappatura delle termiche previste e rilevate, **identificando casi di corrispondenza** (True Positive), **disallineamento** (False Negative/False Positive) o assenza di dati. Per la validazione del modello sono stati considerati solo i giorni con almeno 15 voli e una significativa copertura spaziale.

Successivamente, il **WRF** è stato utilizzato per **simulare l'interazione tra suolo e atmosfera**, studiando l'**effetto dell'umidità e della temperatura del terreno** sulla formazione delle termiche. Sono stati eseguiti scenari con suolo estremamente secco/umido e caldo/freddo, per un totale di 36 simulazioni.⁵ Gli output sono stati elaborati e confrontati per valutare la presenza di termiche nelle diverse condizioni simulate.

Note

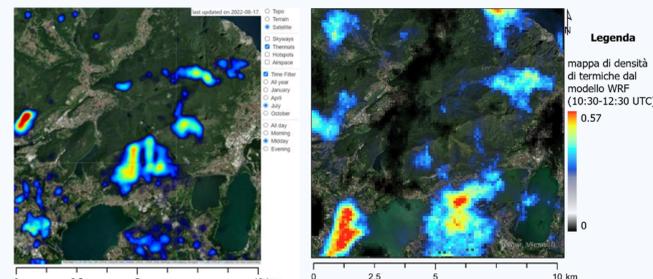
- 1 Atmospheric Boundary Layer
- 2 Livelli che tengono conto della pressione e della morfologia del terreno
- 3 International Gliding Commission, particolare formato utilizzato prevalentemente nel volo libero o da diporto sportivo
- 4 Xcontest, portale in cui i piloti di parapendio possono caricare le proprie tracce e visualizzare e scaricare quelle di altri piloti

Sviluppo e risultati

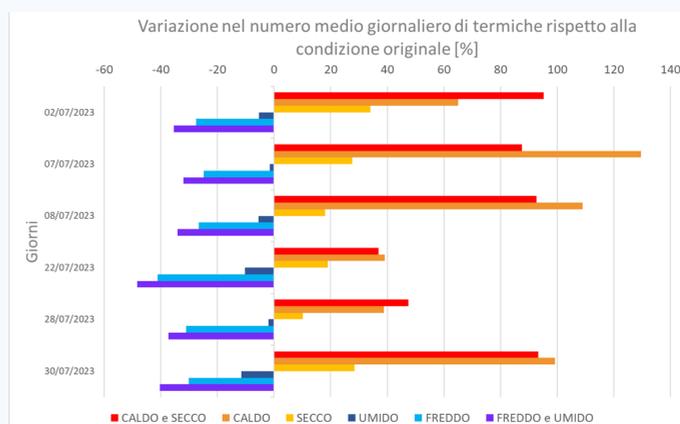
Lo studio ha dimostrato che il modello meteorologico WRF è in grado di prevedere le termiche con una performance superiore a quella di un classificatore casuale nel 76% dei casi, come evidenziato dal grafico ROC.⁶ Tuttavia, l'analisi Precision-Recall mostra una spiccata **capacità del modello nel prevedere l'assenza di termiche**, ma con difficoltà nel rilevare correttamente termiche.

Gli indici calcolati (GI=0.15, TS=0.19, FAR=0.24, BS=0.91, ETS=0.04)⁷ evidenziano una **bassa incidenza di falsi allarmi** ma anche una **sottostima delle termiche**, suggerendo margini di miglioramento.

Un **confronto con mappe basate su dati storici di voli in parapendio (thermal.kk7.ch)** conferma che il WRF è in grado di rappresentare correttamente la distribuzione delle termiche, con una buona corrispondenza degli hotspot.



Dal punto di vista meteorologico, le simulazioni hanno mostrato che la **temperatura superficiale del suolo** ha un impatto significativo sulla formazione delle termiche. **Suoli caldi favoriscono** una maggiore instabilità termica, facilitando l'innalzamento delle masse d'aria calda e la formazione di termiche più intense. Al contrario, **suoli freddi e umidi inibiscono** la formazione delle termiche poiché l'umidità tende a dissipare il calore sotto forma di calore latente, riducendo la capacità dell'aria di riscaldarsi ed elevarsi. Questo comportamento è coerente con quanto ci si aspettava prima di condurre questa ricerca.



In sintesi, la **temperatura del suolo** emerge come la **variabile dominante** nella previsione delle termiche, con variazioni modeste della temperatura che comportano significativi cambiamenti nella frequenza di termiche. L'**umidità del suolo**, pur influente, **ha un effetto minore** rispetto alla temperatura, con un decremento più contenuto nel numero di termiche previste in condizioni di suolo umido.

Conclusioni

I risultati ottenuti confermano le ipotesi iniziali, evidenziando il **ruolo attivo del suolo nei processi di formazione delle termiche** e dimostrando l'interconnessione tra suolo e atmosfera attraverso il modello WRF.

Sebbene il WRF si sia dimostrato efficace nello studio delle dinamiche atmosferiche, la sua configurazione attuale non fornisce previsioni sufficientemente accurate per l'uso in tempo reale come strumento di navigazione per il parapendio. Le aree senza termiche vengono individuate con buona precisione, mentre le previsioni sulla loro presenza restano limitate, influenzate anche dalla disponibilità di dati di validazione. Nonostante ciò, il modello WRF ha mostrato una buona capacità di simulazione della distribuzione del fenomeno nel lungo termine, suggerendo che **può essere ulteriormente ottimizzato** per migliorare le previsioni in tempo reale ed estendere l'orizzonte previsionale ad intervalli temporali maggiori.

È necessaria una futura ottimizzazione del setup del modello, che bilanci **risoluzione, accuratezza e costo computazionale**. Le implicazioni di questi risultati, soprattutto nel **contesto del cambiamento climatico**, indicano che un aumento delle termiche e della **turbolenza atmosferica** potrebbe avere effetti significativi sulla **redistribuzione di energia** e inquinanti.

Questo lavoro, pur non esaurendo l'argomento, rappresenta un **punto di partenza per future ricerche** e migliorie, aprendo la strada a ulteriori approfondimenti e sviluppi, come una migliore configurazione del modello e una maggiore accuratezza previsionale

Per approfondimenti o la consultazione del materiale bibliografico è possibile reperire la tesi integrale scansionando il QR code.

(o ricercando il titolo o l'autore nell'archivio digitale delle tesi del Politecnico di Milano)

