

# **RAPPRESENTATIVITÀ SPAZIALE DI MISURE DI QUALITÀ DELL'ARIA**

Valutazione di un metodo di stima basato sull'uso  
di "BACKWARD TRAJECTORIES"

L. VITALI, I. CIONNI, G. CREMONA, A. PIERSANTI, G. RIGHINI, L. CIANCARELLA

ENEA - Unità Tecnica Modelli, Metodi e Tecnologie per le Valutazioni Ambientali

Laboratorio Qualità dell'Aria

Centro Ricerche "E. Clementel", Bologna



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

# RAPPRESENTATIVITÀ SPAZIALE DI MISURE DI QUALITÀ DELL'ARIA

## Valutazione di un metodo di stima basato sull'uso di "BACKWARD TRAJECTORIES"

L. VITALI, I. CIONNI, G. CREMONA, A. PIERSANTI, G. RIGHINI, L. CIANCARELLA

ENEA - Unità Tecnica Modelli, Metodi e Tecnologie per le Valutazioni Ambientali

Laboratorio Qualità dell'Aria

Centro Ricerche "E. Clementel", Bologna

## **RINGRAZIAMENTI**

Il presente studio è stato svolto nell'ambito delle attività dell'Unità Tecnica Modelli, Metodi e Tecnologie per le Valutazioni Ambientali di ENEA previste dall'Accordo di Collaborazione per l'avvio delle Reti Speciali di cui al D.Lgs. 155/2010, sottoscritto dal Ministero dell'Ambiente per la Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), CNR, ENEA e ISS.

I campi meteorologici utilizzati nel presente studio sono stati prodotti da ENEA, nell'ambito del progetto MINNI, finanziato dal MATTM.

I campi meteorologici prodotti da MOLOCH e utilizzati per l'analisi di sensibilità sono stati forniti dall'Istituto ISAC del CNR e sono disponibili operativamente al sito <http://www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/>.

Gli autori ringraziano la NOAA Air Resources Laboratory (ARL) per la fornitura gratuita del modello HYSPLIT. Per il calcolo della traiettorie con HYSPLIT, effettuato nel presente studio, sono stati utilizzati i campi di Reanalisi dell'NCEP, forniti da NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA attraverso il loro sito Web.

Le risorse computazionali necessarie per il calcolo e l'elaborazione statistica delle traiettorie sono state fornite dalla GRID-ENEA, in particolare dal sistema HPC CRESCO (<http://www.cresco.enea.it/>) del Centro Enea di Portici. Gli autori ringraziano Giovanni Bracco, responsabile del laboratorio HPC dell'Unità Tecnica ICT di ENEA, e gli amministratori di CRESCO per il prezioso supporto tecnico.

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

# RAPPRESENTATIVITÀ SPAZIALE DI MISURE DI QUALITÀ DELL'ARIA

## Valutazione di un metodo di stima basato sull'uso di "BACKWARD TRAJECTORIES"

L. VITALI, I. CIONNI, G. CREMONA, A. PIERSANTI, G. RIGHINI, L. CIANCARELLA

### RIASSUNTO

La rappresentatività dei siti di monitoraggio delle concentrazioni di inquinanti in atmosfera è un parametro fondamentale nella scelta della dislocazione delle stazioni di misura e nelle valutazioni di esposizione della popolazione ai livelli di concentrazione misurati. In generale, la rappresentatività spaziale di un sito è definita in letteratura facendo riferimento alla variabilità dei livelli di concentrazione nell'intorno del sito stesso. Nel presente studio è proposta un'analisi della rappresentatività spaziale basata sulla caratterizzazione meteorologica del sito, attraverso il calcolo e l'elaborazione statistica di *backward trajectories*. Per poter usufruire della base dati meteorologica ad alta risoluzione messa a disposizione dal Modello Nazionale MINNI, è stato sviluppato un insieme di procedure *ad hoc* (M-TraCE) per il calcolo e l'elaborazione statistica delle traiettorie delle masse d'aria in arrivo al sito di interesse.

La metodologia sviluppata è stata applicata per una sua valutazione all'analisi di rappresentatività di tutti i siti delle Reti Speciali di misura della qualità dell'aria (D.Lgs. 155/2010, artt. 6 e 8), ricostruendo per ciascuno di essi le traiettorie in arrivo a diverse ore della giornata per tutti i giorni di tre intere annualità. L'insieme dei risultati a disposizione ha fornito, per ciascun sito, non solo un'analisi sintetica d'insieme, ma anche una valutazione della variabilità di tale stima al variare delle condizioni meteorologiche sia su lungo periodo sia su breve scala temporale. Al fine di valutare le potenzialità della metodologia sviluppata, sono stati selezionati alcuni siti della Rete caratterizzati da diversi contesti, sia dal punto di vista dell'ambiente naturale che dal punto di vista delle attività antropiche, per i quali è stata effettuata una più approfondita analisi ambientale e territoriale in ambiente GIS.

Anche se, alla luce dei risultati ottenuti, questa metodologia non si è mostrata adatta per la stima assoluta e quantitativa dell'area di rappresentatività, essa ha mostrato ottime potenzialità nel fornire una particolareggiata caratterizzazione anemologica del sito. Questo approccio può essere pertanto efficacemente utilizzato, in studi di rappresentatività spaziale, a supporto di altre metodologie, consentendo di isolare gli effetti dovuti alla sola meteorologia.

**Parole chiave:** inquinamento atmosferico, reti di monitoraggio, rappresentatività spaziale, regione di influenza, *backward trajectories*.

### ABSTRACT

*The representativeness of air quality monitoring sites is a critical parameter when choosing the location of the measurement stations and assessing the effects of long term exposure to air pollution on population. Generally, according to literature, the spatial representativeness of a monitoring site is related to the variability of pollutants concentrations around the site.*

*In this work we propose the analysis of the spatial representativeness of a monitoring station by means of the meteorological characterization of the site, based on the calculation and statistical elaboration of backward trajectories. In order to take advantage of the high resolution meteorological database of the Italian national air quality model MINNI, a dedicated set of procedures was implemented (M-TraCE) to retrieve wind fields and to calculate and process the backward trajectories of air masses reaching the site of interest.*

*The developed methodology was applied to the Italian Network of Special Purpose Monitoring Stations (according to the law D.Lgs. 155/2010, art. 6 and 8), in order to assess its applicability for the analysis of spatial representativeness of the stations; the trajectories arriving at different hours of the day, for all days of three years, were retraced in each site. The results provided, for each site, not only a synthetic analysis of the whole picture, but also an appraisal of the variability of the estimates according to both long term and short term variation of meteorological conditions. Furthermore, in order to better assess the capability of the methodology, in-depth investigations were carried out by means of GIS analysis on some sites of the monitoring network that were selected in different environmental frameworks according to different natural and anthropogenic conditions.*

*Even if the results show that this methodology is not suitable for the quantitative estimation of the area of representativeness, it has demonstrated its capabilities to provide a detailed anemological characterization of the site under investigation. Therefore, when assessing spatial representativeness of a monitoring site, this approach is useful to support other methods, focussing specifically on the analysis of the effects due to meteorological variables.*

**Key words:** air pollution, monitoring networks, spatial representativeness, region of influence, *backward trajectories*.



# SOMMARIO

|          |                                                                                                                                       |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUZIONE.....</b>                                                                                                              | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>IMPOSTAZIONE METODOLOGICA .....</b>                                                                                                | <b>10</b> |
| 2.1      | Scelta del modello e della basi dati meteorologica da utilizzare per il calcolo delle traiettorie .....                               | 10        |
| 2.2      | Scelta dei parametri da elaborare per l'analisi statistica delle traiettorie.....                                                     | 12        |
| <b>3</b> | <b>CALCOLO ED ELABORAZIONE STATISTICA DELLE TRAIETTORIE .....</b>                                                                     | <b>15</b> |
| 3.1      | Sviluppo dei moduli di <b>M-TraCE</b> : codice per il calcolo delle traiettorie e procedura per l'elaborazione statistica.....        | 15        |
| 3.1.1    | Calcolo delle <i>backward trajectories</i> .....                                                                                      | 15        |
| 3.1.2    | Analisi statistica delle <i>backward trajectories</i> .....                                                                           | 17        |
| 3.2      | Verifica preliminare della metodologia sviluppata.....                                                                                | 17        |
| 3.2.1    | Verifica degli algoritmi di calcolo sviluppati, tramite confronto con <b>HYSPLIT</b> .....                                            | 18        |
| 3.2.2    | Analisi di sensibilità all'input meteorologico .....                                                                                  | 21        |
| 3.3      | Calcolo delle traiettorie per i siti della Rete delle Stazioni Speciali ed analisi statistica su un triennio meteorologico.....       | 24        |
| <b>4</b> | <b>RISULTATI .....</b>                                                                                                                | <b>28</b> |
| 4.1      | Variabilità meteorologica: effetto sui parametri descrittivi della rappresentatività spaziale .....                                   | 28        |
| 4.1.1    | Variabilità meteorologica inter-annuale .....                                                                                         | 28        |
| 4.1.2    | Variabilità meteorologica giornaliera .....                                                                                           | 33        |
| 4.2      | Analisi dettagliata in ambiente GIS dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale per alcune stazioni di interesse ..... | 36        |
| 4.2.1    | SAN PIETRO CAPOFiume .....                                                                                                            | 37        |
| 4.2.2    | PIANA ROTALIANA.....                                                                                                                  | 42        |
| 4.2.3    | CENMO1 .....                                                                                                                          | 46        |
| 4.2.4    | FIRENZE BASSI.....                                                                                                                    | 50        |
| 4.2.5    | TARANTO VIA MACHIAVELLI .....                                                                                                         | 55        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSIONI.....</b>                                                                                                               | <b>59</b> |
| <b>6</b> | <b>BIBLIOGRAFIA CITATA.....</b>                                                                                                       | <b>62</b> |
| <b>7</b> | <b>APPENDICE: MAPPE .....</b>                                                                                                         | <b>67</b> |



# 1 INTRODUZIONE

Tra i metadati che caratterizzano una stazione di misura delle concentrazioni di inquinanti in atmosfera, la rappresentatività spaziale rappresenta un parametro di grande importanza. E' attraverso tale informazione che viene stimata l'area attorno al sito per la quale si può con buona approssimazione ritenere che sia rappresentativo il dato misurato. In fase di valutazione della qualità dell'aria, tale parametro è quindi di fondamentale importanza sia per la pianificazione di nuove reti di monitoraggio sia per una corretta interpretazione dei dati misurati. Ad esempio, la stima delle aree di rappresentatività dovrebbe essere alla base della scelta della dislocazione dei siti di una nuova rete e della valutazione della densità di punti necessaria per descrivere la variabilità delle concentrazioni in un'area. Inoltre, è a partire da valutazioni di rappresentatività spaziale che è possibile effettuare valutazioni di esposizione della popolazione ai livelli di concentrazione misurati. Oltre che per l'interpretazione dei dati misurati, l'informazione relativa alla rappresentatività spaziale del sito riveste un ruolo cruciale qualora tali dati vengano utilizzati a supporto di studi modellistici. Perché i dati misurati possano essere correttamente confrontati con i dati simulati da un modello o essere utilmente integrati in esso tramite tecniche di assimilazione dati, è necessario che l'area di rappresentatività del punto di misura sia maggiore o almeno uguale alle dimensioni delle celle di calcolo.

In generale, la rappresentatività spaziale di un sito di misura è definita in letteratura facendo riferimento alla variabilità dei livelli di concentrazione nell'intorno del sito. Tale approccio è usato ad esempio in Larssen et al. (1999) per definire l'area di rappresentatività di una stazione come "l'area nella quale la concentrazione non differisce da quella misurata nel sito più di un certo valore specificato". In Spangl et al. (2007) la variabilità delle concentrazioni è usata nel confronto tra due siti: "una stazione di monitoraggio è rappresentativa di un sito se, su un intervallo di tempo specificato, la differenza fra le concentrazioni è al di sotto di un determinato valore di soglia". Simile a quest'ultima e frequentemente citata in letteratura è anche la definizione di Nappo et al. (1982), la cui proposta si presta particolarmente ad essere funzionale al confronto tra dati misurati e dati simulati da Modelli Chimici di Trasporto. Secondo Nappo "un punto di misura è rappresentativo di un'area (o di un volume) più vasti quando è maggiore del 90 % la probabilità che nel tempo la differenza quadratica tra il valore misurato nel sito e quello misurato nell'area sia minore di una certa soglia".

Dato che le concentrazioni di un certo inquinante in un punto dipendono da numerosi fattori, quali soprattutto i flussi alla superficie (emissioni e deposizioni), il trasporto, la dispersione e le trasformazioni chimiche, ne segue che la rappresentatività spaziale di un sito, oltre a variare nel tempo (variabilità stagionale e/o giornaliera), può variare significativamente anche al variare dell'inquinante di interesse.

Diverse sono le metodologie che possono essere applicate per lo studio della rappresentatività spaziale dei siti di misura e il tema è attualmente oggetto di approfondimento e dibattito nella comunità scientifica europea, che non ha ancora identificato una o più metodologie di riferimento, in particolare per applicazioni modellistiche in supporto alle politiche sulla qualità dell'aria. Nel recente meeting di FAIRMODE (Utrecht, Maggio 2012, <http://fairmode.ew.eea.europa.eu/fo1065026/news-events-68960/5th-plenary>), tra le raccomandazioni indirizzate alla Commissione Europea per la Revisione della Politica Europea sulla Qualità dell'Aria, si legge che:

*“The location, characterization and representativeness of a measurement station in a monitoring network is of fundamental relevance for the evaluation of model results and when using network output as model input data. It is well recognized that current station classification and characterization is not harmonized across the EU with some consequences for data interpretation and use.”*

L'analisi di rappresentatività delle stazioni di monitoraggio risulta perciò un argomento di grande attualità e interesse tecnico-scientifico.

Nel 2011 sono cominciate le attività previste nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione, firmato da MATTM, CNR, ENEA, ISS, finalizzato all'avvio delle reti speciali di misura della qualità dell'aria (in adempimento degli articoli 6 e 8 del D.Lgs. 155/2010). Tale accordo prevede l'avvio e la manutenzione di una rete di monitoraggio per la misura della concentrazione dell'Ozono e dei suoi precursori, dei sette Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) di interesse tossicologico, del Mercurio e di altri metalli pesanti (Arsenico, Cadmio, Nichel) e della speciazione chimica del Materiale Particolato (PM). Nell'ambito di tale accordo, uno dei compiti di ENEA è realizzare una valutazione circa la rappresentatività spaziale di ciascuna stazione scelta e circa i bacini geografici a cui possono essere riferiti i dati rilevati da ciascuna stazione. Come attività preliminare è stata prevista una valutazione, basata sullo stato dell'arte della ricerca scientifica, delle principali metodologie proposte per l'analisi della rappresentatività spaziale. In particolare è stata prevista la valutazione dei seguenti approcci metodologici: metodi statistici basati su fattori oggettivi; metodi basati sull'uso di dati emissivi spazializzati; metodi basati sull'analisi temporale di campi 3D prodotti da modelli Euleriani; metodi che prevedono l'analisi statistica di *backward trajectories*.

Sulla base di tale valutazione si provvederà alla scelta della migliore tra le diverse metodologie tenendo conto da un lato dell'aggiornamento dal punto di vista scientifico, dall'altro dell'adattabilità alla specificità del contesto italiano, della valorizzazione dei dati a disposizione e dell'applicabilità del metodo a diversi tipi di siti e al maggior numero di inquinanti. Verrà quindi applicata la metodologia scelta e verranno calcolate le aree di rappresentatività per tutti i siti della Rete delle Stazioni Speciali per tutti gli inquinanti.

Precedenti lavori, già consegnati da ENEA al MATTM e oggetto di prime pubblicazioni, hanno valutato dapprima un metodo di stima basato su fattori oggettivi (Piersanti et al. 2013, RT/2013/1/ENEA) e di seguito due metodi basati sull'analisi di dati spazializzati, relativi rispettivamente a campi di emissione (Cremona et al. 2013, RT/2013/2/ENEA) e di concentrazione (Vitali et al. 2013, RT/2013/3/ENEA). La presente relazione, illustrando un metodo che prevede il calcolo e l'elaborazione statistica di *backward trajectories*, propone un'analisi della rappresentatività spaziale basata sulla caratterizzazione meteorologica del sito in esame.

Dopo le caratterizzazioni basate su *proxies* di tipo territoriale (primo metodo), di distribuzione delle emissioni (secondo metodo) e infine di descrizione riassuntiva dei campi di concentrazione simulati da modelli euleriani (terzo metodo), la presente metodologia completa quindi il quadro, descrivendo e isolando l'effetto dovuto alla meteorologia, anch'essa importante *proxy* per la qualità dell'aria, in quanto *driver* dei processi di trasporto degli inquinanti in atmosfera.

Come per i due metodi basati sull'utilizzo di campi di emissione e di concentrazione, anche in questo caso la necessità di disporre di dati spazializzati ad alta risoluzione su tutto il territorio nazionale ha suggerito di usufruire della disponibilità del data base messo a disposizione dal Modello Nazionale MINNI. Le *backward trajectories* sono state quindi calcolate utilizzando i campi di vento prodotti da RAMS (Cotton et al., 2003) nell'ambito del Sistema Modellistico Atmosferico di MINNI.

Per il calcolo delle *backward trajectories* è stato sviluppato un codice *ad hoc*, ispirato ad **HYSPLIT** (Draxler and Hess, 1998), uno dei modelli allo stato dell'arte comunemente utilizzati in letteratura nelle applicazioni che coinvolgono il calcolo e l'elaborazione di *backward trajectories*. Accanto al modulo per il calcolo delle traiettorie è stata sviluppata anche una procedura per la successiva elaborazione statistica delle stesse. L'insieme delle procedure sviluppate, denominate complessivamente “**M-TraCE**” (**MINNI** module for **Trajectories** Calculation and statistical Elaboration), consente quindi diverse operazioni, dal calcolo di una singola traiettoria, alla sottomissione ricorsiva di traiettorie multiple fino all'elaborazione statistica di un campione di traiettorie calcolate. Un ulteriore valore aggiunto della procedura sviluppata consiste nel fatto che **M-TraCE** risiede nello stesso ambiente della GRID-ENEA (<http://www.cresco.enea.it/>) nella quale è integrato lo *storage* che accoglie il data base MINNI, consentendo quindi, per il calcolo delle traiettorie, un accesso diretto alla base dati meteorologica.

La metodologia sviluppata è stata applicata per una sua valutazione a tutti i siti della Rete delle Stazioni Speciali, ricostruendo per ciascuno di essi le traiettorie in arrivo a diverse ore della giornata per tutti i giorni di tre intere annualità. Da un primo screening dei risultati sono stati selezionati alcuni siti, caratterizzati da diversi contesti territoriali, sia dal punto di vista orografico che dal punto di vista delle attività emissive. Su tali siti, a titolo di esempio, sono stati studiati con maggior dettaglio i parametri statistici descrittivi, dal punto di vista meteorologico, della rappresentatività spaziale, ai fini di una valutazione più approfondita delle potenzialità della metodologia.

L'organizzazione del Rapporto Tecnico prevede al paragrafo § 2 una sintesi delle valutazioni che hanno ispirato l'impostazione metodologica adottata per l'analisi. Al paragrafo § 3 verranno descritte le procedure di calcolo di **M-TraCE** e verrà fornito un breve resoconto delle analisi preliminari effettuate sulla metodologia (§ 3.2), prima della sua applicazione ai siti della Rete delle Stazioni Speciali (§ 3.3). Nel paragrafo § 4 verranno invece discussi i risultati ottenuti. L'insieme di tutte le analisi effettuate ha fornito non solo uno studio dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale ma anche una valutazione della variabilità di tale stima al variare delle condizioni meteorologiche sia su lungo periodo (variabilità meteorologica inter-annuale) sia su breve scala temporale, a motivo di eventuali regimi locali (§ 4.1). Al paragrafo § 4.2 verrà infine presentato, per i siti selezionati, lo studio dettagliato dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale, basato sull'integrazione dei risultati ottenuti con una più approfondita analisi territoriale e ambientale del sito attraverso l'uso dei Sistemi Informativi Geografici (GIS).

## 2 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA

La metodologia sviluppata che verrà qui descritta, finalizzata alla valutazione della rappresentatività spaziale dal punto di vista meteorologico, è basata sulla caratterizzazione del sito in esame dal punto di vista dei regimi prevalenti di trasporto delle masse d'aria.

Per caratterizzare la circolazione dominante in un sito, è pratica comune effettuare uno studio della provenienza delle masse d'aria, ossia ricostruire le traiettorie in arrivo (*backward trajectories*) nel punto in esame ed elaborare quindi, tramite opportune sintesi statistiche (frequenza di passaggi, tempi di residenza, ecc.), i risultati ottenuti da un numero sufficientemente alto di traiettorie, tale da rappresentare un buon campione statistico, descrittivo della meteorologia media tipica del sito.

Basandosi su questa logica, l'impostazione metodologica di questo studio di rappresentatività spaziale ha previsto da un lato la selezione di un modello per il calcolo delle traiettorie e dall'altro la scelta di quali parametri statistici, sintesi dei risultati ottenuti, fossero più utili per fornire indicazioni sulla rappresentatività spaziale del sito dal punto di vista meteorologico. Le considerazioni che hanno guidato, alla luce dello stato dell'arte della ricerca scientifica, queste due fasi dell'impostazione metodologica verranno descritte rispettivamente nei paragrafi § 2.1 e § 2.2.

### 2.1 Scelta del modello e della basi dati meteorologica da utilizzare per il calcolo delle traiettorie

Diversi modelli sono disponibili in letteratura per il calcolo delle traiettorie in arrivo (*backward trajectories*) o in partenza (*forward trajectories*) da un sito in esame. Uno dei più comunemente utilizzati è il modello ibrido Lagrangiano **HYSPLIT** (**H**ybrid **S**ingle **P**article **L**agrangian **I**ntegrated **T**rajectory **M**odel), sviluppato dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). Trattandosi di un software *open source*, oltre ad essere supportato e aggiornato dalla NOAA, gode anche di svariati sviluppi da parte degli utilizzatori: esiste ad esempio la versione Spain **HYSPLIT** (<http://www.ciecem.uhu.es/hysplit/index.php>) mantenuta dalla CIECEM (Universidad de Huelva) mentre, nell'ambito delle attività connesse allo sviluppo del software libero MeteoInfo è stato sviluppato il modulo TrajStat (<http://www.meteothinker.com/TrajStatProduct.aspx>) per l'integrazione e l'analisi statistica in ambiente GIS delle traiettorie prodotte da **HYSPLIT**.

Ampliamente utilizzati sono anche **FLEXTRA** (Stohl et al, 1995) e **FLEXPART** (Stohl et al, 2005), rispettivamente il modello a traiettorie e a particelle sviluppati dal NILU (Norwegian Institute for Air Research) e utilizzati da un'ampia comunità scientifica in svariati campi di applicazione (<http://transport.nilu.no/flexpart/flexpart-and-flexextra-users>).

L'ampia diffusione sia di **HYSPLIT** che di **FLEXPART** trova un'importante motivazione anche nel fatto che entrambi sono predisposti per l'interfaccia con *database* meteorologici, disponibili su scala globale.

In alcuni casi, invece, nell'ambito di studi specifici su domini limitati, per poter usufruire di campi meteorologici a più alta risoluzione, sono stati sviluppati moduli *ad hoc*. A titolo di esempio in Henne et al. (2010), oltre a **FLEXPART** è stata utilizzata anche una versione adattata di COSMO (Consortium for Small Scale Modelling) LPDM (Glaab et al., 1998), già utilizzato anche da Folini et al. (2008) per una caratterizzazione di un sito alpino. In questo modo è stato possibile usufruire, su un

dominio di estensione limitata, della disponibilità di campi meteorologici ad alta risoluzione (7 km x 7 km) prodotti da MeteoSwiss.

Per gli scopi del presente studio, volto alla caratterizzazione meteo-diffusiva di siti situati sul territorio italiano, è parso opportuno privilegiare, nella scelta della metodologia, la disponibilità di una base dati, da un lato ad alta risoluzione (per poter descrivere al meglio i regimi di circolazione in un territorio caratterizzato prevalentemente da orografia complessa) e dall'altro lato comprendente diversi anni meteorologici (per poter essere rappresentativa dal punto di vista statistico). Entrambi questi requisiti sono soddisfatti dal *database* del Sistema Modellistico Atmosferico del Modello Nazionale MINNI (<http://www.minni.org/>), che mette a disposizione, per diverse annualità, i campi meteorologici e di qualità dell'aria con passo temporale orario e a risoluzione spaziale di 20 km sul dominio nazionale, e di 4 km, su 5 domini macroregionali (Figura 1).

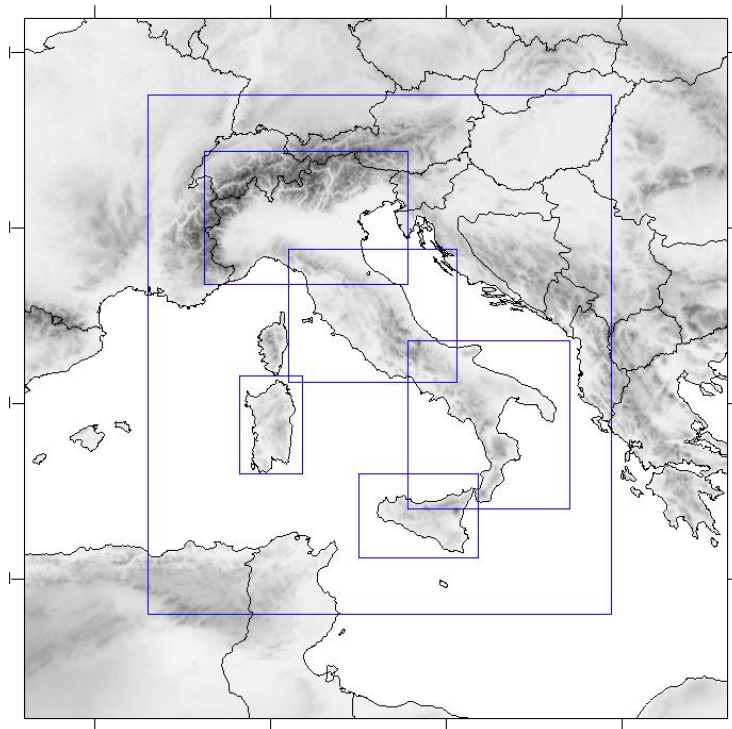


**FIGURA 1. DOMINIO NAZIONALE (RISOLUZIONE 20X20 KM<sup>2</sup>) E DOMINI MACROREGIONALI (RISOLUZIONE 4X4 KM<sup>2</sup>) DEL SISTEMA MODELLISTICO ATMOSFERICO DI MINNI.**

In particolare, nell'ambito del Sistema Modellistico di MINNI, i campi meteorologici vengono prodotti utilizzando il modello prognostico non-idrostatico RAMS (Regional Atmospheric Modelling System), sviluppato dall'Università del Colorado e basato su un sistema di coordinate verticali *terrain following* (Cotton et al., 2003). Tali caratteristiche, insieme alla possibilità di effettuare simulazioni con domini innestati (in modalità *two-way nesting*), rendono il modello adatto anche per simulazioni ad alta risoluzione. Le simulazioni vengono effettuate in modalità di *nudging* ossia assimilando, durante l'esecuzione, opportuni campi di re-analisi attraverso un termine di forzante che viene aggiunto alle equazioni della dinamica e che spinge il modello a seguire più fedelmente le osservazioni meteorologiche. I campi iniziali e i campi di re-analisi per l'assimilazione vengono prodotti da un pre-processore che utilizza in input i dati misurati della rete WMO (World Meteorological Organization) di tipo SYNOP e METAR e le analisi prodotte da ECMWF (European Centre For Medium-Range Weather Forecast) come campi di *background*.

La decisione di utilizzare la base dati meteorologica di MINNI ha comportato la necessità di sviluppare un codice *ad hoc* che consentisse l'accesso alla base dati e il calcolo delle traiettorie. Lo sviluppo del modulo, insieme alle sue principali caratteristiche, verrà descritto al paragrafo § 3.1.1.

## 2.2 Scelta dei parametri da elaborare per l'analisi statistica delle traiettorie

L'uso delle *backward trajectories* è ampiamente diffuso in letteratura, a supporto di svariate analisi.

Frequentemente le retro-traiettorie sono utilizzate per l'interpretazione di misure sperimentali. Solo per fare qualche esempio si potrebbero citare a questo proposito: Stohl et al. (2003), Seibert and Frank (2004), Rousseau et al. (2004), José et al. (2005), Artuso et al. (2007), Verma et al. (2007), Ding et al. (2009), Masiol et al. (2010), Salvador et al. (2010), Chen et al. (2011), Cohen et al. (2012), Kuang et al. (2012), Perrone et al. (2013). Tra i casi citati, le traiettorie sono spesso utilizzate per formulare o confermare ipotesi sulle possibili sorgenti emissive responsabili dei dati di concentrazione misurati. In particolare esse sono usate a supporto di analisi per l'identificazione del contributo di sorgenti naturali, come gli incendi (Pace et al., 2005; Bourcier et al., 2010), i vulcani (Schäfer et al., 2010) o il trasporto di sabbie sahariane (Rodríguez et al., 2001; Viana et al., 2002; Petit et al., 2005; Marenco et al., 2006; Meloni et al., 2007; Papayannis et al., 2008; Hussein et al., 2011; Ciardini et al., 2012; Valenzuela et al., 2012; Remoundaki et al., 2013).

L'uso delle *backward trajectories* va talvolta al di là delle tipiche applicazioni a supporto della qualità dell'aria. Sono ad esempio utilizzate per interpretare i dati di misura di radionuclidi forniti dalla rete di monitoraggio del CTBT (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treat) e in particolare, nel caso di rilevamento di radionuclidi, per fornire ipotesi di localizzazione di sorgenti, associate a possibili test nucleari (Becker et al., 2007).

Nei diversi casi sopracitati, l'utilizzo delle *backward trajectories* spazia dalla semplice ricostruzione di traiettorie che aiutino ad interpretare un singolo specifico evento, ad analisi statistiche su ampi campioni di traiettorie per identificare ad esempio i regimi di flusso prevalenti e conseguentemente le principali regioni di influenza. In Henne et al. (2008) un'analisi di cluster su un ampio campione statistico di *backward trajectories* è finalizzata all'identificazione dei regimi prevalenti di flusso responsabili delle misure di CO ed O<sub>3</sub> effettuate presso la stazione del Monte Kenya, installata nell'ambito del programma Global Atmosphere Watch (GAW) del WMO.

In Folini et al. (2009) è presentata un'elaborazione statistica di *backward trajectories* per la caratterizzazione, in termini di "regione di influenza", di 13 siti di misura rurali. La regione di influenza è definita come l'area attorno al sito le cui emissioni si può ritenere forniscano un contributo sostanziale alle concentrazioni misurate nel sito in esame. In questo studio l'elaborazione statistica delle traiettorie si basa sull'integrazione su una griglia definita, dei tempi di residenza delle masse d'aria e tiene quindi conto sia della frequenza dei passaggi sia del tempo effettivamente trascorso dalla massa d'aria in ciascuna cella di calcolo.

Sono invece più rari in letteratura gli studi che, basati sul calcolo e l'elaborazione statistica delle *backward trajectories*, siano più direttamente finalizzati agli scopi del lavoro qui presentato, ossia alla caratterizzazione dal punto di vista meteorologico dell'area di rappresentatività spaziale di un sito.

In Vana and Tamm (2002) è presentato uno studio di rappresentatività spaziale che fa uso anche di traiettorie calcolate da **HYSPLIT**, ma queste ultime sono calcolate e utilizzate solo a supporto di un metodo basato sulla disponibilità di diverse misure sperimentali.

In Henne et al. (2010) è presentato un interessante approccio che propone la formulazione di parametri descrittivi della rappresentatività spaziale, ai fini di una classificazione dei siti di misura non più basata sugli attuali criteri soggettivi ma su dati oggettivi. Nell'ambito di questo studio, le *backward trajectories* vengono utilizzate per definire, attraverso l'integrazione dei tempi di residenza, la *catchment area*, un'area di interesse attorno a ciascun sito all'interno della quale vengono calcolati i flussi di emissione e di deposizione degli inquinanti insieme alla loro variabilità. Sull'insieme dei parametri descrittivi dei flussi e delle loro variazioni, ottenuti per ciascun sito, viene effettuata un'analisi di cluster che porta ad una classificazione dei siti in esame basata su dati oggettivi. Lo scopo dello studio rimane comunque la classificazione, non i parametri calcolati allo scopo di effettuarla. Tali parametri sono infatti calcolati non come numeri rappresentativi in sé, ma finalizzati all'analisi di cluster. Vengono ad esempio presentati anche tests di sensitività che mostrano in che misura, al variare delle parametrizzazioni adottate e quindi dei parametri descrittivi calcolati, cambi la classificazione ottenuta.

La proposta che più si avvicina ad una quantificazione dell'area di rappresentatività basata su una caratterizzazione di tipo anemologico, tramite elaborazione statistica di *backward trajectories*, è presentata in Spangl et al. (2007). Il lavoro, che contiene un'ampia rassegna di metodologie per la stima dell'area di rappresentatività, a partire da basi informative diverse (emissioni, concentrazioni, condizioni di dispersione, ecc.), dedica un paragrafo alla definizione della “*massima estensione dell'area di rappresentatività*”. Essa viene definita in relazione ai tempi che caratterizzano le trasformazioni chimiche degli inquinanti in atmosfera durante il trasporto. La massima estensione dell'area di rappresentatività è la distanza percorsa dalla massa d'aria in un arco di tempo rappresentativo dei tempi di scala delle reazioni chimiche che la coinvolgono in atmosfera. In altre parole, la concentrazione di un inquinante misurata in un sito è rappresentativa di altro sito se la distanza tra i due punti è stata percorsa dalla massa d'aria in un tempo inferiore ai tempi delle trasformazioni chimiche che coinvolgono quell'inquinante. Nel testo viene proposto il calcolo del tempo medio di trasporto delle masse d'aria attorno ad un sito, attraverso l'analisi statistica di un ampio campione di *backward trajectories*. A titolo di esempio, in Figura 2 (tratta da Spangl et al., 2007) è presentata la mappa del tempo medio di trasporto delle masse d'aria in arrivo presso il sito di Illmitz (Austria) della rete EMEP. La mappa è elaborata a partire da un ampio campione di traiettorie, calcolate su un quinquennio (dal 2000 al 2005) sulla base dei dati meteorologici dell'ECMWF.

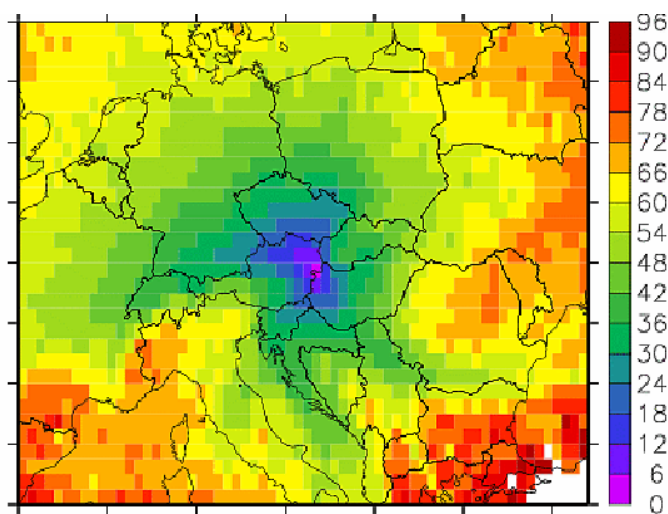


**FIGURA 2. TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (h) DELLE MASSE D'ARIA IN ARRIVO PRESSO LA STAZIONE DI ILLMITZ (AUSTRIA) DELLA RETE EMEP. FIGURA DA SPANGL ET AL. (2007), PAG 90.**

La Figura 2 rappresenta un esempio di caratterizzazione esclusivamente meteorologica del sito, indipendente dall'inquinante di cui si voglia studiare la rappresentatività spaziale. Sono poi i tempi di vita in atmosfera di ciascun inquinante (qualora sia possibile stimarli) a guidare a posteriori l'interpretazione della mappa stessa, ai fini della definizione di una massima area di rappresentatività. Se ad esempio si vuole definire l'area di rappresentatività del sito per la misura di un inquinante caratterizzato da tempi di scala delle reazioni chimiche dell'ordine di 12 ore, l'area massima di rappresentatività sarà identificata in figura dalle celle fucsia e viola; se il tempo di scala fosse di un giorno l'area di rappresentatività massima si spingerebbe fino alle celle in blu, e così via.

Complessivamente comunque, alla luce della ricerca bibliografica effettuata, non è emersa, a conoscenza degli autori, la disponibilità di metodologie condivise dalla comunità scientifica, per la stima della rappresentatività spaziale sulla base dell'elaborazione statistica di *backward trajectories*.

Alla luce degli studi a disposizione, e in particolare dell'assenza di riferimenti per una stima quantitativa, è parso opportuno elaborare, a partire da un ampio campione di traiettorie, diverse sintesi statistiche che potessero fornire una descrizione qualitativa ma completa del sito dal punto di vista della caratterizzazione anemologica. In particolare le traiettorie sono state elaborate per fornire, su una definita griglia di calcolo (alla stessa risoluzione dei campi di vento utilizzati per le traiettorie), le seguenti informazioni:

- Il **conteggio dei passaggi** delle traiettorie (in termini **assoluti** e **percentuali**) per identificare i regimi prevalenti di circolazione e quindi le principali regioni di influenza;
- Il **tempo di permanenza** delle masse d'aria, in accordo con Folini et al. (2009) ed Henne et al. (2010), per tener conto sia della frequenza dei passaggi sia del tempo effettivamente trascorso dalla massa d'aria in ciascuna cella di calcolo;
- Il **tempo medio di trasporto**, in accordo con Spangl et al. (2007), per la definizione dell'area massima di rappresentatività spaziale, in relazione alla scala temporale delle reazioni che avvengono in atmosfera;
- Informazioni sulla quota delle masse d'aria (**quota media, massima, minima**) per non perdere l'informazione della quota, nelle analisi bidimensionali descritte sopra.

Per l'elaborazione di queste 7 sintesi statistiche, da valutare nel loro insieme come parametri descrittivi della rappresentatività spaziale, è stata sviluppata una specifica procedura di elaborazione statistica, che verrà descritta al § 3.1.2.

### 3 CALCOLO ED ELABORAZIONE STATISTICA DELLE TRAIETTORIE

In questo capitolo verranno descritte tutte le analisi effettuate, a partire dai dettagli relativi al calcolo e in particolare allo sviluppo delle procedure di **M-TraCE** (MINNI module for Trajectories Calculation and statistical Elaboration), descritte al § 3.1.

Verrà fornito anche un breve resoconto delle analisi preliminari effettuate sulla metodologia (§ 3.2), prima della sua applicazione ai siti della Rete delle Stazioni Speciali (§ 3.3).

#### 3.1 Sviluppo dei moduli di M-TraCE: codice per il calcolo delle traiettorie e procedura per l'elaborazione statistica

**M-TraCE** è l'insieme delle procedure sviluppate per il calcolo e l'elaborazione statistica delle traiettorie, a partire dai dati meteorologici del Modello Nazionale MINNI. Per consentire un rapido accesso allo *storage* MINNI (evitando onerosi trasferimenti di dati), tutte le procedure sono state sviluppate nell'ambiente della GRID-ENEA e possono pertanto usufruire delle risorse computazionali rese disponibili dalla GRID stessa.

Vengono qui forniti maggiori dettagli sull'insieme delle procedure di **M-TraCE**, in particolare sui suoi moduli principali:

- ~ *back\_traj.ncl* per il calcolo di una singola traiettoria (§ 3.1.1)
- ~ *back\_traj\_cycle.sh* per la sottomissione automatica del calcolo di traiettorie multiple (§ 3.1.1)
- ~ *back\_traj\_stat\_elab.sh* per elaborazione statistica di un campione di traiettorie (§ 3.1.2).

##### 3.1.1 Calcolo delle *backward trajectories*

Per quanto riguarda il calcolo delle *backward trajectories*, il codice sviluppato (*back\_traj.ncl*) si ispira, nel suo nucleo di calcolo a quanto formulato anche da **HYSPLIT**.

Sia  $P(t)$ , la posizione della massa d'aria all'istante  $t$ , la sua posizione all'istante  $(t-\Delta t)$  è data dalla relazione

$$P(t - \Delta t) = P(t) - 0.5 \times [V(P, t) + V(P', t - \Delta t)] \times \Delta t$$

EQUAZIONE 1

dove  $V(P, t)$  è il vettore tridimensionale della velocità del vento e  $P'(t-\Delta t)$ , è la posizione di *first-guess*, calcolata a partire dalla posizione iniziale:

$$P'(t - \Delta t) = P(t) - V(P, t) \times \Delta t$$

EQUAZIONE 2

Date le coordinate del punto di partenza della traiettoria, il codice di calcolo accede alla base dati meteorologica di MINNI (in particolare ai campi tridimensionali di vento) e, iterando il calcolo dell'Equazione 1, ricostruisce, *time step* dopo *time step* e per tutta la durata temporale della traiettoria, il percorso compiuto dalla massa d'aria in arrivo nel punto in esame. Il codice sviluppato è stato scritto in linguaggio NCL (Jonson et al., 2010; Zender, 2008), linguaggio che consente un'agile

esplorazione ed elaborazione su files dati in formato netCDF (il formato dei files del data base MINNI).

La sottomissione del codice avviene tramite una procedura Linux, attraverso la quale l'utilizzatore può selezionare le principali caratteristiche della traiettoria da calcolare. In particolare vengono definiti:

- ✓ le coordinate del punto di arrivo della traiettoria e il dominio di interesse (il dominio nazionale a 20 km di risoluzione o il dominio macroregionale a 4 km di risoluzione contenente il punto in esame)
- ✓ la quota di arrivo della traiettoria rispetto al suolo
- ✓ la data e l'ora di arrivo della traiettoria
- ✓ la lunghezza temporale della traiettoria
- ✓ il *time step* da utilizzare nel calcolo discreto della traiettoria (Equazione 1).

Il codice produce in output il percorso (tridimensionale) della traiettoria, fornito sia attraverso un file in formato testo, sia attraverso la sua corrispondente elaborazione grafica (Figura 3).

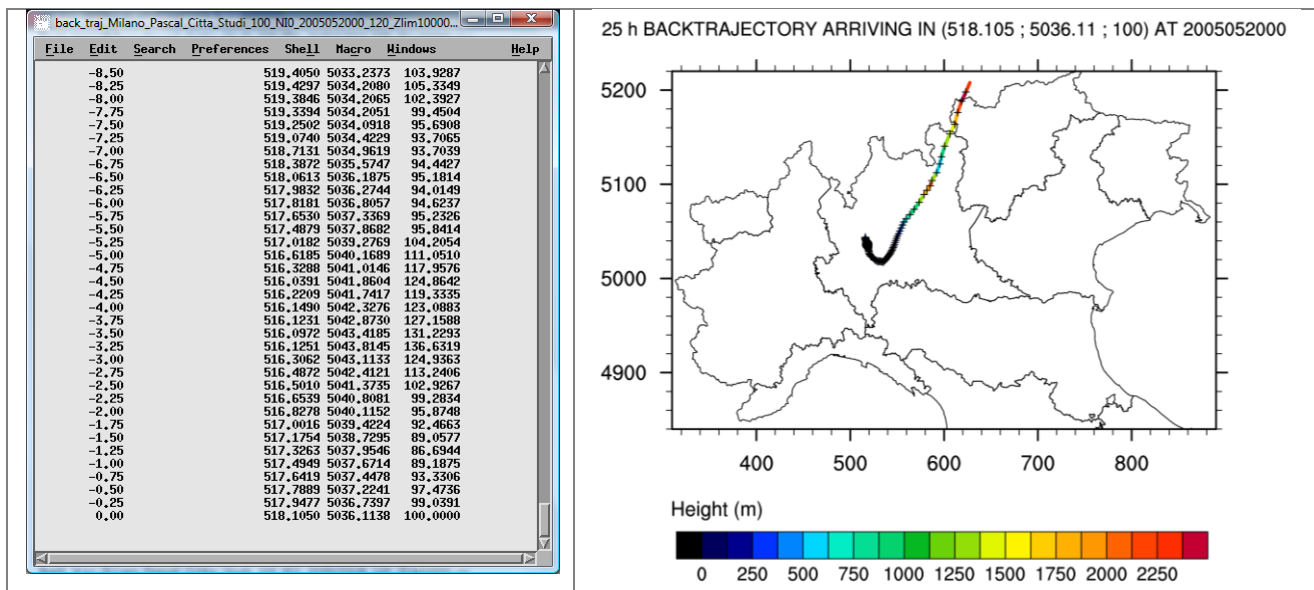


FIGURA 3. UN ESEMPIO DI OUTPUT DEL CODICE DI CALCOLO DELLE TRAIETTORIE (BACK\_TRAJ.NCL).

Viene inoltre prodotto un file di supporto in formato netCDF (Figura 4), contenente, sulla griglia del dominio di calcolo, per ciascuna delle celle interessate dal passaggio della traiettoria, tutte le informazioni necessarie per la successiva elaborazione statistica dei parametri scelti (§ 2.2): *flag* di passaggio, tempo di permanenza, tempo di trasporto, quota.

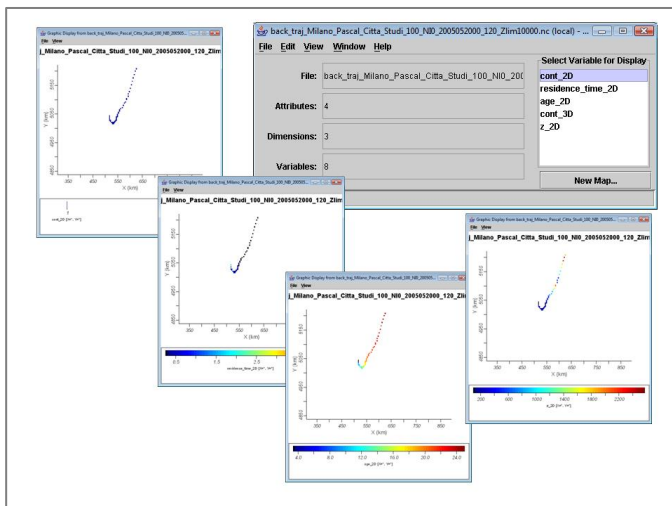


FIGURA 4. CONTENUTO DEL FILE NETCDF CON LE INFORMAZIONI RELATIVE ALLA TRAIETTORIA DI FIGURA 3.

Il codice *back\_traj.ncl* è predisposto per il calcolo di una singola traiettoria in arrivo in un fissato sito in esame. Per scopi analoghi a quelli del presente studio è spesso necessario poter disporre di un ampio campione di traiettorie per la successiva elaborazione statistica. E' stata pertanto sviluppata un'ulteriore procedura (*back\_traj\_cycle.sh*) per l'impostazione e la sottomissione automatica del codice di base (*back\_traj.ncl*) su casi multipli e quindi per il calcolo delle traiettorie in arrivo a diverse ore della giornata di ciascun giorno per lunghi periodi (fino ad un anno).

### 3.1.2 Analisi statistica delle *backward trajectories*

Calcolato un ampio campione di traiettorie in arrivo in un sito, un'ulteriore procedura di **M-TraCE** provvede infine all'analisi statistica delle stesse per il calcolo dei parametri sintetici.

La procedura sviluppata (*back\_traj\_stat\_elab.sh*), basata sull'utilizzo degli operatori NCO (<http://nco.sourceforge.net/>), provvede, per un intervallo temporale fissato ed, eventualmente, ad ora fissata, all'esplorazione dei files contenenti le informazioni relative alle singole traiettorie e al calcolo dei 7 parametri sintetici scelti (§ 2.2). In output la procedura produce un file (in formato netCDF) contenente: conteggio dei passaggi (assoluto e percentuale), tempo di residenza integrato su tutte le traiettorie a disposizione, tempo medio di trasporto, quota media, quota massima, quota minima. Inoltre, per ciascuno dei 7 parametri statistici viene prodotto automaticamente in output anche un file contenente la corrispondente visualizzazione.

## 3.2 Verifica preliminare della metodologia sviluppata

Un test preliminare della metodologia sviluppata è stato effettuato sia per quel che riguarda gli algoritmi di calcolo, verificandone la coerenza con il modello **HYSPLIT** (§ 3.2.1), sia per quel che riguarda l'input meteorologico, valutando, tramite un'analisi di sensibilità, l'effetto sui risultati dovuto alla variazione della basi dati meteorologica utilizzata per il calcolo delle traiettorie (§ 3.2.2).

Per i tests descritti in questo paragrafo si è scelto di ricostruire le traiettorie in arrivo nel sito del Centro ENEA di Trisaia (coordinate UTM32, WGS84: x=1150852 m; y=4473597 m), situato nel comune di Rotondella (MT), dove nei mesi di maggio e giugno 2010 è stata condotta da ENEA, e finanziata dal MATTM, un'intensa campagna sperimentale finalizzata alla validazione del Sistema Modellistico Atmosferico di MINNI.

In tale contesto, i campi meteorologici relativi ai due mesi di campagna sono stati calcolati alle due risoluzioni tipiche del Sistema Modellistico Atmosferico di MINNI, ossia alla risoluzione di 20 km sul dominio di riferimento nazionale e alla risoluzione di 4 km sulla macroregione del Sud Italia (Figura 1), comprendente il sito della campagna sperimentale di validazione. La disponibilità di un ampio *database* sperimentale da utilizzare per la validazione ha fornito inoltre l'occasione per un primo test di discesa di scala del Sistema Modellistico a più alta risoluzione (1 km) su un dominio più piccolo.

Oltre ai campi meteorologici prodotti da MINNI (RAMS) e validati sui dati sperimentali raccolti durante la campagna, sono a disposizione, per i due mesi simulati, sul dominio del Sud Italia a 4 km di risoluzione, anche i campi prodotti da MOLOCH (Malguzzi et al., 2006), un modello prognostico non-idrostatico sviluppato e supportato dall'Istituto ISAC del CNR ([http://www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/moloch\\_short\\_description\\_2012.htm](http://www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/moloch_short_description_2012.htm)). In particolare MOLOCH viene utilizzato operativamente in modalità previsionale, attività promossa nell'ambito di una Intesa tra l'Istituto e il Dipartimento della Protezione Civile nazionale.

La disponibilità di due basi dati indipendenti ha fornito, per il presente studio, un'interessante occasione per effettuare un'analisi di sensibilità della metodologia all'input meteorologico (§ 3.2.2).

### 3.2.1 Verifica degli algoritmi di calcolo sviluppati, tramite confronto con HYSPLIT

La verifica degli algoritmi di calcolo sviluppati è stata effettuata calcolando ed elaborando tramite **M-TraCE** le *backward trajectories* in arrivo nel sito di Trisaia durante i due mesi della campagna sperimentale ENEA, e verificando la coerenza dei risultati con quelli ottenuti calcolando le stesse traiettorie tramite il modello **HYSPLIT** (per il quale è stata utilizzata la versione *free* per PC, scaricabile al sito [http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_hytrial.php](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_hytrial.php)).

Le traiettorie sono state calcolate dal 6 maggio al 30 giugno 2010. Coerentemente con quanto programmato per l'analisi sui siti della Rete delle Stazioni Speciali (§ 3.3), le traiettorie sono state ricostruite fino ad un massimo di 5 giorni precedenti all'arrivo a Trisaia ed è stata scelta come quota di arrivo la quota di 100 m. Inoltre, per rappresentare al meglio un eventuale effetto di variabilità giornaliera del regime anemologico, per le traiettorie non si è considerata un'unica ora di arrivo nella giornata ma, per ciascun giorno, quattro diverse ore (0, 6, 12 e 18).

Per il calcolo delle traiettorie sono stati utilizzati da **M-TraCE** i campi di vento prodotti dal Sistema Modellistico MINNI a 4 km di risoluzione sul macrodominio regionale del Sud-Italia (Figura 1).

La traiettorie di **HYSPLIT** sono state invece calcolate utilizzando uno dei *database* già predisposti per l'interfaccia con il modello. Si è scelto di utilizzare i dati di Reanalisi dell'archivio NCEP/NCAR (Kalnay et al.,1996), disponibili alla risoluzione spaziale di 2.5°x2.5° sul dominio globale e, solo sul dominio degli Stati Uniti, anche alla risoluzione di 1°x1°.

Le principali caratteristiche delle traiettorie, calcolate per il caso studio di Trisaia con i due differenti approcci (**M-TraCE** ed **HYSPLIT**), sono sintetizzate in Tabella 1.

|                                                 | <b>M-TraCE</b>                                                               | <b>HYSPLIT</b>                 |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Periodo Simulato</b>                         | 6 maggio - 30giugno                                                          | 6 maggio - 30giugno            |
| <b>Ora di Arrivo delle Traiettorie</b>          | 0, 6,12,18                                                                   | 0,6,12,18                      |
| <b>Quota di Arrivo delle Traiettorie</b>        | 100 m                                                                        | 100 m                          |
| <b>Lunghezza delle Traiettorie (h)</b>          | Fino all'uscita del dominio MINNI Sud-Italia o fino ad un massimo di 120 ore | 120 ore                        |
| <b>Input Meteorologico</b>                      | <i>Database</i> MINNI                                                        | NCEP/NCAR<br><i>Reanalysis</i> |
| <b>Risoluzione spaziale dei campi di vento</b>  | 4 km x 4 km                                                                  | 2.5° x 2.5°                    |
| <b>Risoluzione temporale dei campi di vento</b> | 1 ora                                                                        | 6 ore                          |

**TABELLA 1. TRAIETTORIE CALCOLATE CON M-TraCE ED HYSPLIT: SINTESI DELLE PRINCIPALI CARATTERISTICHE.**

Delle 224 traiettorie calcolate per ciascuno dei due approcci, in Figura 5 vengono presentati, a titolo di esempio, alcuni casi rappresentativi di diversi regimi anemologici. Dall'alto al basso: le traiettorie in arrivo il 6 maggio alle ore 0 (prima traiettoria calcolata), il 21 maggio alle 18 e l'11 giugno alle 18. E'

evidente il sostanziale accordo delle traiettorie calcolate da **M-TraCE** (a sinistra) con quanto previsto da **HYSPLIT** (a destra).

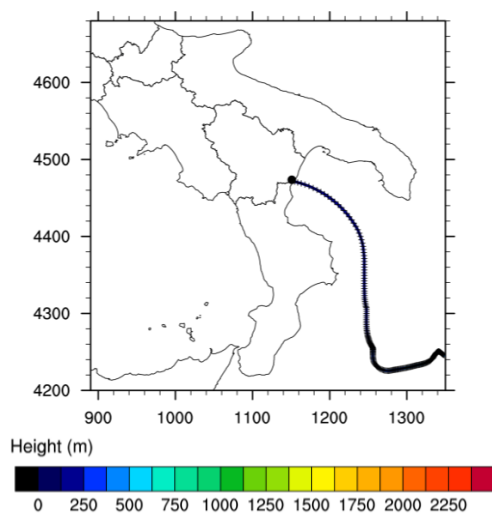
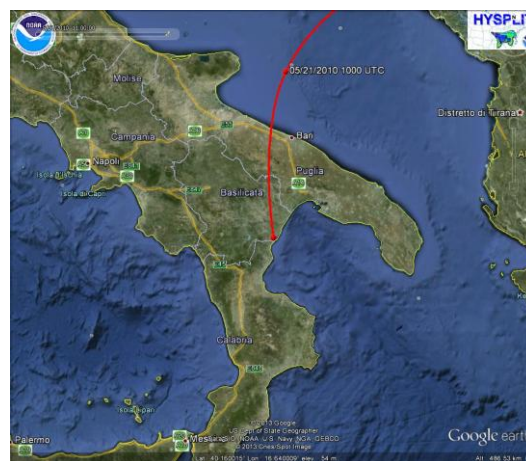
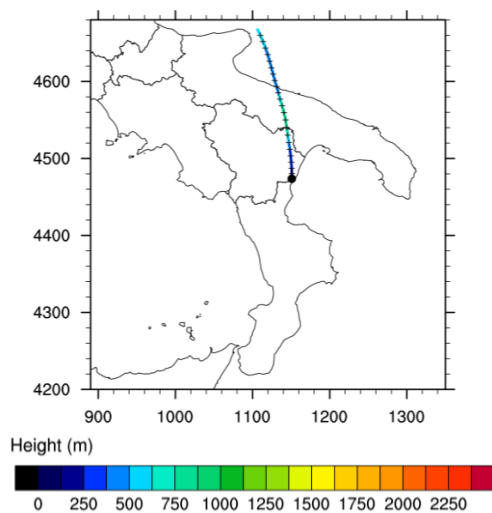
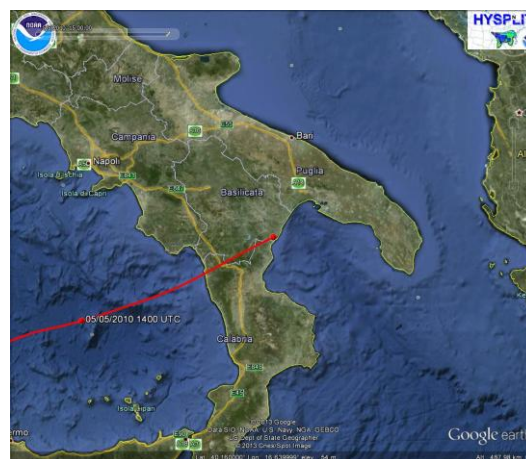
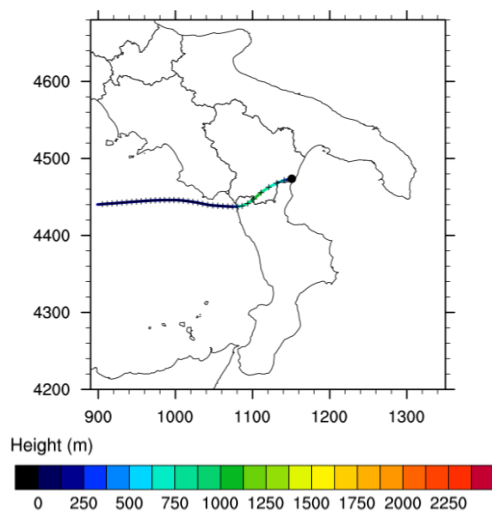


**FIGURA 5. CONFRONTO TRA LE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TRISAIA CALCOLATE DA M-TraCE (SINISTRA) E DA HYSPLIT (DESTRA) PER ALCUNI GIORNI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE ENEA.**

Una sintesi dei risultati ottenuti è presentata in Figura 6 dove i due approcci sono confrontati in termini di conteggio, per ciascuna cella, della percentuale dei passaggi (calcolata sull'insieme di tutte le 224 traiettorie a disposizione).

La percentuale dei passaggi è uno dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale, calcolati dal modulo di elaborazione statistica di **M-TraCE** (§ 3.1.2). Per quel che riguarda **HYSPLIT**, tale elaborazione statistica è stata effettuata utilizzando la funzione Trajectory/Display/Frequency, il cui output è stato successivamente convertito per l'importazione in ambiente GIS (Geographic Information System). Nel calcolo della frequenza dei passaggi si è scelto di campionare alla massima risoluzione consentita (0.25°).

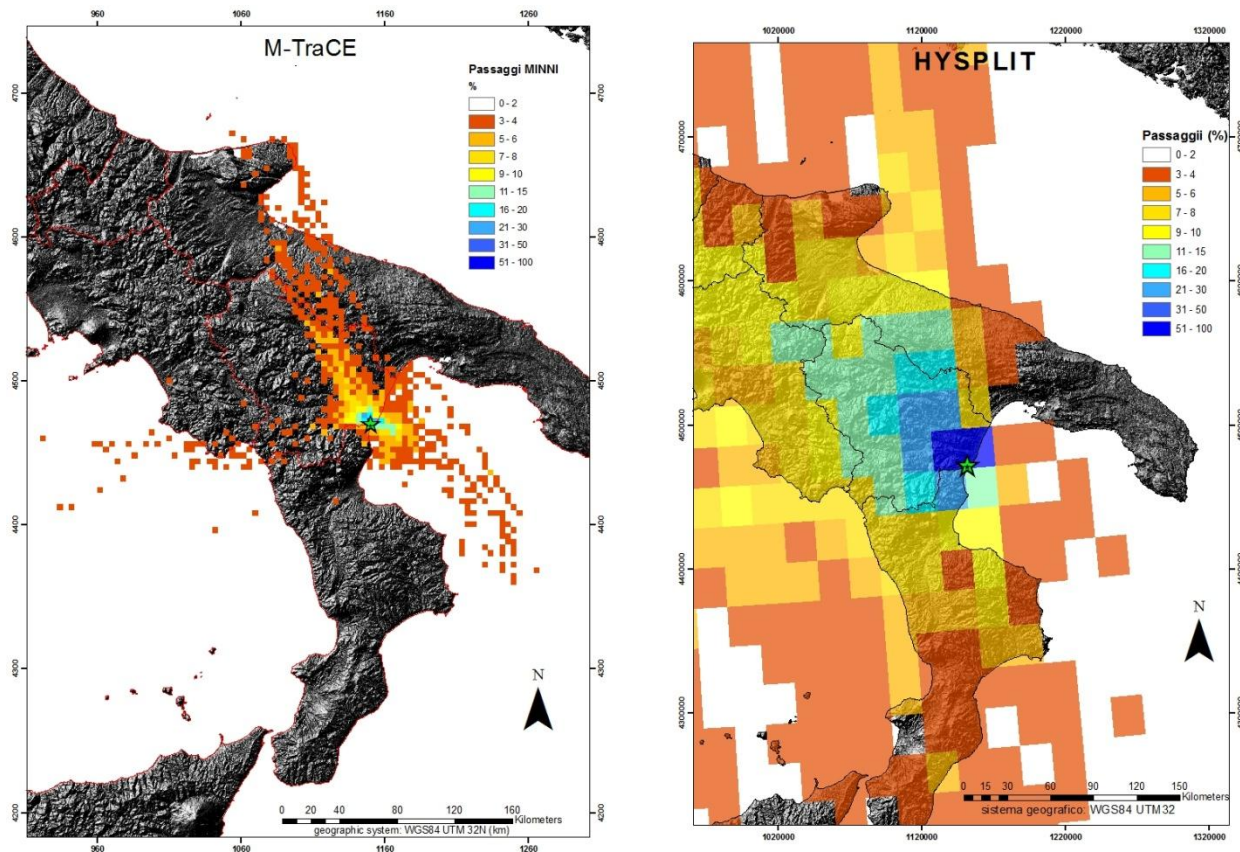


**FIGURA 6. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TRISAIA: STATISTICA ELABORATA SUL PERIODO MAGGIO-GIUGNO 2010 (4 TRAIETTORIE CALCOLATE OGNI GIORNO: ALLE ORE 0, 6, 12 E 18).CONFRONTO TRA L'ELABORAZIONE FORNITA DA M-TraCE (SINISTRA) E QUELLA FORNITA DA HYSPLIT (DESTRA).**

All'interno di una sostanziale coerenza dei risultati ottenuti, già evidenziata in Figura 5, l'effetto della diversa risoluzione spaziale della base dati meteorologica e della griglia di campionamento utilizzata per analisi statistica è ben visibile nel confronto tra i risultati di Figura 6. L'elaborazione ottenuta con **HYSPLIT**, essendo a più bassa risoluzione, tende a “spalmare” i campi dei passaggi percentuali e a dare risultati più approssimati e meno descrittivi della circolazione locale, fondamentale caratterizzata dal regime di brezza terra-mare, ben evidenziato invece dall'elaborazione ottenuta con **M-TraCE**.

E' chiaro quindi il valore aggiunto apportato dall'utilizzo di campi di vento a più alta risoluzione a conferma della validità dell'ipotesi di lavoro descritta in § 2.1.

### 3.2.2 Analisi di sensibilità all'input meteorologico

Nel contesto delle simulazioni modellistiche del caso studio di Trisaia, per quel che riguarda i campi meteorologici a 4 km di risoluzione sul dominio del Sud-Italia, si è avuta la disponibilità, oltre che dei campi calcolati da MINNI, anche di quelli prodotti da MOLOCH. La disponibilità di queste due basi di dati, indipendenti e autonomamente validate, ha consentito di effettuare un'analisi di sensibilità della metodologia all'input meteorologico.

Le 224 traiettorie, descrittive dei due mesi della campagna sperimentale (4 traiettorie al giorno dal 6 maggio al 30 giugno 2010, in arrivo alle 4 diverse ore della giornata), già calcolate da **M-TraCE** sui campi di vento prodotti da MINNI (§ 3.2.1), sono state calcolate anche sui campi prodotti da MOLOCH. A parte il diverso input meteorologico, sono state mantenute le stesse impostazioni di calcolo descritte in Tabella 1 (colonna **M-TraCE**).

In Figura 7 vengono presentati i confronti delle traiettorie calcolate da **M-TraCE**, utilizzando le due diverse basi dati. Le traiettorie presentate (relative agli stessi casi di Figura 5) mostrano un buon accordo ed indicano quindi una sostanziale coerenza dei campi di vento prodotti da MINNI e da MOLOCH.

Appaiono in buon accordo anche i campi dei conteggi percentuali delle traiettorie (Figura 8), elaborati dal modulo di elaborazione statistica di **M-TraCE** sull'insieme delle 224 traiettorie calcolate a partire dai due diversi input meteorologici. In particolare viene ben rappresentato in entrambi i casi il regime prevalente di brezza terra-mare. Nel contesto di una sostanziale coerenza della descrizione anemologica fornita dai due modelli, si osserva però che le elaborazioni ottenute a partire dai campi di vento prodotti da MOLOCH sono caratterizzate da un maggior numero di provenienze di vento da mare, mentre una tendenza opposta, seppur lieve, si osserva nella caratterizzazione elaborata a partire dai campi di vento prodotti da MINNI.

Il confronto tra i campi dei conteggi (presentati in Figura 8) è reso più esplicito in Figura 9 dove è presentato in termini di differenza tra i due campi. Oltre a quanto già osservato (maggiore frequenza di casi di provenienza da mare simulati da MOLOCH e viceversa di casi di provenienza da terra simulati da MINNI), il campo delle differenze consente anche di notare che, relativamente alle traiettorie provenienti da mare, MINNI tende a concentrarle nella direzione perpendicolare alla linea di costa, coerentemente con quanto atteso in regime di brezza, mentre MOLOCH presenta diversi casi di traiettorie provenienti da direzioni ruotate più a sud, in particolare dalla direzione tangente alla costa calabra.

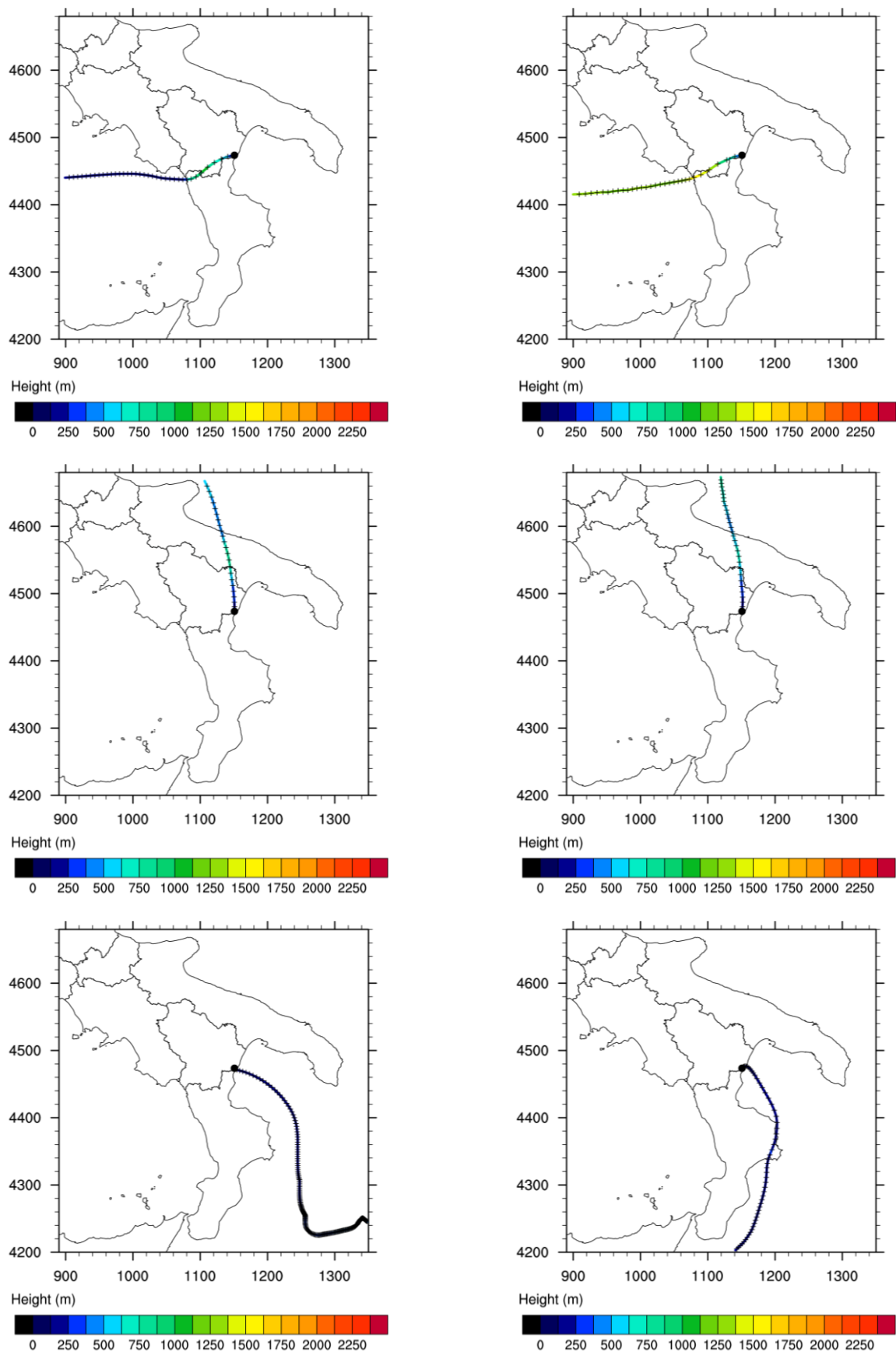


**FIGURA 7. CONFRONTO TRA LE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TRISAIA CALCOLATE DA M-TraCE UTILIZZANDO I CAMPI DI VENTO PRODOTTI DA MINNI (SINISTRA) E DA MOLOCH (DESTRA) PER ALCUNI GIORNI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE ENEA.**

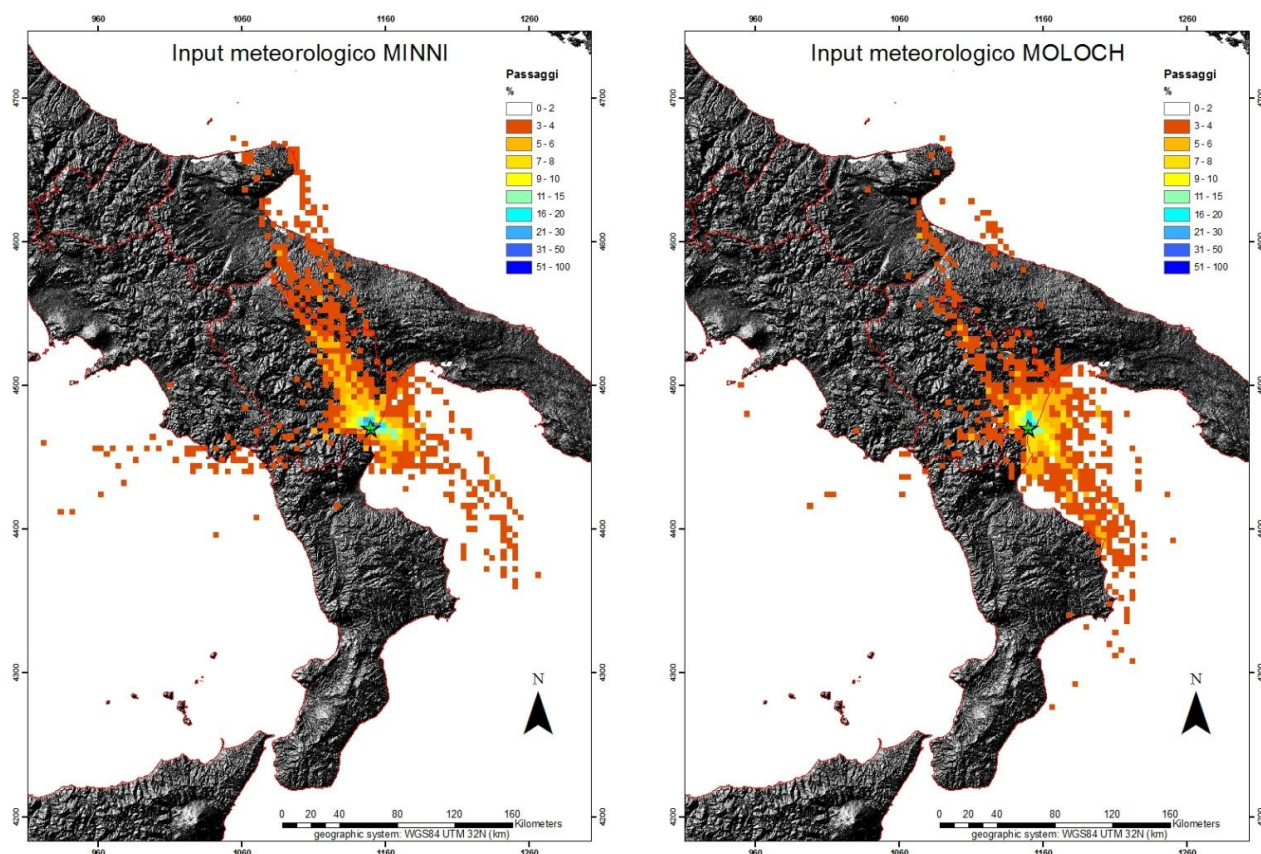


**FIGURA 8. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TRISAIA: STATISTICA CALCOLATE SUL PERIODO MAGGIO-GIUGNO 2010 (4 TRAIETTORIE CALCOLATE OGNI GIORNO:ALLE ORE 0, 6, 12 E 18). RISULTATI OTTENUTI UTILIZZANDO I CAMPI METEOROLOGICI PRODOTTI DA MINNI (SINISTRA) E DA MOLOCH (DESTRA).**

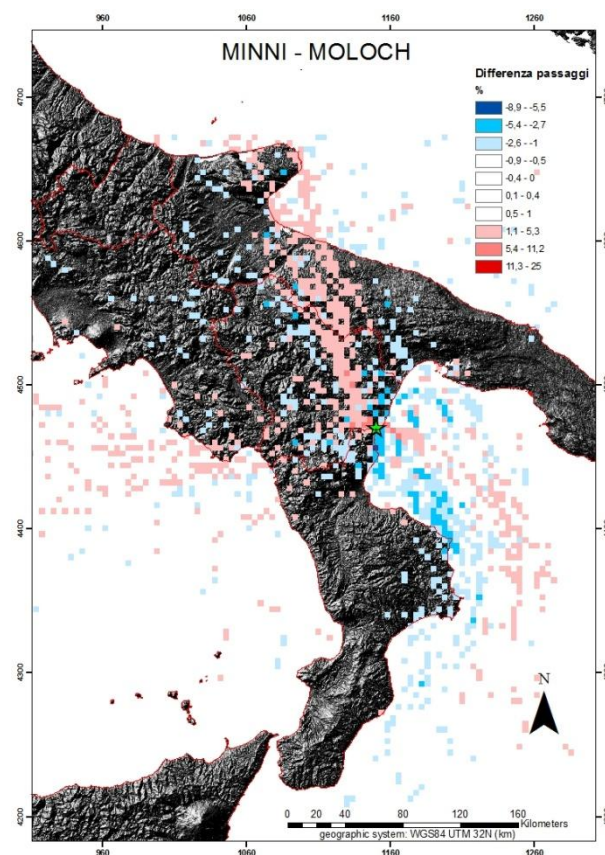


**FIGURA 9. DIFFERENZA TRA I CAMPI DELLE PERCENTUALI DI PASSAGGI PRESENTATI IN FIGURA 8: MINNI - MOLOCH.**

Complessivamente i risultati delle verifiche preliminari, qui mostrate e discusse, sono incoraggianti. La metodologia sviluppata è stata verificata e ritenuta coerente con quanto simulato dal modello **HYSPLIT**. Inoltre i risultati hanno mostrato chiaramente il valore aggiunto apportato dall'utilizzo di campi di vento a più alta risoluzione, la cui qualità è stata a sua volta valutata tramite il confronto con le elaborazioni ottenute a partire da una base dati meteorologica indipendente.

### **3.3 Calcolo delle traiettorie per i siti della Rete delle Stazioni Speciali ed analisi statistica su un triennio meteorologico**

L'analisi di rappresentatività spaziale, basata sul calcolo e l'elaborazione delle *backward trajectories*, è stata effettuata su tutti i siti della Rete delle Stazioni Speciali, delle quali in Tabella 2 viene fornito l'elenco, aggiornato al DM 29 novembre 2012 ("Individuazione delle stazioni speciali di misurazione della qualità dell'aria previste dall'articolo 6, comma 1, e dall'articolo 8, commi 6 e 7 del decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155" - GU n. 299 del 24 dicembre 2012). Le stazioni sono riportate in Tabella 2, con le rispettive caratteristiche. Il campo "codice" riporta il valore del codice nazionale di identificazione della stazione, tranne che nei casi delle stazioni ISS e Montelibretti, non facenti parte della rete nazionale. Le coordinate X e Y sono espresse in proiezione UTM, fuso 32, datum WGS84, unità di misura metri. I campi "tipo" e "zona" fanno riferimento alla classificazione EoI (European Council, 1997).

Le traiettorie in arrivo in ciascun sito sono state calcolate utilizzando i campi di MINNI a 4 km di risoluzione e sono state ricostruite fino all'uscita dal corrispondente dominio di appartenenza (Figura 1), ponendo comunque alla traiettoria un limite massimo di 120 ore (5 giorni); per ciascun sito, cioè, sono stati ricostruiti i percorsi delle masse d'aria fino al massimo di 5 giorni precedenti all'arrivo nel punto considerato.

Per la quota di arrivo delle traiettorie, tenuto conto di quanto proposto in letteratura (Henne et al., 2010; Folini et al., 2009; Spangl et al. 2007), è stato scelto il valore di 100 m.

Attraverso la procedura *back\_traj\_cycle.sh*, sviluppata per la sottomissione automatica di un grande numero di traiettorie (§ 3.1.1), sono state calcolate le traiettorie in arrivo in ciascuno dei siti a quattro diverse ore della giornata (0, 6, 12, 18) per tutti i giorni dell'anno, estendendo l'analisi a tre annualità della base dati MINNI (2003, 2005, 2007). Si è scelto di calcolare le traiettorie in arrivo a diverse ore del giorno per rappresentare al meglio un eventuale effetto di variabilità giornaliera del regime anemologico ed è stata estesa l'analisi a tre intere annualità per poter disporre di un'ampia e rappresentativa base statistica.

| LOCALIZZAZIONE           | DENOMINAZIONE                   | CODICE  | X       | Y       | TIPO      | ZONA   | INQUINANTE                                     |
|--------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|-----------|--------|------------------------------------------------|
| Schivenoglia (MN)        | Schivenoglia                    | 302072  | 663586  | 4986921 | Fondo     | Rurale | PM2.5, Metalli, O <sub>3</sub>                 |
| Ripatransone (AP)        | Ripatransone                    | 1104411 | 890095  | 4771057 | Fondo     | Rurale | PM2.5, IPA, Metalli                            |
| Santa Maria Cerrate (LE) | Santa Maria Cerrate             | 1607576 | 1273385 | 4518734 | Fondo     | Rurale | PM2.5                                          |
| Pordenone                | Pordenone centro                | 609303  | 783427  | 5096361 | Traffico  | Urbano | IPA                                            |
| Milano                   | Milano Pascal_Citta Studi       | 301568  | 518104  | 5036114 | Fondo     | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                               |
| Milano                   | Milano Senato                   | 301537  | 515434  | 5035238 | Traffico  | Urbano | IPA                                            |
| Padova                   | PD_Mandria                      | 502808  | 722452  | 5028087 | Fondo     | Urbano | IPA, PM2.5, PM10, Precursori di O <sub>3</sub> |
| Sondrio                  | Centro_v_Paribelli              | 311406  | 567877  | 5113085 | Fondo     | Urbano | IPA                                            |
| Firenze                  | FI_Bassi                        | 904809  | 683987  | 4850608 | Fondo     | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                               |
| Roma                     | Villa Ada                       | 1205820 | 790763  | 4648273 | Fondo     | Urbano | IPA                                            |
| Roma                     | Stazione ISS_viale Regina Elena | 0       | 791759  | 4645163 | Traffico  | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                               |
| Taranto                  | Taranto via Machiavelli         | 1607377 | 1197498 | 4514621 | Indust.le | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                               |
| Monte Sant Angelo (FG)   | Monte Sant Angelo               | 1607175 | 1078338 | 4635993 | Fondo     | Rurale | IPA, Metalli, O <sub>3</sub>                   |
| Udine                    | Via Cairoli                     | 603001  | 827963  | 5110131 | Fondo     | Urbano | PM2.5, PM10                                    |
| Cosenza                  | Citta dei Ragazzi               | 1807877 | 1124948 | 4376788 | Fondo     | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                               |
| Mezzolombardo (TN)       | Piana Rotaliana                 | 402212  | 663055  | 5118084 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                 |
| Dernice (AL)             | Dernice_Costa                   | 100614  | 504170  | 4956650 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                 |
| Molinella (BO)           | San Pietro Capofiume            | 803717  | 708036  | 4947786 | Fondo     | Rurale | Precursori di O <sub>3</sub> , O <sub>3</sub>  |
| Castel di Guido (Roma)   | Castel di Guido                 | 1205803 | 770991  | 4642661 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                 |
| Chitignano (AR)          | AR_Casa_ Stabbi                 | 905108  | 733911  | 4838159 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                 |
| Guardiaregia (CB)        | Guardiaregia                    | 1407075 | 961843  | 4600016 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                 |
| Seulo (CA)               | CENSEO                          | 2009239 | 518568  | 4410492 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                 |
| Macerata                 | Macerata Collevario_via Verga   | 1104304 | 859318  | 4802091 | Fondo     | Urbano | Precursori di O <sub>3</sub>                   |
| Monserato (CA)           | CENMO1                          | 2009238 | 511769  | 4345770 | Fondo     | Urbano | Precursori di O <sub>3</sub>                   |
| Montelibretti (Roma)     | Montelibretti                   |         | 800978  | 4667939 | Fondo     | Rurale | Mercurio                                       |

**TABELLA 2. ELENCO DELLE STAZIONI SPECIALI.**

Per ciascun sito sono state pertanto calcolate 4320 traiettorie, di seguito elaborate statisticamente per il calcolo dei 7 parametri sintetici.

La disponibilità di questa ampia base dati ha consentito non solo un'analisi d'insieme ma anche la possibilità di elaborare separatamente i risultati per ciascuno degli anni e/o per ciascuna delle ore della giornata per le quali sono state calcolate le traiettorie in arrivo.

Una sintesi di tutte le analisi effettuate è presentata in Tabella 3.

| Stazione                        | 2003           |   |    |    |               | 2005           |   |    |    |               | 2007           |   |    |    |               | 2003-2005-2007 |   |    |    |               |
|---------------------------------|----------------|---|----|----|---------------|----------------|---|----|----|---------------|----------------|---|----|----|---------------|----------------|---|----|----|---------------|
|                                 | analisi oraria |   |    |    |               | analisi oraria |   |    |    |               | analisi oraria |   |    |    |               | analisi oraria |   |    |    |               |
|                                 | 0              | 6 | 12 | 18 | 0,6,<br>12,18 | 0              | 6 | 12 | 18 | 0,6,<br>12,18 | 0              | 6 | 12 | 18 | 0,6,<br>12,18 | 0              | 6 | 12 | 18 | 0,6,<br>12,18 |
| Schivenoglia                    | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Ripatransone                    | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Santa_Maria_Cerrate             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Pordenone_centro                | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Milano_Pascal_Citta_Studi       | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Milano_Senato                   | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| PD_Mandria                      | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Sondrio_Centro_v_Paribelli      | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| FI_Bassi                        | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Villa_Ada                       | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Stazione_ISS_viale_Regina_Elena | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Taranto_via_Machiavelli         | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Monte_SantAngelo                | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| UD_Via_Cairolì                  | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Cosenza_Citta_dei_Ragazzi       | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Piana_Rotaliana                 | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Dernice_Costa                   | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| San_Pietro_Capofiume            | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Castel_di_Guido                 | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| AR_Casa_Stabbi                  | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Guardiaregia                    | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| CENSEO                          | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Macerata_Collevario_via_Verga   | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| CENMO1                          | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |
| Montelibretti                   | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             | *              | * | *  | *  | *             |

TABELLA 3. SINTESI DI TUTTE LE ANALISI EFFETTUATE.

Sono stati così prodotti 500 elaborati in formato netCDF (contenenti le 7 statistiche elaborate) e le corrispondenti visualizzazioni di ciascuno dei 3500 parametri sintetici, che possono quindi essere analizzati e valutati singolarmente.

A titolo di esempio, in Figura 10 sono presentati i 7 parametri statistici ottenuti per il sito di MILANO PASCAL CITTÀ STUDI dall'elaborazione di tutte le 4320 traiettorie (4 traiettorie per ciascun giorno dell'anno, per tre anni), ossia dall'elaborazione relativa all'ultima colonna di Tabella 3.

I risultati ottenuti per questo sito, come in tutti gli altri casi analizzati, mostrano come non tutti i parametri calcolati portino in effetti un vero valore aggiunto alla caratterizzazione anemologica del sito. In particolare, come atteso, è ridondante l'informazione portata dalle tre statistiche relative al numero e alla percentuale dei passaggi e al tempo di permanenza delle masse d'aria (prime tre mappe in Figura 10). Di queste 3 statistiche, che essenzialmente forniscono l'informazione sui regimi prevalenti di circolazione, è stato scelto di presentare, nel seguito, solo la percentuale dei passaggi, che, essendo indipendente dal numero di traiettorie, consente il confronto anche tra casi caratterizzati da un diverso campione numerico (vedi ad esempio i confronti presentati al paragrafo § 4.1). Per quel che riguarda la quota, l'informazione sintetica sulle proprietà tridimensionali del flusso (visto in queste mappe nella sua proiezione bidimensionale), appare ben espressa dalla mappa della quota media (ultimo riquadro in Figura 10) mentre poco valore aggiunto è portato dalle mappe degli estremi delle distribuzioni, ossia la quota minima e la quota massima (penultima riga di Figura 10), appiattite rispettivamente verso gli estremi inferiore e superiore della griglia verticale di calcolo.

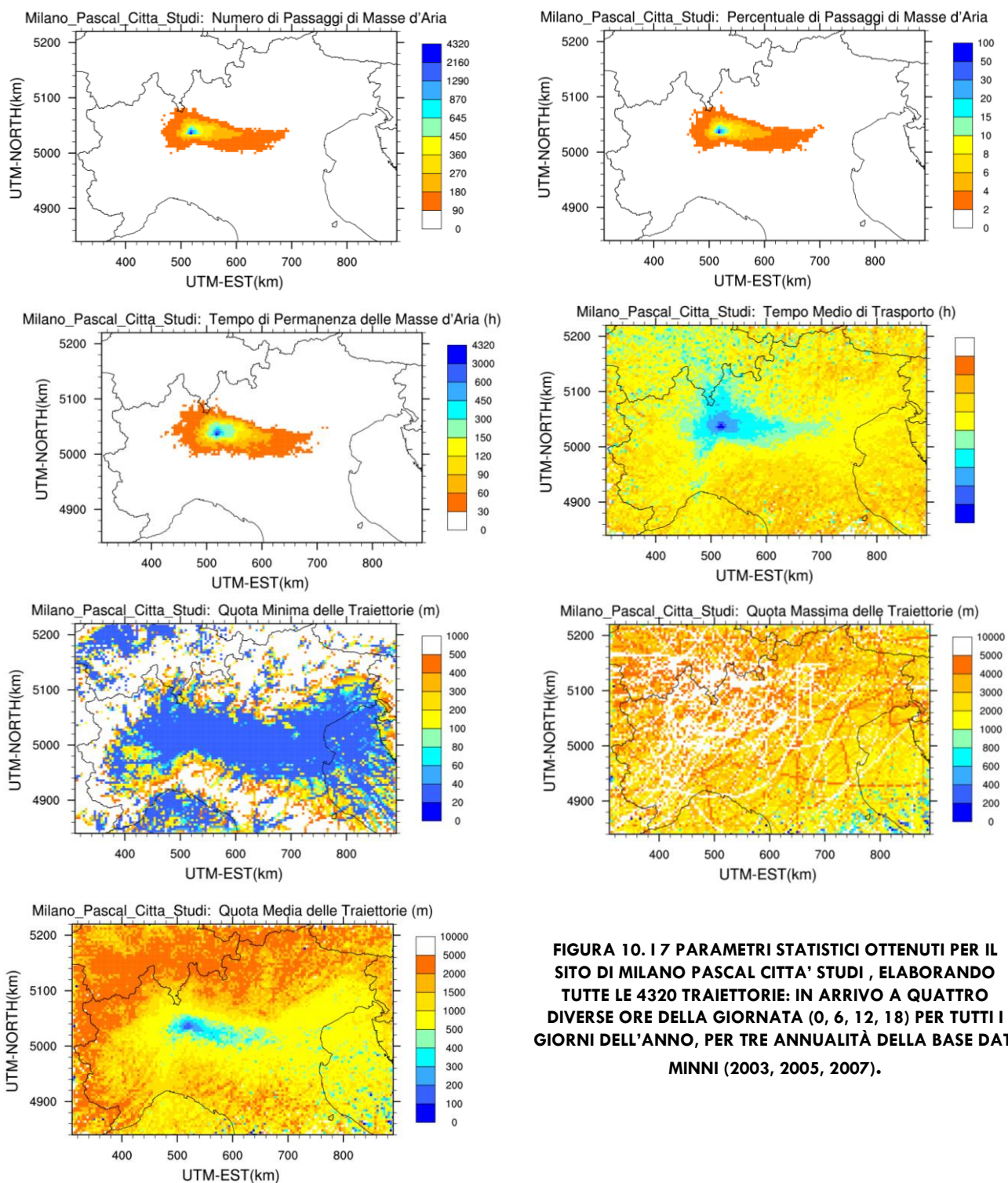


**FIGURA 10. I 7 PARAMETRI STATISTICI OTTENUTI PER IL SITO DI MILANO PASCAL CITTA' STUDI, ELABORANDO TUTTE LE 4320 TRAIETTORIE: IN ARRIVO A QUATTRO DIVERSE ORE DELLA GIORNATA (0, 6, 12, 18) PER TUTTI I GIORNI DELL'ANNO, PER TRE ANNUALITÀ DELLA BASE DATI MINNI (2003, 2005, 2007).**

Nel seguito si è scelto quindi di discutere la caratterizzazione di ciascun sito attraverso l'analisi di 3 dei 7 parametri calcolati, ossia:

- ~ la **percentuale dei passaggi** (%) per identificare i regimi prevalenti di circolazione
- ~ il **tempo medio di trasporto** (h) da analizzare in relazione alla scala temporale delle reazioni chimiche
- ~ la **quota media** (m) per descrivere le proprietà tridimensionali del flusso.

## 4 RISULTATI

L'insieme di tutte le analisi effettuate ha fornito, per tutti i siti analizzati, uno studio dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale dal punto di vista anemologico, basato su un'ampia base dati statistica: 4320 traiettorie analizzate per ciascun sito. Oltre a questa valutazione sintetica (della quale in APPENDICE sono presentati i risultati per ciascuno dei 25 siti), l'insieme dei casi a disposizione ha consentito anche una valutazione della variabilità di tale stima al variare delle condizioni meteorologiche sia su lungo periodo (variabilità meteorologica inter-annuale) sia su breve scala temporale a motivo di eventuali regimi locali, caratterizzati da variabilità meteorologica giornaliera.

Tra tutti i risultati a disposizione, nel prossimo paragrafo (§ 4.1) verranno presentati alcuni esempi per mostrare le caratteristiche salienti dei diversi confronti effettuati.

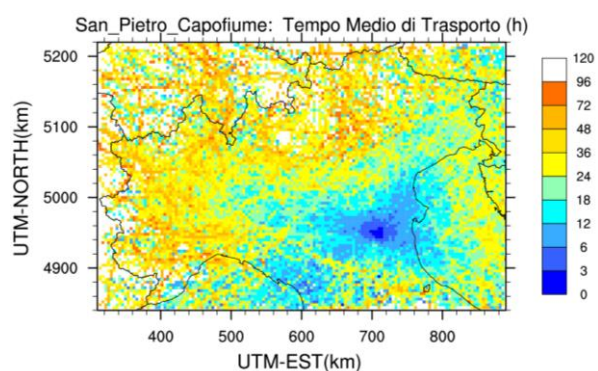
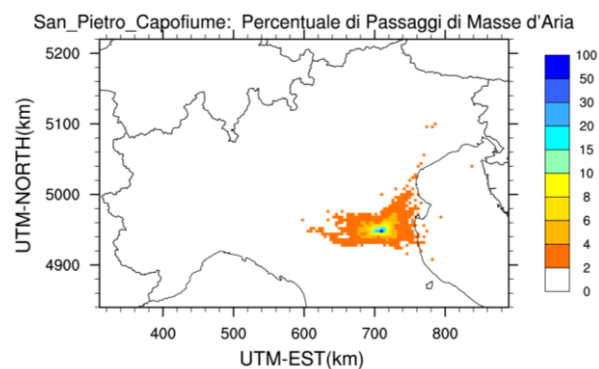
A partire dai risultati ottenuti e tenendo conto della variabilità emersa dai confronti, sono stati selezionati alcuni siti, caratterizzati da diversi contesti ambientali e territoriali, sia dal punto di vista orografico che dal punto di vista delle attività emissive. Per queste stazioni è stata effettuata una più approfondita analisi, basata sull'integrazione, in ambiente GIS, dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale con altri strati informativi del territorio (§ 4.2).

### 4.1 Variabilità meteorologica: effetto sui parametri descrittivi della rappresentatività spaziale

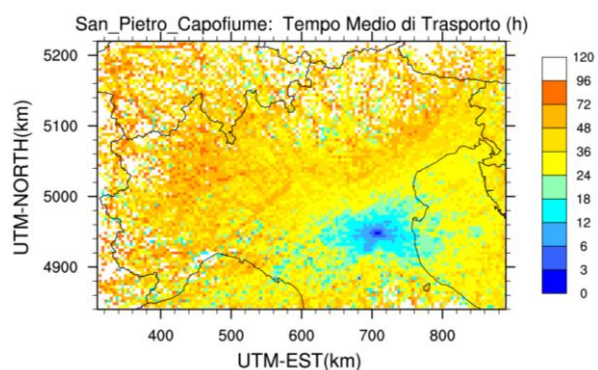
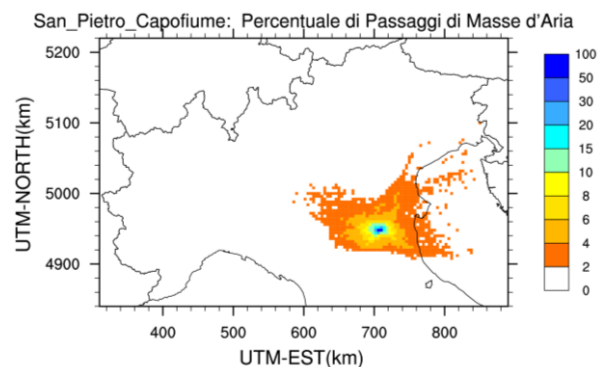
#### 4.1.1 Variabilità meteorologica inter-annuale

Per una valutazione della variabilità inter-annuale della caratterizzazione anemologica, nelle prossime Figure i risultati ottenuti elaborando tutte le traiettorie a disposizione (calcolate sull'insieme delle tre annualità) vengono confrontati con quelli relativi alle singole elaborazioni su ciascuno degli anni (2003, 2005 e 2007). Tra tutti i risultati a disposizione si è scelto di presentare qui, a titolo di esempio, quelli relativi a quattro siti, collocati in domini geografici differenti: SAN PIETRO CAPOFUME, collocato al Nord (Figura 11), MONTELIBRETTI al Centro (Figura 12), SAN MARIA CERRATE al Sud (Figura 13), e CENSE0 in Sardegna (Figura 14). Per ciascuno dei siti, e per ciascuna elaborazione (le tre annuali e la triennale), vengono presentati due dei parametri statistici, che nel complesso forniscono una completa caratterizzazione anemologica, sia in termini di direzione che di velocità del vento: la percentuale dei passaggi delle traiettorie, per studiare le direzioni dei regimi prevalenti, e i tempi di trasporto, anti-correlati con la velocità media (bassi tempi di trasporto sono ovviamente indicativi di alte velocità e viceversa).

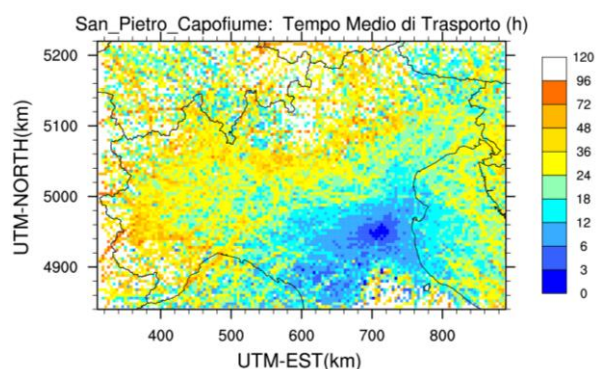
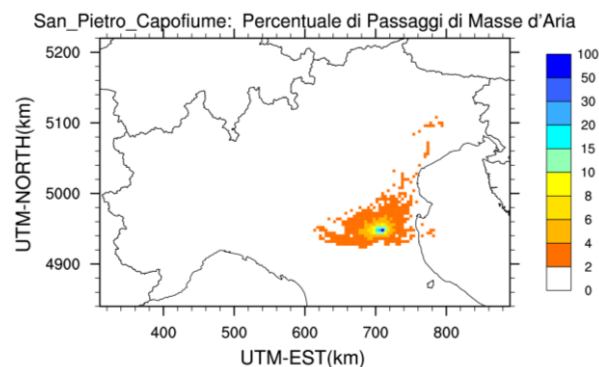
**2003**



**2005**



**2007**



**2003-2005-2007**

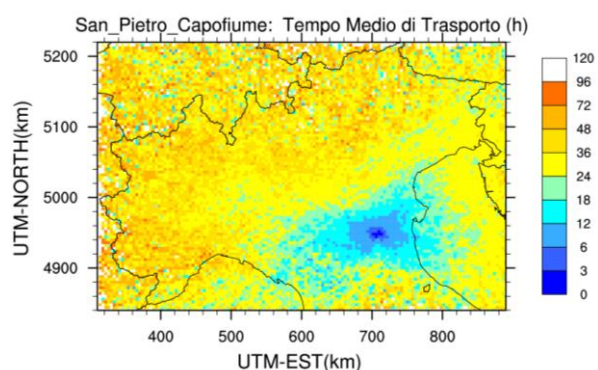
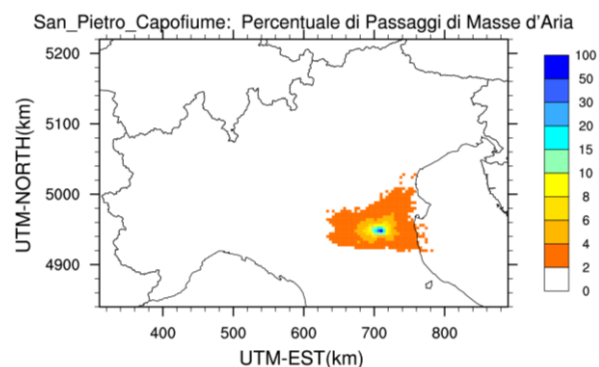
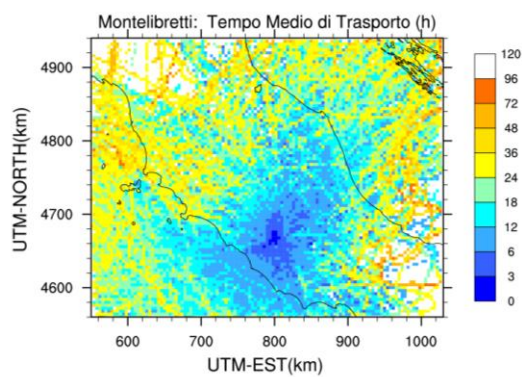
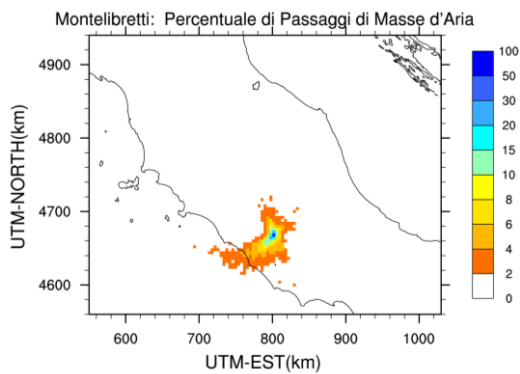
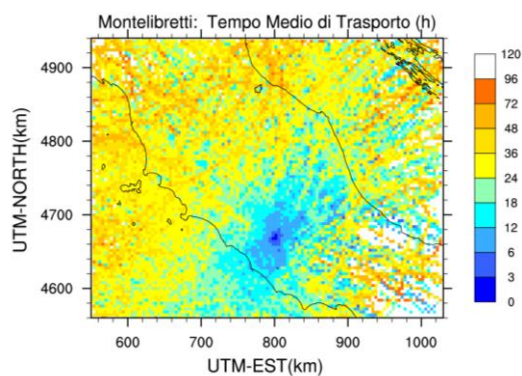
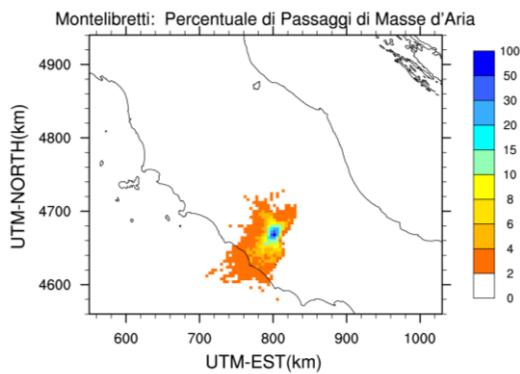


**FIGURA 11. PERCENTUALE DEI PASSAGGI (A SINISTRA) E TEMPO DI TRASPORTO (A DESTRA) DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A SAN PIETRO CAPOFIUME. DALL'ALTO AL BASSO: STATISTICHE ELABORATE SULLE TRAIETTORIE RELATIVE AGLI ANNI 2003, 2005, 2007 E ALL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ. STATISTICHE ELABORATE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (TUTTI I GIORNI DELL'ANNO, 4 TRAIETTORIE AL GIORNO).**

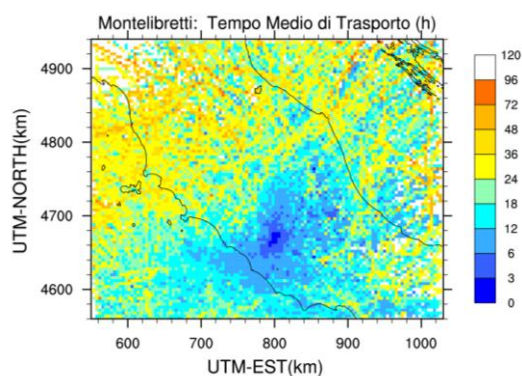
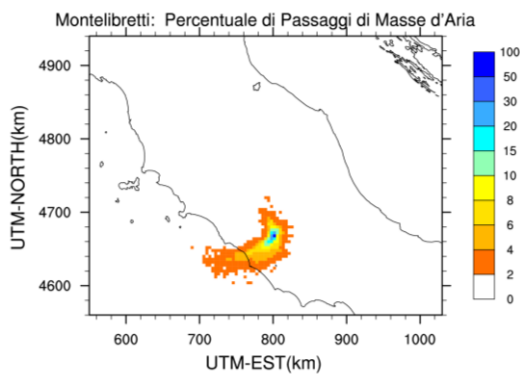
**2003**



**2005**



**2007**



**2003-2005-2007**

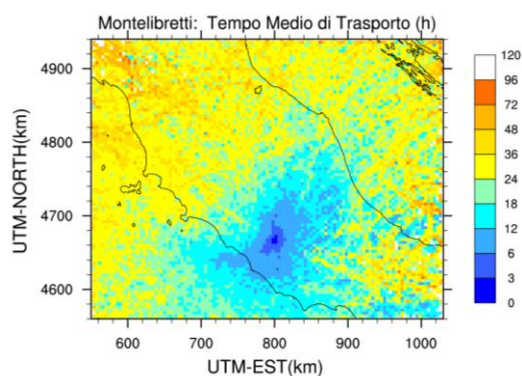
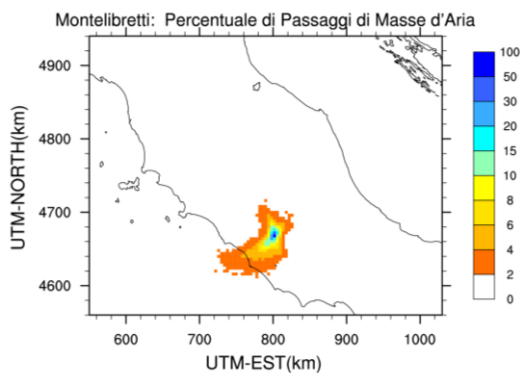
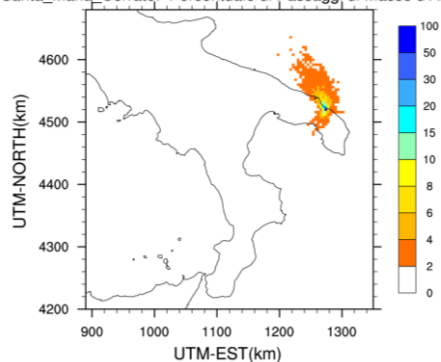


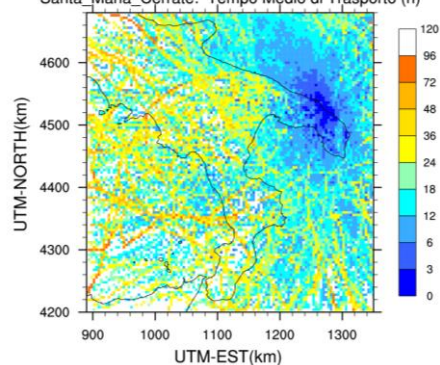
**FIGURA 12. PERCENTUALE DEI PASSAGGI (A SINISTRA) E TEMPO DI TRASPORTO (A DESTRA) DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A MONTELIBRETTI. DALL'ALTO AL BASSO: STATISTICHE ELABORATE SULLE TRAIETTORIE RELATIVE AGLI ANNI 2003, 2005, 2007 E ALL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ. STATISTICHE ELABORATE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (TUTTI I GIORNI DELL'ANNO, 4 TRAIETTORIE AL GIORNO).**

**2003**

Santa\_Maria\_Cerrate: Percentuale di Passaggi di Masse d'Aria

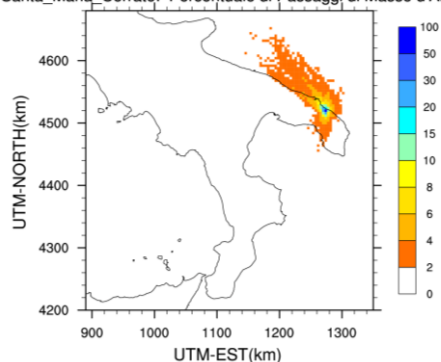


Santa\_Maria\_Cerrate: Tempo Medio di Trasporto (h)

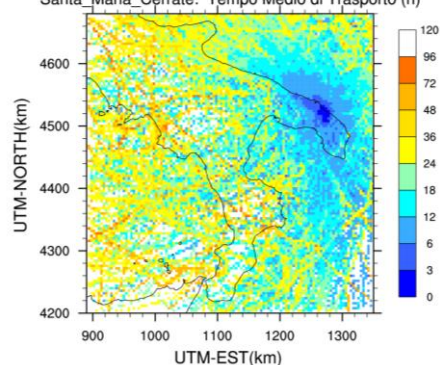


**2005**

Santa\_Maria\_Cerrate: Percentuale di Passaggi di Masse d'Aria

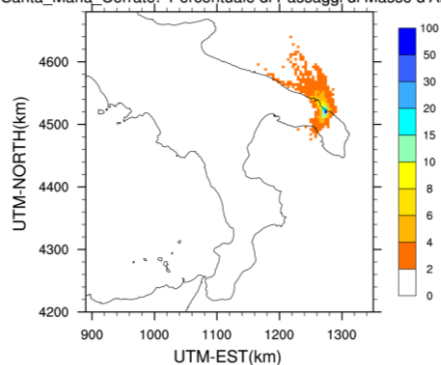


Santa\_Maria\_Cerrate: Tempo Medio di Trasporto (h)

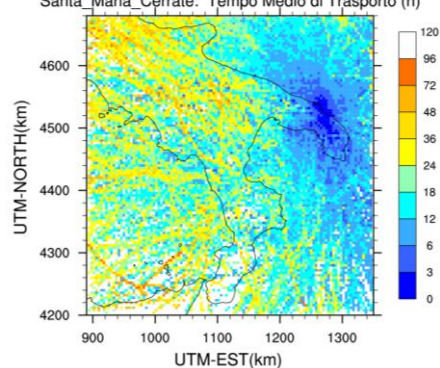


**2007**

Santa\_Maria\_Cerrate: Percentuale di Passaggi di Masse d'Aria

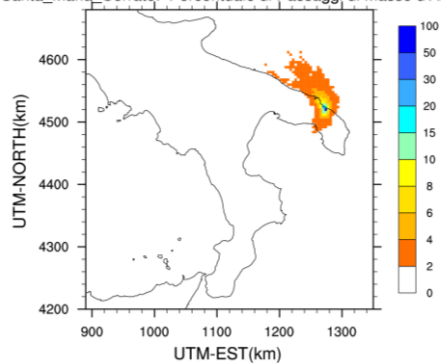


Santa\_Maria\_Cerrate: Tempo Medio di Trasporto (h)



**2003-2005-2007**

Santa\_Maria\_Cerrate: Percentuale di Passaggi di Masse d'Aria



Santa\_Maria\_Cerrate: Tempo Medio di Trasporto (h)

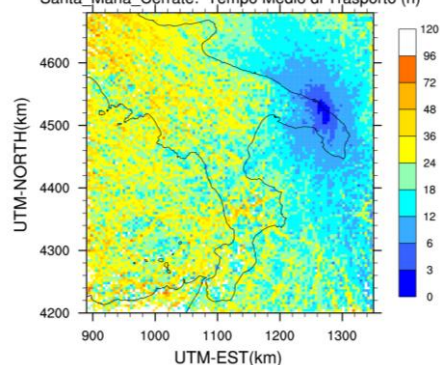
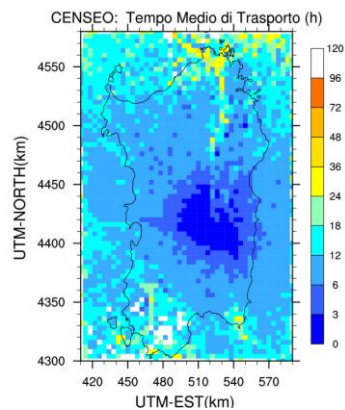
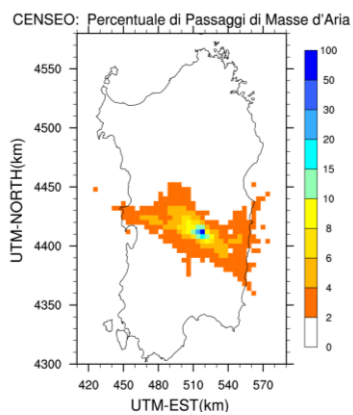
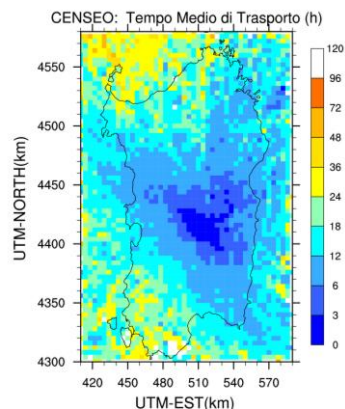
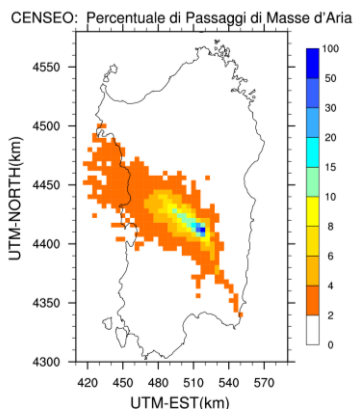


**FIGURA 13. PERCENTUALE DEI PASSAGGI (A SINISTRA) E TEMPO DI TRASPORTO (A DESTRA) DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A SANTA MARIA CERRATE. DALL'ALTO AL BASSO: STATISTICHE ELABORATE SULLE TRAIETTORIE RELATIVE AGLI ANNI 2003, 2005, 2007 E ALL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ. STATISTICHE ELABORATE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (TUTTI I GIORNI DELL'ANNO, 4 TRAIETTORIE AL GIORNO).**

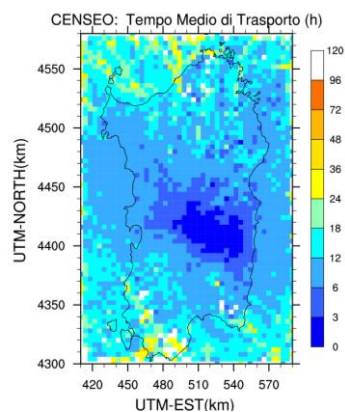
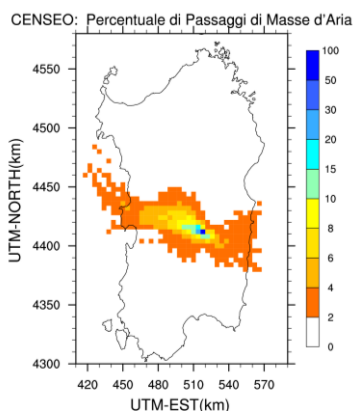
2003



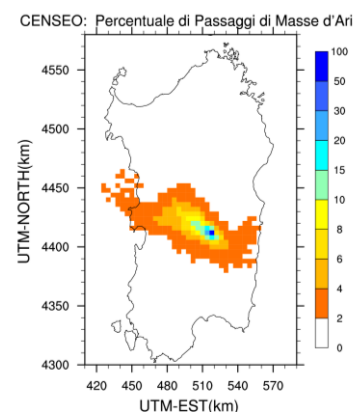
2005



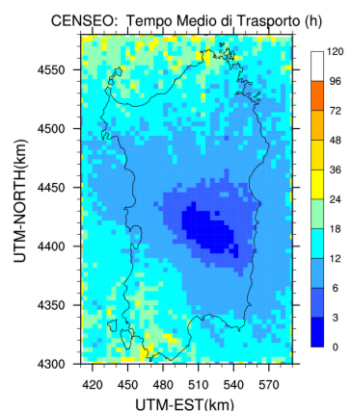
2007



2003



2005



2007

FIGURA 14. PERCENTUALE DEI PASSAGGI (A SINISTRA) E TEMPO DI TRASPORTO (A DESTRA) DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A CENSEO. DALL'ALTO AL BASSO: STATISTICHE ELABORATE SULLE TRAIETTORIE RELATIVE AGLI ANNI 2003, 2005, 2007 E ALL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ. STATISTICHE ELABORATE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (TUTTI I GIORNI DELL'ANNO, 4 TRAIETTORIE AL GIORNO).

Per quanto riguarda i campi delle percentuali dei passaggi (colonna di sinistra nelle Figure), il confronto tra le elaborazioni relative ai diversi anni mostra una generale coerenza nell'identificazione delle direzioni prevalenti dei regimi di flusso. Ciò nonostante, all'interno di questa sostanziale coerenza sono riscontrabili, come prevedibile, anche delle differenze. In particolare si osserva una maggiore somiglianza tra i risultati ottenuti per il 2003 e il 2007, rispetto a quelli relativi al 2005. In generale i campi relativi alle elaborazioni del 2005 mostrano distribuzioni spaziali più omogenee, con conseguente maggiore estensione dell'area caratterizzata da percentuali basse (tra il 2% e il 4%).

La maggiore somiglianza degli anni meteorologici 2003 e 2007, rispetto al 2005, è coerente con quanto emerso da uno studio (Finardi, 2011) effettuato nell'ambito dell'ultima Convenzione fra MATTM ed ENEA ("SVILUPPO, VERIFICA E NUOVE APPLICAZIONI DEL SISTEMA MODELLISTICO MINNI A SUPPORTO DELLE POLITICHE DI QUALITÀ DELL'ARIA NAZIONALI E DEI PIANI E PROGRAMMI DI RISANAMENTO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA REGIONALI"). Da tale studio, che ha avuto come oggetto l'analisi dell'influenza sulla qualità dell'aria della variazione meteorologica interannuale, è emersa, sia all'interno di un inquadramento climatologico sia attraverso un'analisi dettagliata dei campi prodotti da MINNI, una maggiore somiglianza tra le condizioni meteorologiche registrate negli anni 2003 e 2007 rispetto a quelle dell'anno 2005. In particolare l'analisi dei campi di vento prodotti da MINNI ha mostrato venti lievemente più deboli per il 2005 e valori molto simili, su scala nazionale, per il 2003 e il 2007, con differenze prevalentemente a carattere locale. Quest'ultima considerazione spiega bene i risultati ottenuti per i tempi di trasporto (colonna di destra nelle Figure), mediamente più alti per le elaborazioni relative al 2005. Tale effetto appare evidente soprattutto al Nord e al Centro, domini che il sopracitato studio ha mostrato essere quelli in effetti maggiormente interessati da differenze nei campi di vento, tra il 2005 e il 2003 e 2007.

Complessivamente l'insieme dei risultati emersi mostra il valore aggiunto dell'analisi basata sul campione di tre anni, insieme statisticamente più rappresentativo, in grado da un lato di mediare gli effetti dovuti alla variabilità meteorologica inter-annuale e dall'altro di ridurre un certo "rumore" statistico (visibile ad esempio nelle mappe dei tempi di trasporto elaborate su base annuale).

#### **4.1.2 Variabilità meteorologica giornaliera**

La possibilità di elaborare separatamente, nell'ambito delle 4320 traiettorie a disposizione per ciascun sito, i casi di arrivo a diverse ore del giorno (0, 6, 12, 18), ha consentito di catturare eventuali regimi di circolazione locale, caratterizzati da una specifica variabilità giornaliera.

Nell'ottica di analizzare, al variare dell'ora del giorno, le direzioni dei flussi prevalenti, tra le sintesi statistiche a disposizione, sono state utilizzate per il confronto le mappe dei conteggi percentuali dei passaggi.

Nelle Figure che seguono, allo scopo di fornire una visione dettagliata attorno alla stazione visualizzando al meglio i regimi locali, si è deciso di mostrare solo un dettaglio (uno zoom centrato sul sito) della mappa a disposizione sull'intero dominio macroregionale di MINNI.

Tipici regimi locali caratterizzati da una specifica periodicità giornaliera sono i regimi di brezza. I siti di costa ad esempio sono caratterizzati dal frequente instaurarsi del ben noto regime di brezza terra-mare. Le tipiche caratteristiche del ciclo giornaliero di questo regime circolatorio (venti notturni da terra e venti diurni da mare), sono ben visibili in Figura 15 dove, come esempio di sito di costa, è presentato il caso di TARANTO VIA MACHIAVELLI.

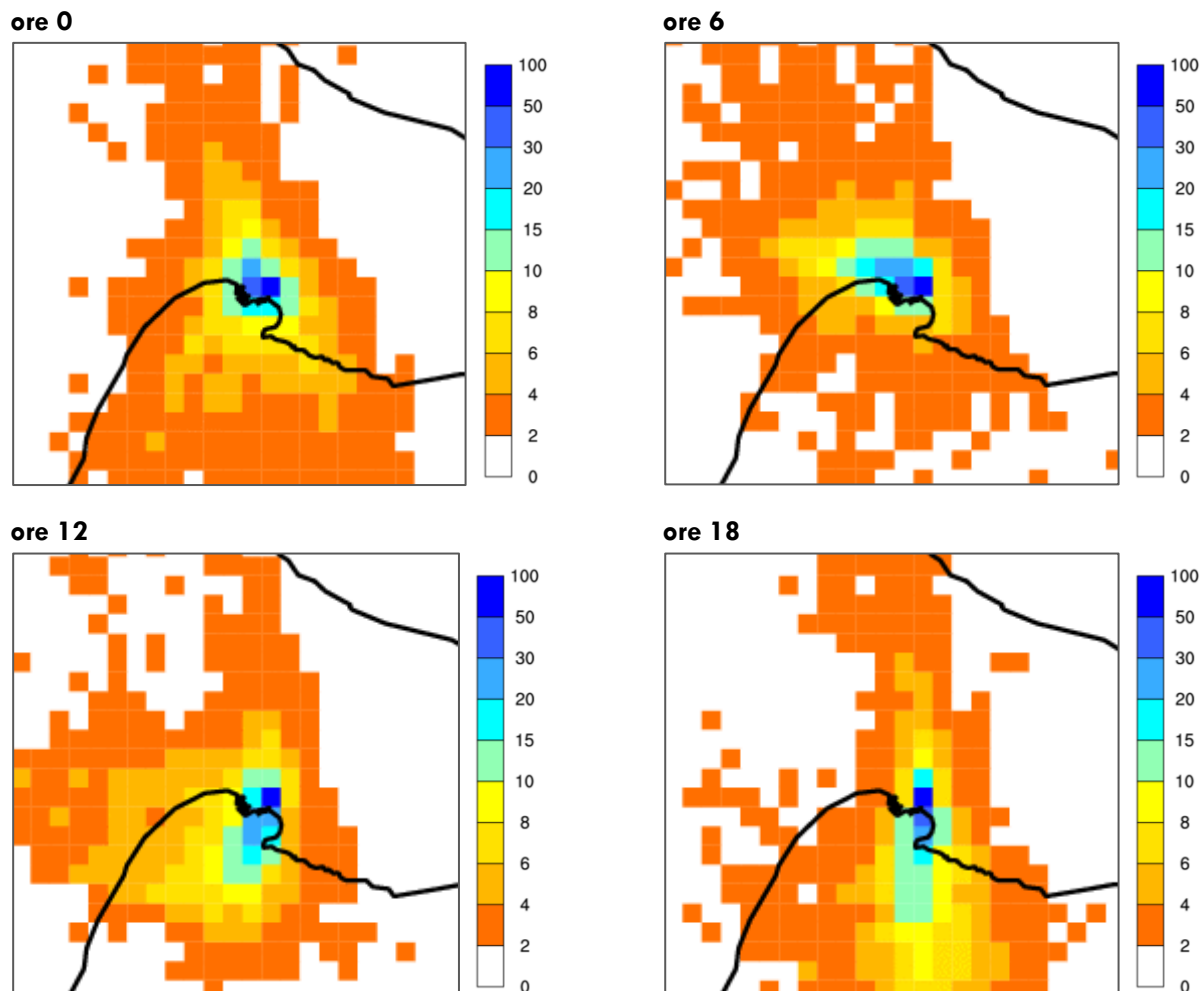
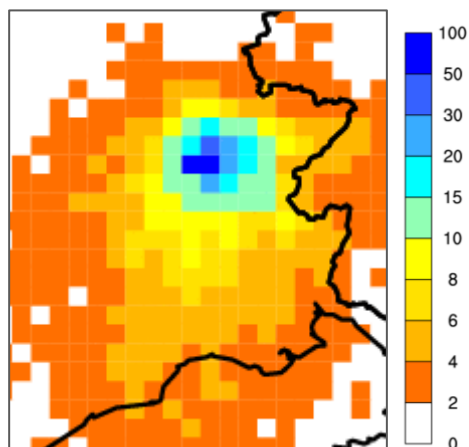


**FIGURA 15. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TARANTO VIA MACHIAVELLI. ELABORAZIONI OTTENUTE SULLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A DIVERSE ORE DELLA GIORNATA (0,6,12,18) SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ A DISPOSIZIONE.**

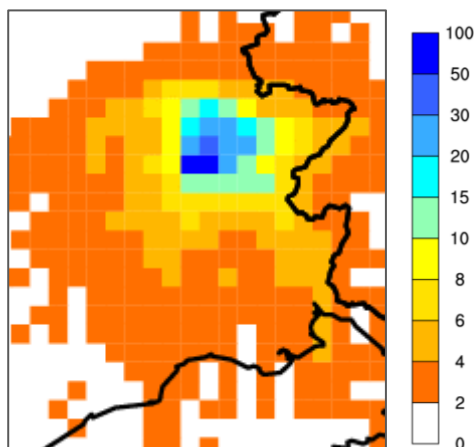
In Figura 16 sono invece presentati i risultati relativi al sito di UDINE VIA CAIROLI. In questo caso, a motivo della presenza dell'orografia montana a Nord/Nord-Est del sito, è frequente l'instaurarsi di regimi di brezza di monte e di valle: durante la notte i venti provengono principalmente da Nord-Est mentre durante il giorno si osserva una rotazione in senso orario verso Sud della direzione di provenienza del vento.

In Figura 17 è infine presentato l'esempio di un caso non caratterizzato da specifici regimi con periodicità giornaliera. Si tratta dell'analisi relativa alla stazione di SCHIVENOGLIA, sito che, come è noto, è collocato in una vasta zona pianeggiante, e i cui regimi di circolazione non risultano quindi condizionati da effetti locali associati a complessità orografica.

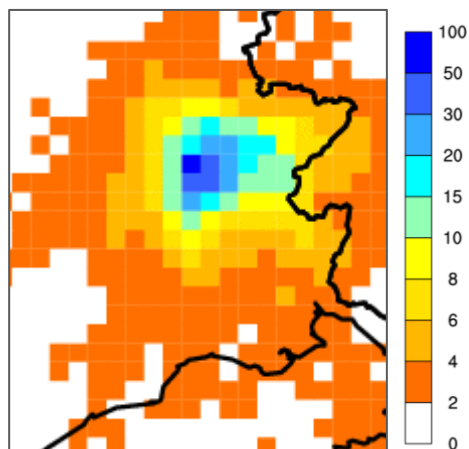
ore 0



ore 6



ore 12



ore 18

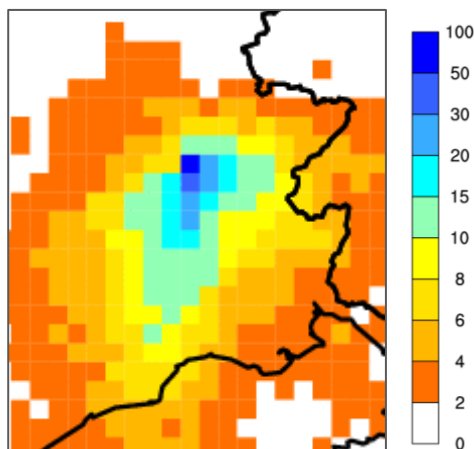
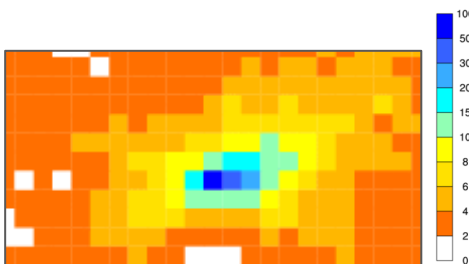
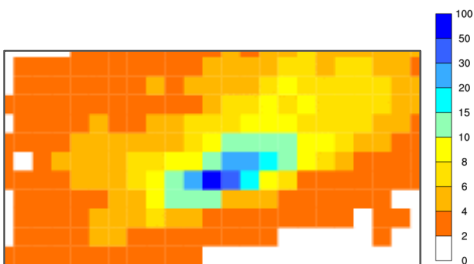


**FIGURA 16. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A UDINE VIA CAIROLI. ELABORAZIONI OTTENUTE SULLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A DIVERSE ORE DELLA GIORNATA (0,6,12,18) SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ A DISPOSIZIONE.**

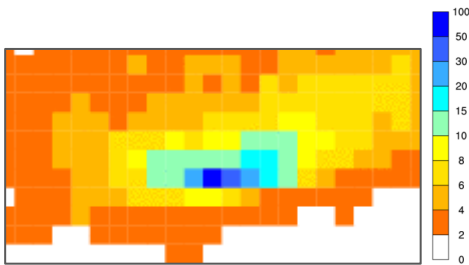
ore 0



ore 6



ore 12



ore 18

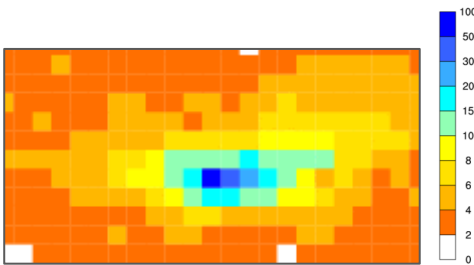


**FIGURA 17. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A SCHIVENOGLIA. ELABORAZIONI OTTENUTE SULLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A DIVERSE ORE DELLA GIORNATA (0,6,12,18) SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ A DISPOSIZIONE.**

## 4.2 Analisi dettagliata in ambiente GIS dei parametri descrittivi della rappresentatività spaziale per alcune stazioni di interesse

Al fine di valutare le potenzialità della metodologia sviluppata nel fornire indicazioni sulla rappresentatività spaziale di un sito dal punto di vista meteorologico, tra tutti i risultati a disposizione sono stati selezionati alcuni casi, per i quali è stata effettuata una più approfondita analisi ambientale e territoriale, basata sull'integrazione, in ambiente GIS, dei parametri statistici elaborati dalla metodologia con altri strati informativi del territorio.

Sono state scelte a questo proposito 5 stazioni (Tabella 4) collocate in domini geografici differenti (PIANA ROTALIANA e SAN PIETRO CAPOFUME al Nord; FIRENZE BASSI al Centro; TARANTO VIA MACHIAVELLI al Sud; CENMO1 in Sardegna) e in diversi contesti territoriali (un sito di pianura: SAN PIETRO CAPOFUME; un sito a ridosso di un'area collinare: FIRENZE BASSI; due siti di costa: TARANTO VIA MACHIAVELLI e CENMO1; un sito di valle, in una regione a orografia complessa: PIANA ROTALIANA). I 5 siti scelti coprono inoltre diverse tipologie di stazione, in riferimento alla classificazione EoI (due stazioni di fondo rurale: PIANA ROTALIANA e SAN PIETRO CAPOFUME; due stazioni di fondo urbano: FIRENZE BASSI e CENMO1; una stazione industriale urbana: TARANTO VIA MACHIAVELLI). Queste stazioni sono inoltre destinate alla misura di diversi inquinanti: PIANA ROTALIANA è stata scelta per la misura dell'Ozono; CENMO1 per la misura dei suoi precursori e SAN PIETRO CAPOFUME per la misura di entrambi; TARANTO VIA MACHIAVELLI e FIRENZE BASSI per la misura del Particolato e degli IPA.

| LOCALIZZAZIONE     | DENOMINAZIONE           | CODICE  | X       | Y       | TIPO      | ZONA   | INQUINANTE                                    |
|--------------------|-------------------------|---------|---------|---------|-----------|--------|-----------------------------------------------|
| Firenze            | Fl_Bassi                | 904809  | 683987  | 4850608 | Fondo     | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                              |
| Taranto            | Taranto via Machiavelli | 1607377 | 1197498 | 4514621 | Indust.le | Urbano | IPA, PM2.5, PM10                              |
| Mezzolombardo (TN) | Piana Rotaliana         | 402212  | 663055  | 5118084 | Fondo     | Rurale | O <sub>3</sub>                                |
| Molinella (BO)     | San Pietro Capofume     | 803717  | 708036  | 4947786 | Fondo     | Rurale | Precursori di O <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> |
| Monserato (CA)     | CENMO1                  | 2009238 | 511769  | 4345770 | Fondo     | Urbano | Precursori di O <sub>3</sub>                  |

TABELLA 4. ELENCO DELLE STAZIONI SCELTE.

Per tutti i siti elencati in Tabella 4 i parametri descrittivi della rappresentatività spaziale sono stati visualizzati e strutturati in ambiente GIS, integrandoli con altri strati informativi per la caratterizzazione dei siti di interesse nello specifico contesto territoriale. Gli strati utilizzati sono:

- ✓ limiti amministrativi regionali,
- ✓ reticolo idrografico con corsi d'acqua classificati al secondo ordine,
- ✓ orografia, utilizzando il Modello Digitale del Terreno derivato da SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 2000) con risoluzione di cella a 90 metri, con la rappresentazione *Hillshade* (tematismo dell'illuminazione dei versanti, per mettere in risalto il rilievo),
- ✓ rete stradale principale (autostrade e strade statali extraurbane),
- ✓ principali aree urbanizzate (area urbana >10 km<sup>2</sup>),
- ✓ sorgenti emissive puntuali: inventario ISPRA 2005, con georeferenziazione dei principali insediamenti emissivi nazionali e informazioni sulle quantità emesse nel 2005 per singoli inquinanti.

Tali strati informativi sono stati scelti quali elementi significativi per la valutazione dei risultati dal punto di vista dell'ambiente naturale e delle attività antropiche; per entrambi gli ambiti di analisi i risultati sono presentati con una specifica visualizzazione.

La rappresentazione spaziale e la gestione sinergica di tutti gli elementi raccolti ed elaborati hanno permesso un'analisi più approfondita dei risultati e una loro interpretazione alla luce del contesto territoriale. In particolare le informazioni relative al contesto del territorio naturale hanno fornito una spiegazione dei risultati, in termini di origini e di cause della caratterizzazione anemologica ottenuta. L'integrazione delle informazioni legate alle attività antropiche ha invece consentito di valutare se e quali sorgenti emissive si potessero ritenere appartenenti alla regione di influenza del sito, identificata dall'analisi effettuata.

Per discutere la rappresentatività spaziale di ciascuna stazione dal punto di vista meteorologico, sono presentate, per ciascun sito, le mappe relative ai tre parametri statistici identificati al paragrafo § 3.3, ossia la percentuale dei passaggi, il tempo medio di trasporto e la quota media delle traiettorie. Verranno presentate le statistiche elaborate sulla base di tutte le traiettorie a disposizione: in arrivo alle diverse ore della giornata, per tutti i giorni dell'anno, per l'insieme delle tre annualità. Quella che verrà fornita sarà pertanto una valutazione sintetica di un campione ampiamente rappresentativo dal punto di vista statistico.

#### **4.2.1 SAN PIETRO CAPOFIUME**

Nelle mappe delle prossime Figure viene presentata la caratterizzazione anemologica del sito di SAN PIETRO CAPOFIUME. Dall'analisi integrata dei tre parametri statistici è possibile una valutazione d'insieme della rappresentatività spaziale dal punto di vista meteorologico.

La mappa della percentuale dei passaggi consente anzitutto di identificare eventuali regimi prevalenti di flusso. Come ci si può attendere da un sito situato in un'estesa area pianeggiante (Figura 18, in alto), il campo della percentuale dei passaggi appare, soprattutto localmente, abbastanza simmetrico rispetto al punto di arrivo. Nell'ambito di questa generale simmetria, la forma del campo si presenta però schiacciata sull'asse Est-Ovest, ad indicare un maggior numero di casi di provenienza del vento in tale direzione. Per quanto riguarda invece la direzione Nord-Sud sono lievemente più frequenti, almeno localmente, i casi di provenienza da Nord rispetto a quelli da Sud. Per quel che riguarda l'area più lontana dal sito, caratterizzata da una percentuale di passaggi piccola (tra il 2% e il 4%), essa appare complessivamente più estesa ad Est che ad Ovest, ad indicare una circolazione che globalmente tende ad essere caratterizzata prevalentemente da venti da mare. La visualizzazione del campo della percentuale di passaggi consente inoltre di identificare una sorta di "regione di influenza", definita come l'area attorno al sito le cui emissioni si può ritenere forniscano un contributo sostanziale alle concentrazioni misurate nel sito in esame (Folini et al., 2009). E' pertanto di particolare interesse integrare il campo della percentuale dei passaggi nel contesto delle attività antropiche (Figura 18, in basso). Nell'analisi della mappa abbiamo ritenuto, in prima approssimazione, che la percentuale di passaggi fosse non trascurabile se maggiore della soglia del 10% (celle in scala di blu in Figura). Se vi fosse infatti una completa isotropia della circolazione attorno al punto, tutte le traiettorie in arrivo nel punto in esame sarebbero omogeneamente distribuite sulle 8 celle che immediatamente lo circondano, che sarebbero pertanto caratterizzate da una percentuale del 12,5%. Tale percentuale si dimezzerebbe nella corona di 16 celle successiva (6,25%) e così via. Si è ritenuto che la soglia del 10% fosse una buona soglia per giudicare, nell'intorno del punto, percentuali alte (più frequentate rispetto alla media isotropica) o basse (meno frequentate). Nel caso del sito di SAN PIETRO CAPOFIUME, all'interno dell'area caratterizzata da una percentuale maggiore del 10% non sono presenti significative fonti emissive, a parte un tratto della Autostrada

A13 (Bologna-Padova). Trascurabili sono in particolare i casi di passaggi dai centri urbanizzati di Bologna, Modena e Ferrara. Appena fuori dall'area caratterizzata da percentuali maggiori del 10%, a Ovest del sito, due sorgenti puntuali appartengono a due celle caratterizzate da una percentuale di circa il 9%.

La mappa del tempo medio di trasporto (Figura 19) consente invece, come si è detto, la definizione dell'area massima di rappresentatività spaziale in relazione alla scala temporale delle reazioni che avvengono in atmosfera. Spangl et al. (2007) propongono per i processi chimici che coinvolgono l'Ozono e i suoi precursori una scala temporale inferiore a 12 ore. Nell'ipotesi di assumere la soglia di 12 ore per il sito di SAN PIETRO CAPOFUME (destinato alla misura dell'Ozono e dei suoi precursori), l'estensione della massima area di rappresentatività spaziale (prime tre tonalità di blu) sarebbe di 88 km in direzione Est-Ovest e di 40 km in direzione Nord-Sud. E' interessante notare che questa stima è sostanzialmente coerente con quella effettuata sulla base del confronto dei campi di concentrazione (Vitali et al., 2013) per questo sito, relativamente alla misura di Ozono: 64 km in direzione Est-Ovest e 36 km in direzione Nord-Sud. Qui, come atteso, la massima estensione è una sovrastima che ne rispetta le proporzioni. Rispetto alle sorgenti segnalate come possibili responsabili delle concentrazioni misurate, si noti (Figura 19, in basso) che sia per quel che riguarda il tratto di Autostrada che attraversa la zona dei passaggi frequenti, sia per quel che riguarda le puntuali a Ovest, le masse d'aria che passano su di esse tendono a raggiungere la stazione di SAN PIETRO CAPOFUME in tempi molto brevi (mediamente inferiori a 6 ore).

La mappa della quota media delle traiettorie (Figura 20) completa la caratterizzazione anemologica del sito, fornendo una descrizione sintetica del flusso anche relativamente alla direzione verticale. Si noti (in questa come nelle Figure che seguiranno) che le traiettorie, in arrivo a 100 m sul sito in esame, possono scendere lungo il percorso anche al di sotto di tale quota. E' evidente (Figura 20, in basso) la coerenza del campo delle quote medie con il contesto orografico del territorio; in particolare le traiettorie tendono a passare sui rilievi a quote più elevate. Rispetto alle due sorgenti puntuali, la Figura 20 (in basso) mostra che le masse d'aria mediamente passano su tali celle a quote relativamente basse (minori di 200 m).

Occorre comunque tenere presente che, da un'analisi dei dati di inventario ISPRA 2005 (in particolare per quel che riguarda i valori emissivi dei precursori dell'Ozono), tali sorgenti sono caratterizzate da valori trascurabili di emissioni di VOC (minori di 3 ton/anno in tutti e due i casi) e da valori di NO<sub>x</sub> non particolarmente elevati rispetto ai massimi di inventario (circa 35 ton/anno e 110 ton/anno). Globalmente si può pertanto ritenere che le misure di concentrazione della stazione di san Pietro Capofume non siano influenzate da specifiche fonti emissive, in linea con quanto richiesto per una stazione di fondo rurale.

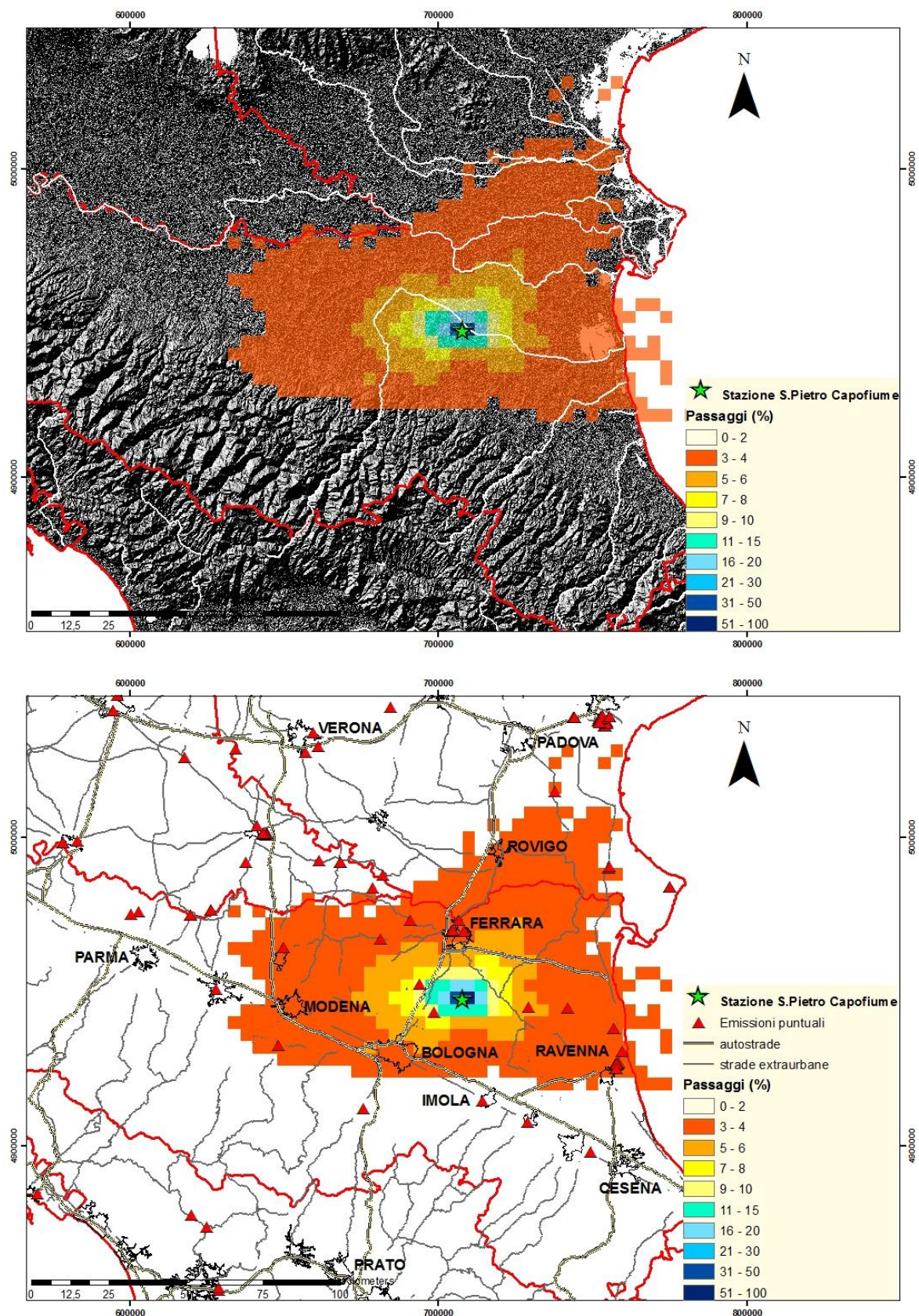


**FIGURA 18. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A SAN PIETRO CAPOFIUME. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

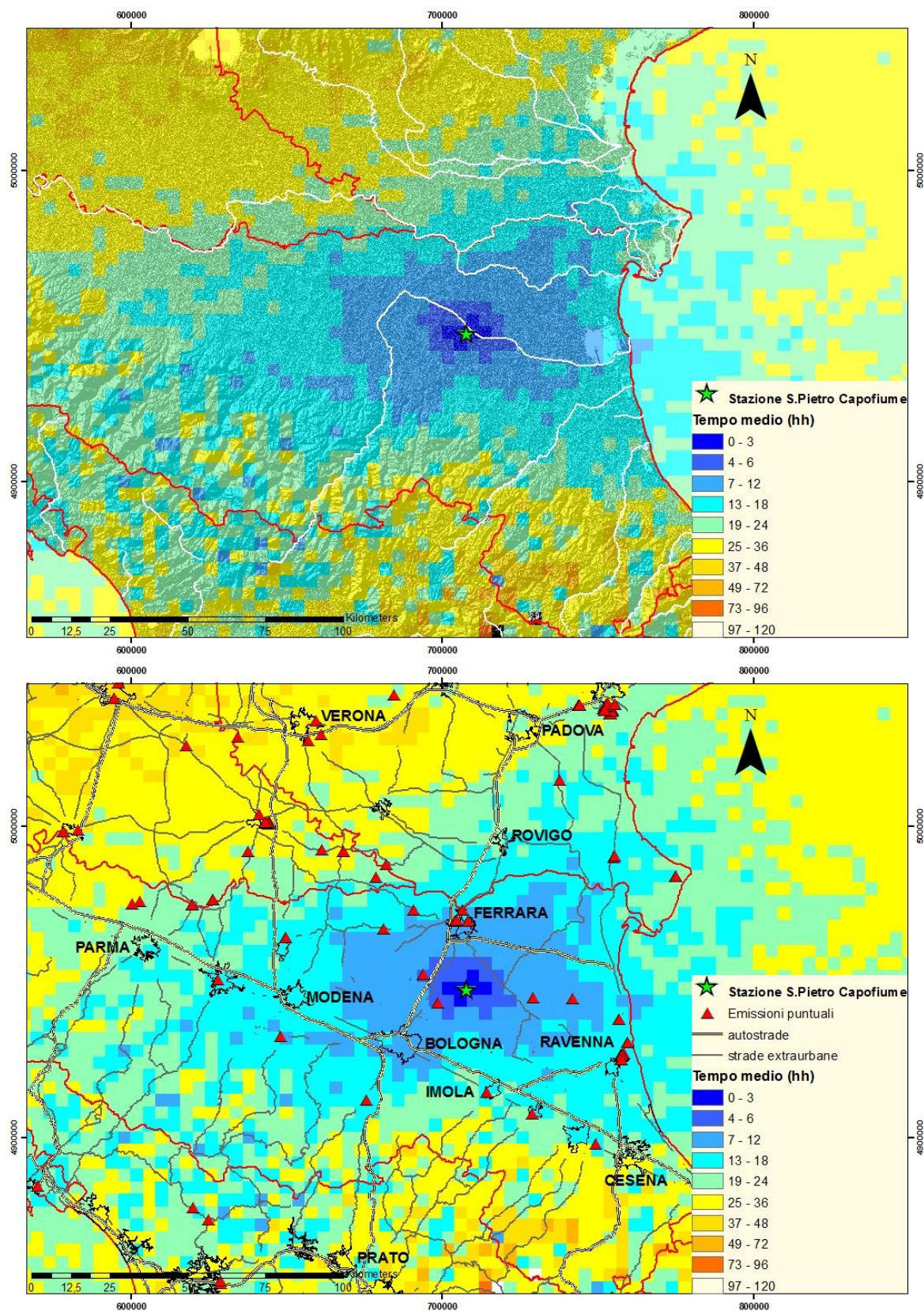


FIGURA 19. TEMPO MEDIO DI TRASPORTO DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A SAN PIETRO CAPOFIUME. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).

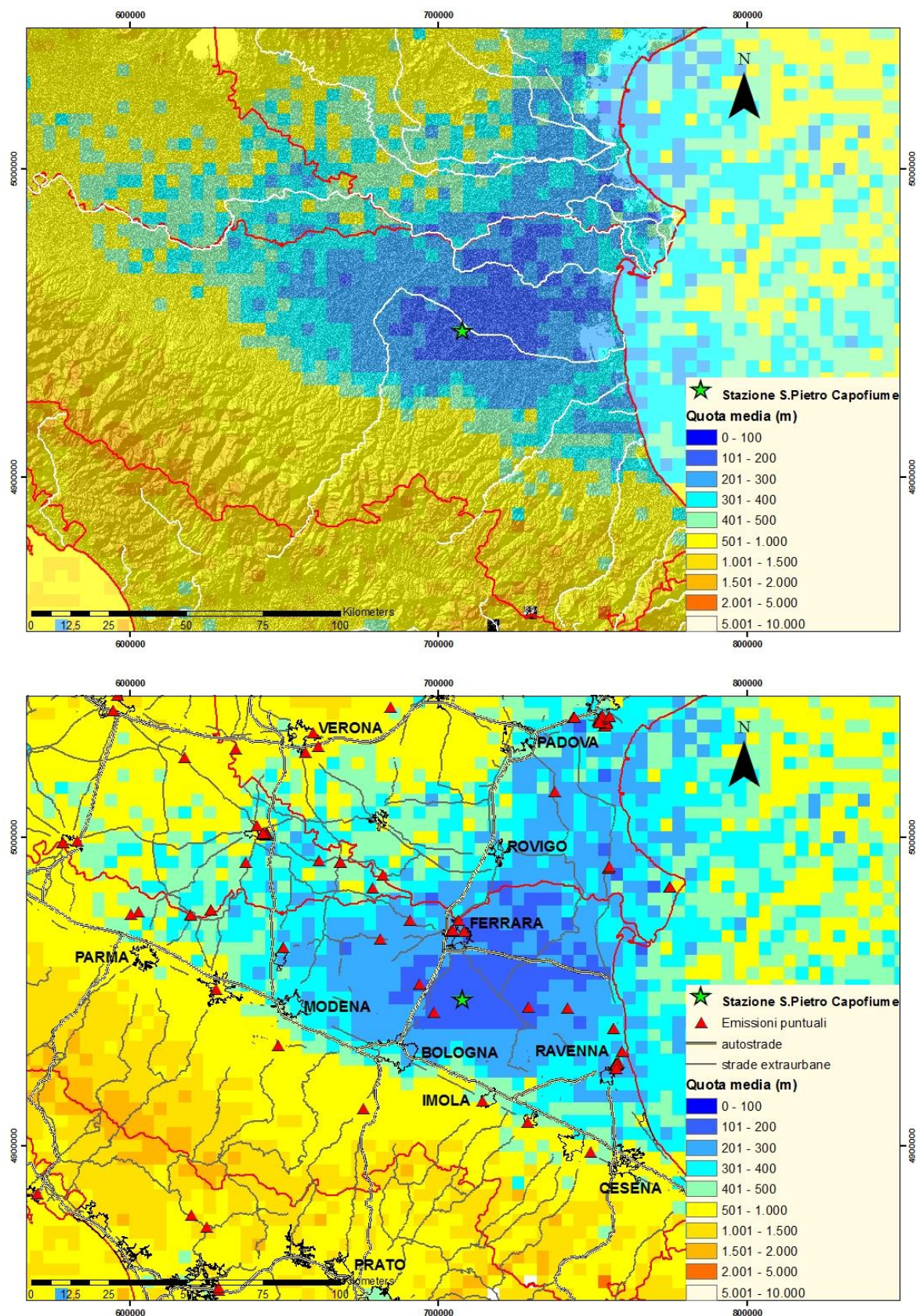


**FIGURA 20. QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A SAN PIETRO CAPOFIUME. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

#### 4.2.2 PIANA ROTALIANA

Viene qui presentata e discussa la caratterizzazione meteorologica della rappresentatività spaziale per il sito di PIANA ROTALIANA.

La mappa della percentuale dei passaggi mostra chiaramente che a motivo della complessità orografica della zona (Figura 21, in alto) il trasporto delle masse d'aria in arrivo nel sito è caratterizzato da un'evidente direzione prevalente, la direzione Nord-Sud lungo la quale approssimativamente si snoda la valle dell'Adige. Nell'ambito di questa direzione prevalente, i casi di provenienza da Sud sono più frequenti di quelli da Nord, sia localmente sia nell'area più lontana dal sito caratterizzata da una percentuale compresa tra il 2% e il 4%. Globalmente la circolazione è caratterizzata quindi da venti prevalentemente da Sud che si incanalano nella valle. Per quanto riguarda l'influenza delle sorgenti emissive sulle concentrazioni misurate nel sito in esame (Figura 21, in basso), all'interno dell'ipotetica regione di influenza caratterizzata da una percentuale di passaggi maggiore del 10% (vedi discussione al paragrafo § 4.2.1), sono presenti l'Autostrada A22 (Brennero-Modena) e l'area urbanizzata di Trento, a Sud del sito. Una percentuale di passaggi più bassa (tra il 4% e il 6%) caratterizza invece le celle di appartenenza dell'area di Bolzano e dell'unica sorgente puntuale della zona, circa 40 km a Sud-Ovest della stazione.

La mappa del tempo medio di trasporto (Figura 22) mostra, per un'area molto vasta attorno al sito, valori mediamente molto bassi, coerenti con il fatto che in questa zona le traiettorie, fortemente condizionate dalla presenza dei rilievi, sono caratterizzate da quote mediamente molto alte (Figura 23) e quindi da venti forti. Essendo questa stazione dedicata alla misura dell'Ozono, si potrebbe anche in questo caso stimare l'area massima di rappresentatività come quella identificata da tempi di trasporto al massimo di 12 ore (Spangl et al., 2007). Ma per i motivi appena esposti, l'estensione dell'area caratterizzata da tempi di trasporto inferiori a 12 ore è probabilmente molto al di sopra dell'area di rappresentatività effettiva, da valutare con altri metodi. Meglio definita è l'area caratterizzata da tempi di trasporto inferiori a 6 ore (prime 2 tonalità di blu): 16 km in direzione Est-Ovest e 40 km in direzione Nord-Sud. Rispetto alla stima basata sul confronto dei campi di concentrazione, fornita per questo sito in Vitali et al. (2013) (16 km in direzione Est-Ovest e 24 km in direzione Nord-Sud), questa valutazione rappresenta, come atteso, una sovrastima che dell'area effettiva rispetta la forma. Incrociando il campo del tempo medio di trasporto con le informazioni relative al contesto emissivo (Figura 22, in basso), si può notare che le masse d'aria in arrivo dall'area urbanizzata di Trento, oltre ad essere frequenti, sono anche caratterizzate da tempi di trasporto brevi, inferiori a 6 ore.

Per quel che riguarda la quota media delle traiettorie, si è già notato come, a motivo dell'orografia (Figura 23, in alto), le quote delle traiettorie tendano ad essere molto elevate, abbassandosi solo in prossimità dell'arrivo sul sito. Oltre ad essere più frequenti (Figura 21), le traiettorie in arrivo da Sud sono anche complessivamente più basse; in particolare la quota media di passaggio sull'area urbanizzata di Trento è di circa 300 m.

In conclusione, globalmente la caratterizzazione meteorologica ha mostrato come per questo sito, classificato come sito di fondo rurale, non si possa in realtà escludere l'influenza di almeno due sorgenti emissive importanti: l'Autostrada A22 e l'area urbanizzata di Trento.

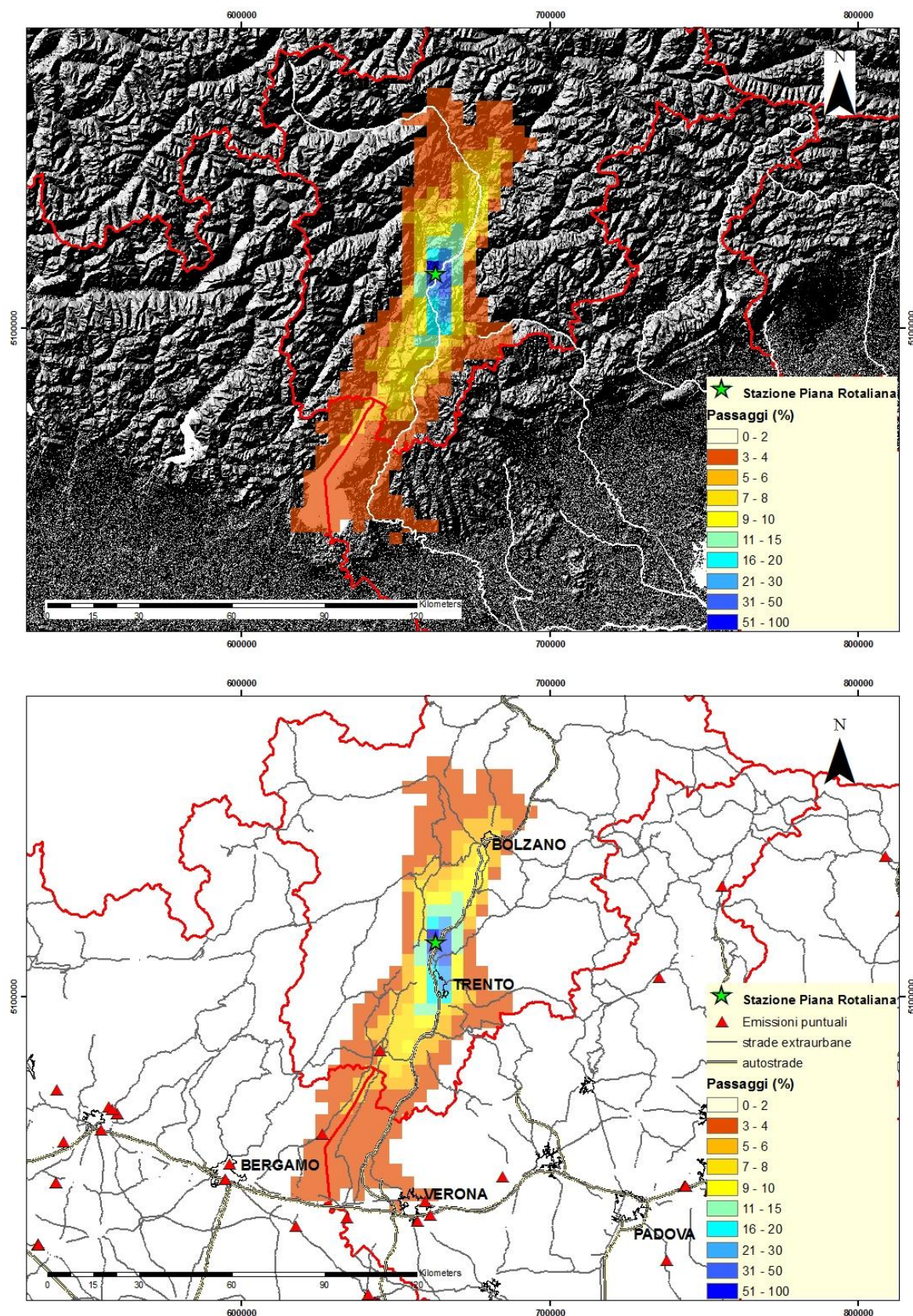


**FIGURA 21. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A PIANA ROTALIANA. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

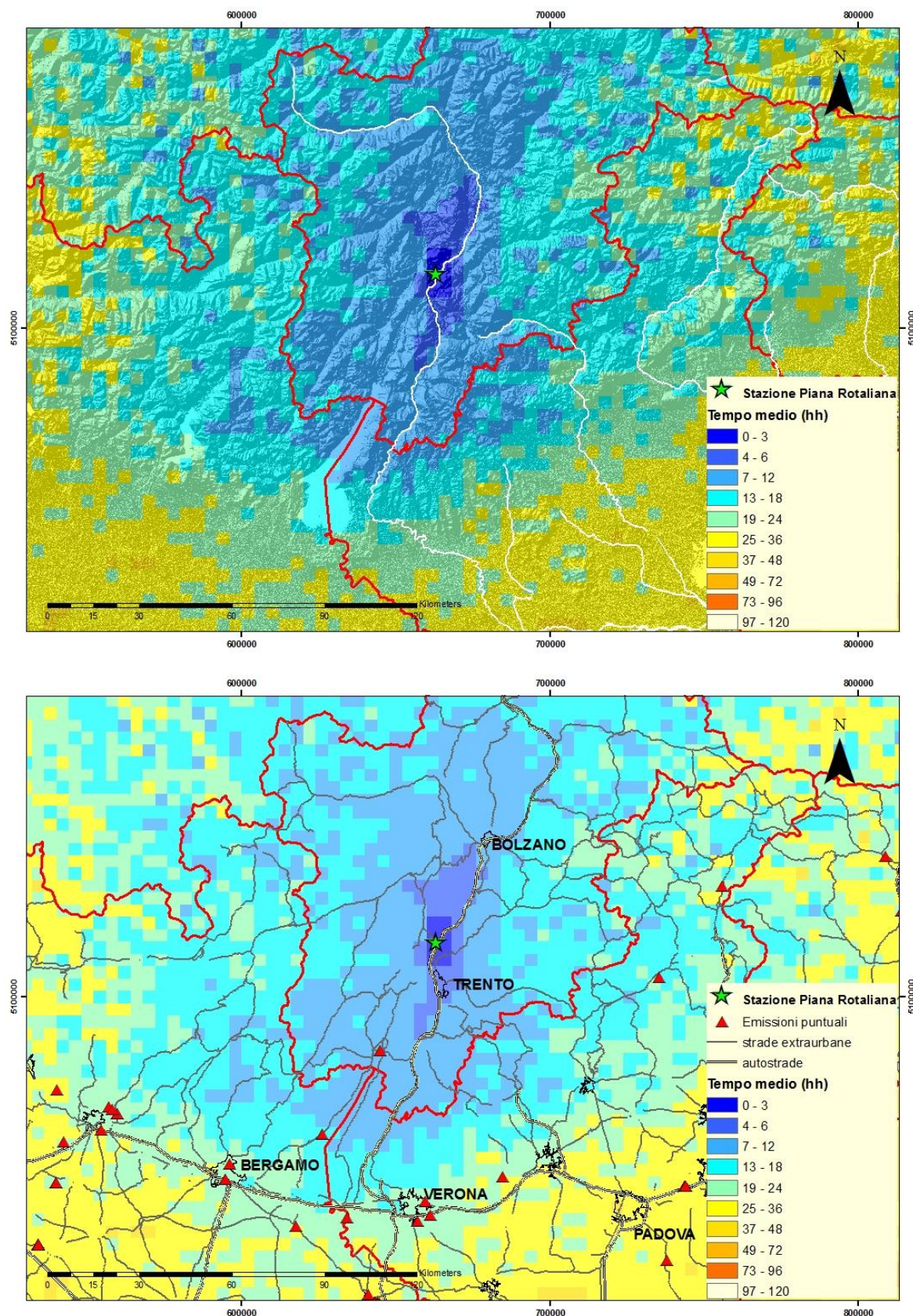


**FIGURA 22. TEMPO MEDIO DI TRASPORTO DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A PIANA ROTALIANA. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

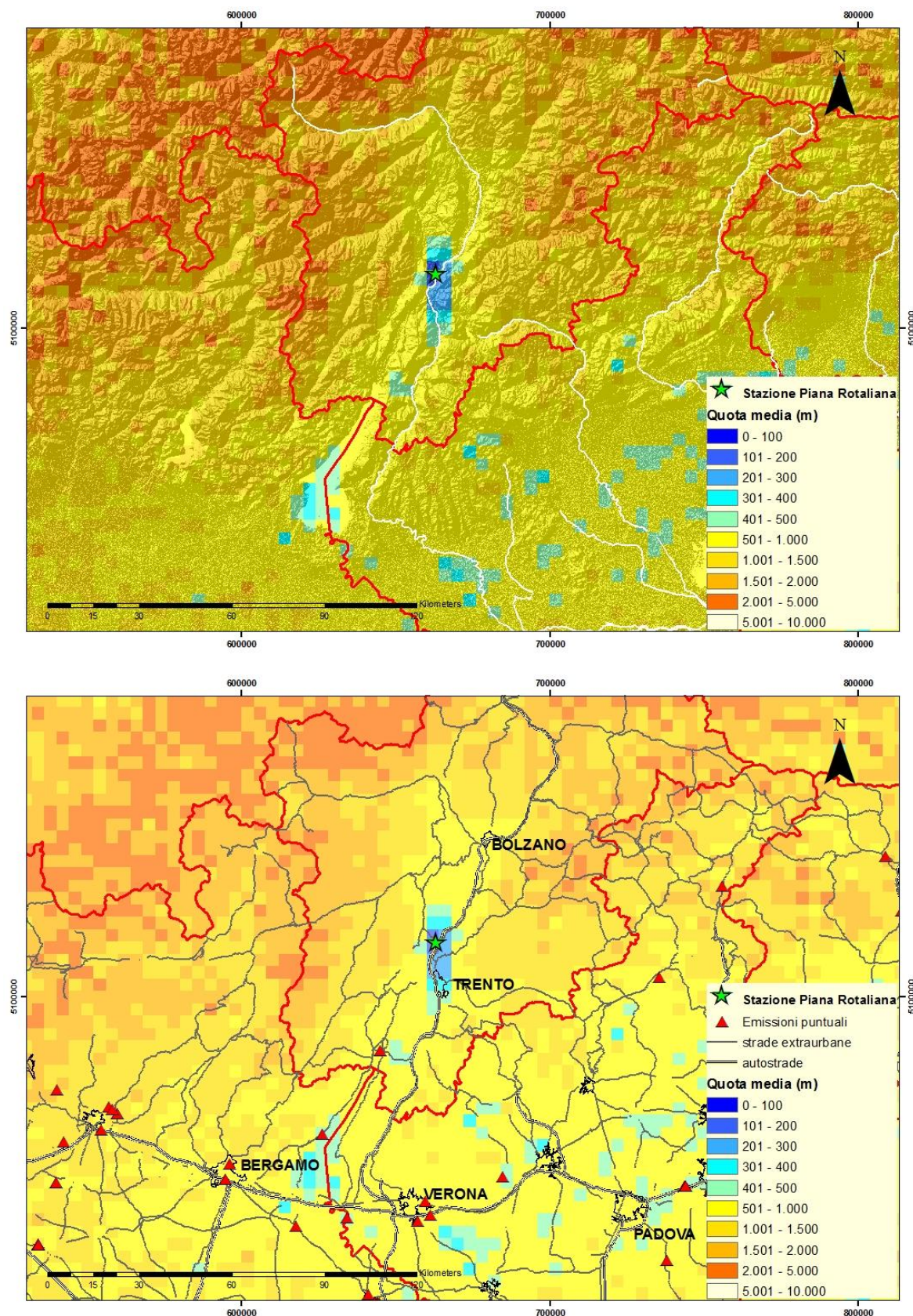


**FIGURA 23. QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A PIANA ROTALIANA.**  
**ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

### 4.2.3 CENMO1

La caratterizzazione anemologica della stazione di CENMO1 è fortemente condizionata dal suo essere situata in prossimità della costa. La mappa della percentuali dei passaggi (Figura 24) mostra un'evidente direzione prevalente, dominata dal regime di brezza terra-mare perpendicolare alla linea di costa, che indica anche una circolazione fondamentalmente influenzata dall'assetto tettonico dell'area con direzione NO-SE. Nell'ambito di questa direzione prevalente, i casi di provenienza da Nord-Ovest sono più frequenti di quelli da Sud-Est, sia localmente sia nell'area più lontana dal sito; globalmente la circolazione pare quindi caratterizzata da venti sinottici da Nord-Ovest (Maestrale), a cui si sovrappone localmente il regime di brezza. Il fatto che l'anemologia dell'isola sia fortemente caratterizzata da venti da Nord-Ovest è confermato anche dai risultati ottenuti per il sito di CENSE0 (vedi Figura 14, colonna di sinistra) presentati al paragrafo § 4.1.1 nell'ambito dell'analisi della variabilità meteorologica inter-annuale. Riprendendo l'analisi sul sito di CENMO1 e incrociando il campo della percentuale dei passaggi con il contesto delle attività antropiche (Figura 24, a destra), si nota che all'interno dell'area caratterizzata da passaggi frequenti (con percentuale maggiore del 10%) è compresa gran parte della zona urbanizzata di Cagliari. Non sono presenti autostrade ma diverse strade extra-urbane, tra le quali la SS131 attraversa tutta l'area caratterizzata da alta percentuale di passaggi. A Nord-Ovest, a circa 20 km dalla stazione, una sorgente puntuale è collocata in una cella caratterizzata da una percentuale di passaggi di circa l'8%.

La mappa del tempo medio di trasporto (Figura 25) mostra, per l'intero dominio, valori molto bassi, coerenti con i forti venti che, come è noto, caratterizzano l'anemologia dell'isola sarda. Essendo CENMO1 dedicata alla misura dei precursori dell'Ozono, si potrebbe teoricamente stimare la massima area di rappresentatività come quella identificata da tempi di trasporto anche in questo caso inferiori a 12 ore (Spangl et al., 2007). Tuttavia per quanto appena esposto, sia tale area sia quella più ristretta, caratterizzata da tempi di trasporto inferiori a 6 ore, sono probabilmente molto più estese dell'effettiva area di rappresentatività, che occorre quindi determinare e delimitare con altre metodologie. E' interessante invece notare (Figura 25, a destra) come sia le masse d'aria in arrivo dall'area urbanizzata di Cagliari sia quelle in arrivo dalla sorgente puntuale siano caratterizzate da tempi di trasporto molto brevi (rispettivamente inferiori a 3 ore e a 6 ore).

Estremamente interessante appare infine il campo della quota media delle traiettorie, coerente con il contesto orografico dell'isola (Figura 26, a sinistra). In particolare le traiettorie tendono a passare a quote più elevate sui rilievi dell'entroterra, mentre quote più basse caratterizzano il passaggio sul bacino del Flumini Mannu. Si osserva inoltre che le traiettorie che provengono dal mare (da Sud-Est) hanno mediamente quote più basse rispetto a quelle provenienti da terra. Incrociando infine il campo della quota media con le informazioni relative al contesto emissivo (Figura 26, a destra), si può notare come sia le masse d'aria in arrivo dall'area urbanizzata di Cagliari sia quelle in arrivo dalla sorgente puntuale siano caratterizzate da quote basse (inferiori a 200 m).

Per quanto riguarda la sorgente puntuale, un'analisi dei dati di inventario ISPRA 2005 ha mostrato come essa sia in realtà caratterizzata da valori emissivi molto bassi sia per quel che riguarda le emissioni di VOC (minori di 1 ton/anno) sia per quel che riguarda quelle di NO<sub>x</sub> (5 ton/anno). In conclusione quindi, questa caratterizzazione meteorologica ha confermato come il sito di CENMO1 sia fondamentalmente influenzato soprattutto dall'area urbanizzata di Cagliari e sia quindi correttamente classificato come sito di fondo urbano.

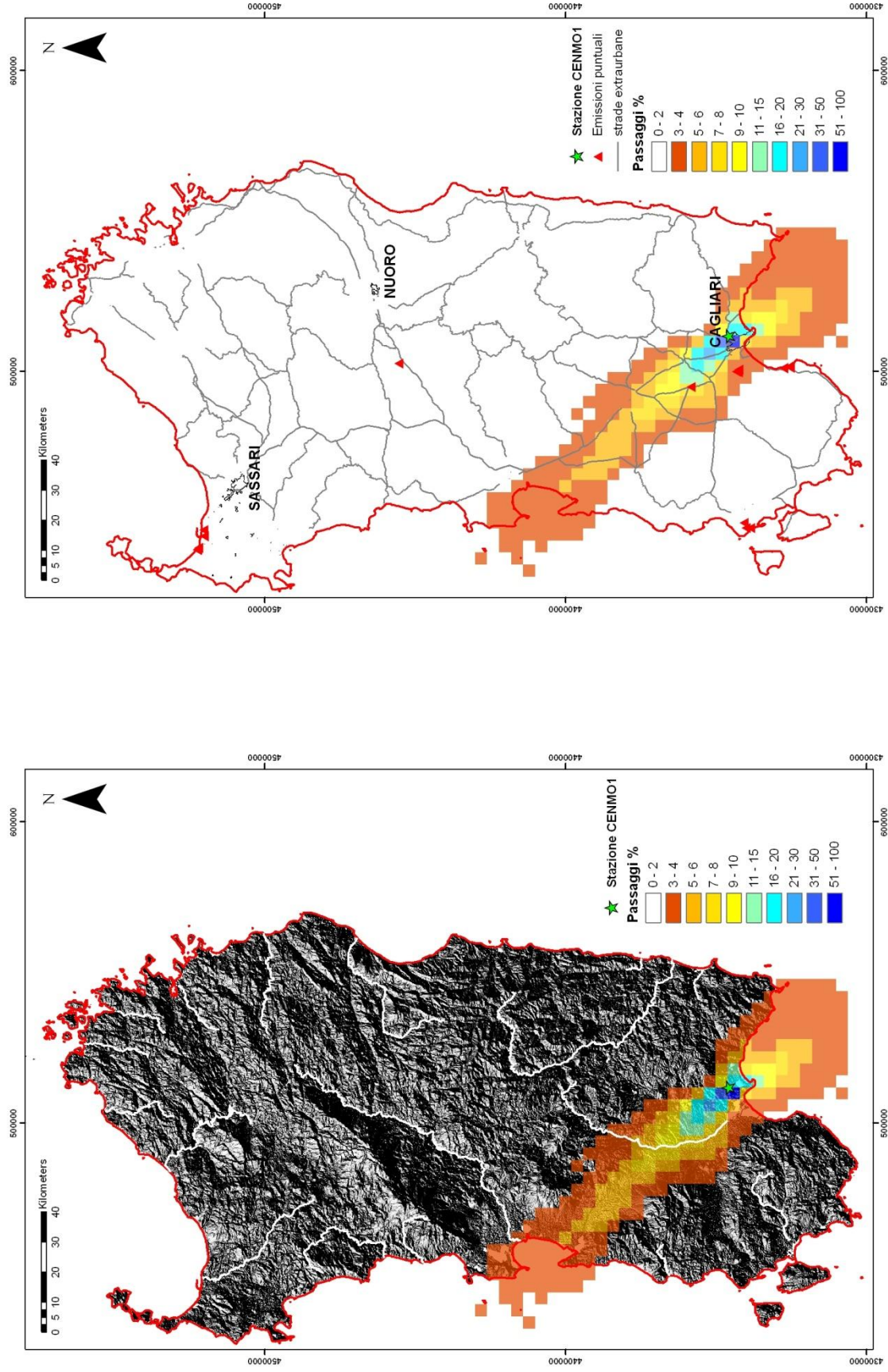


FIGURA 24. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A CENMO1. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (A SINISTRA) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (A DESTRA).

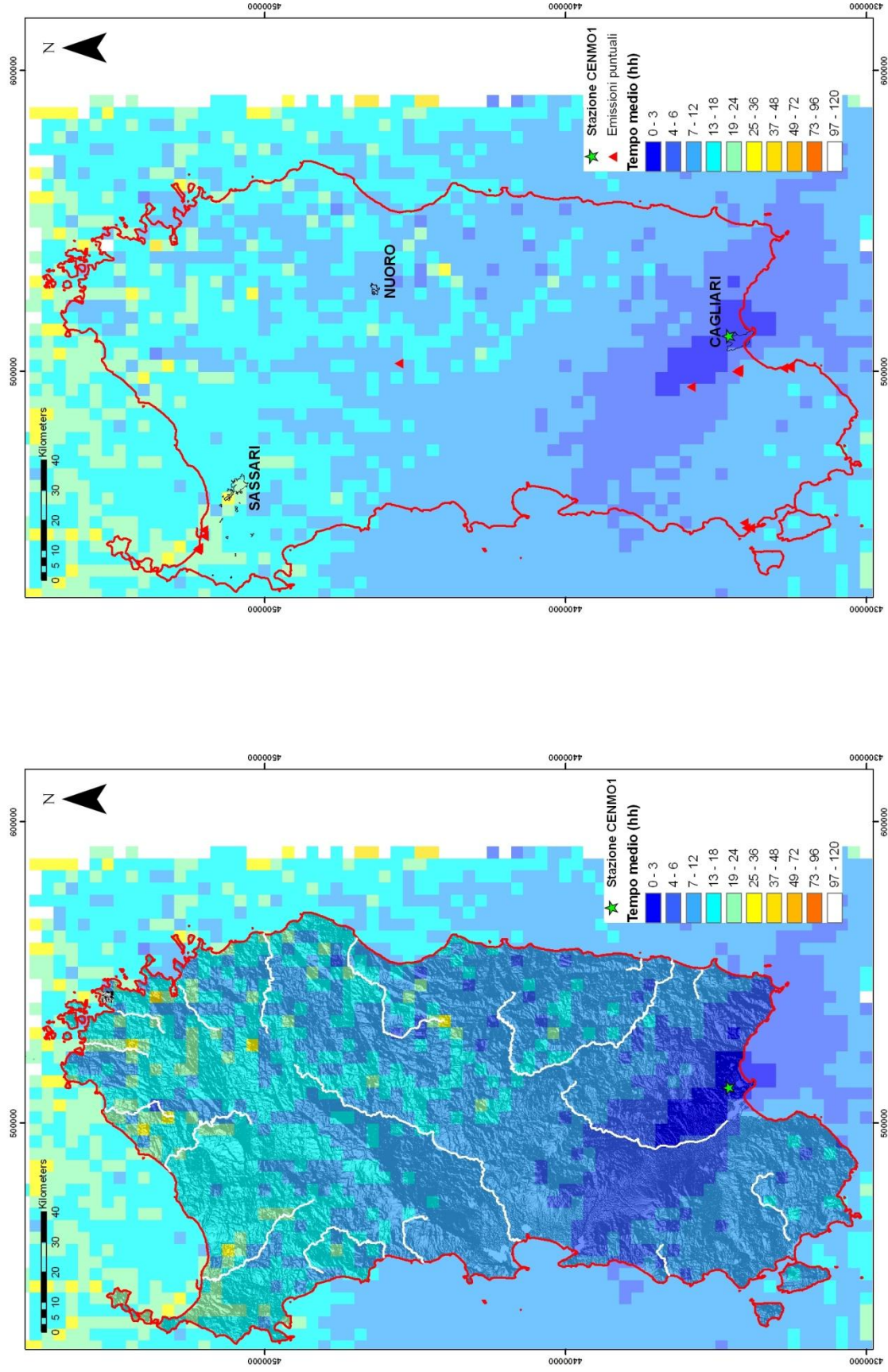


FIGURA 25. TEMPO MEDIO DI TRASPORTO DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A CENMO1. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (A SINISTRA) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (A DESTRA).

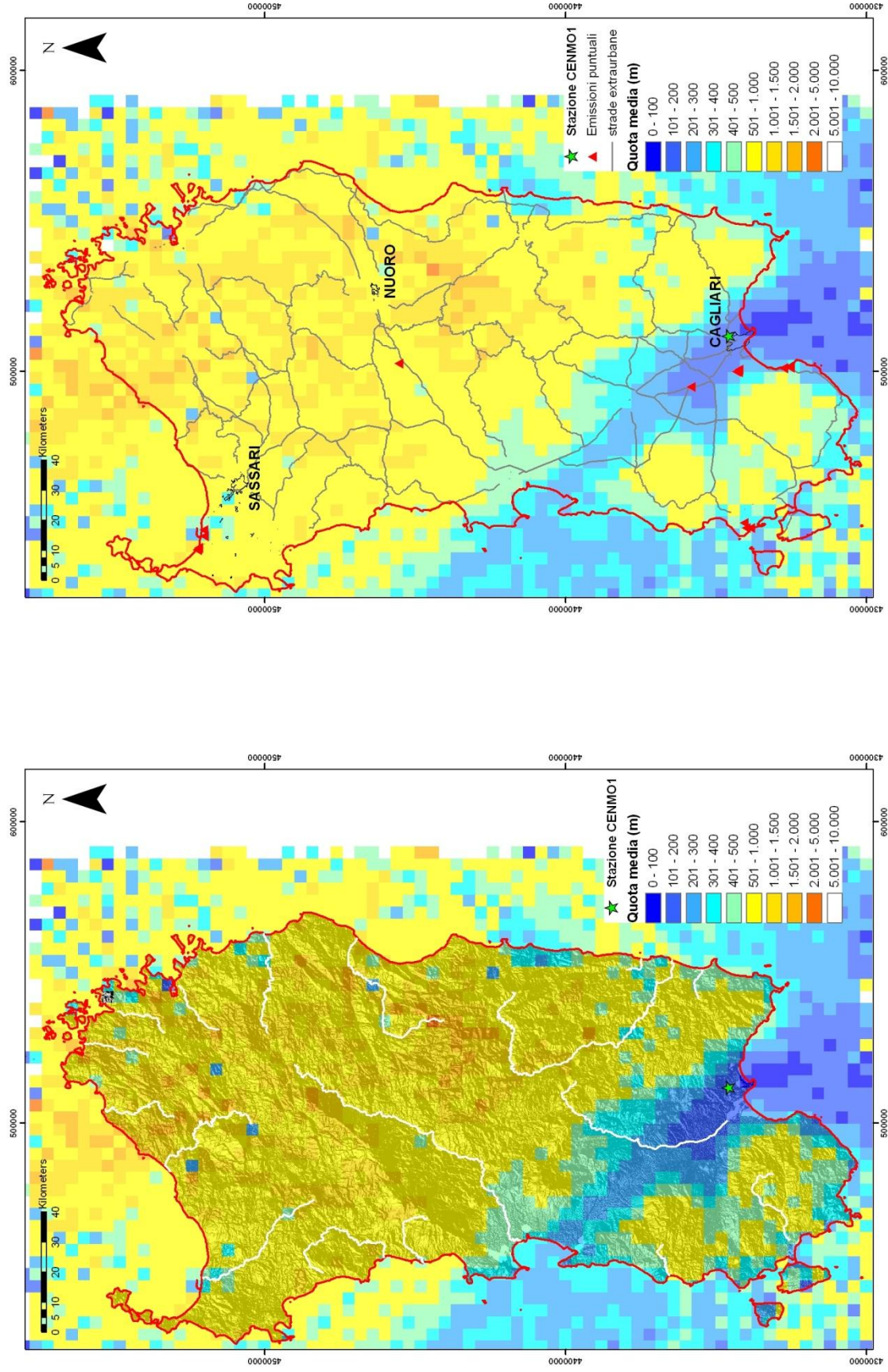


FIGURA 26. QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A CENMO1 .  
 ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO  
 SULL'INSEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (A SINISTRA) E DELLE ATTIVITÀ  
 ANTROPICHE (A DESTRA).

#### 4.2.4 FIRENZE BASSI

Nelle mappe delle prossime Figure viene descritta la caratterizzazione meteorologica del sito di FIRENZE BASSI e ne vengono discusse le proprietà di rappresentatività spaziale alla luce dei tre parametri statistici presentati.

La mappa della percentuale dei passaggi (Figura 27, in alto) mostra che il trasporto delle masse d'aria in arrivo a FIRENZE BASSI è caratterizzato da due direzioni prevalenti di provenienza: da Ovest/Sud-Ovest, in corrispondenza della valle dell'Arno, e da Nord-Est, dalla valle del Lamone. Delle due, la direzione prevalente in termini assoluti è quella da Ovest/Sud-Ovest, sia localmente sia allontanandosi dal sito verso la costa. Inoltre è interessante notare come una percentuale di passaggi piccola (tra il 2% e il 4%), caratterizzi le celle interessate dal proseguimento a Sud-Est della valle dell'Arno. Per quanto riguarda l'influenza delle sorgenti emissive sulle concentrazioni misurate nel sito in esame (Figura 27, in basso), all'interno dell'ipotetica regione di influenza caratterizzata da una percentuale di passaggi maggiore del 10%, sono presenti, oltre all'intera area urbanizzata di Firenze, diversi tratti autostradali: l'Autostrada A1 (Milano-Napoli), la Strada di Grande Comunicazione (S.G.C.) Firenze-Pisa-Livorno, il raccordo Siena-Firenze. Non sono presenti sorgenti puntuali all'interno dell'area caratterizzata da passaggi frequenti; circa 30 km a Est del sito, ma già in una regione caratterizzata da una percentuale di passaggi inferiore al 6%, è localizzata una sorgente, che si è verificato avere emissioni nulle sia di Particolato che di IPA.

La mappa del tempo medio di trasporto (Figura 28) mostra, per gran parte del dominio presentato, valori molto bassi. Il campo dei tempi di trasporto appare coerente con la presenza dei rilievi (Figura 28, in alto), in corrispondenza dei quali le traiettorie tendono a passare a quote mediamente più alte (Figura 29, in alto) e quindi con venti generalmente più intensi. Si nota in particolare che le masse d'aria in arrivo da Nord-Est, pur essendo meno frequenti di quelle provenienti da Ovest/Sud-Ovest (Figura 27), sono caratterizzate da tempi di trasporto minori. Si tratta infatti di masse d'aria che raggiungono il sito da quote mediamente più alte (Figura 29, in alto), a motivo della presenza dei rilievi appenninici che delimitano a oriente la regione Toscana. Per quanto riguarda la possibilità di delimitare la massima area di rappresentatività spaziale, in questo caso è più complesso e delicato desumere tale informazione dalla mappa del tempo medio di trasporto, interpretata in relazione alla scala temporale delle reazioni che coinvolgono in atmosfera l'inquinante interessato. Si tratta infatti di un sito destinato alla misura delle componenti chimiche del Particolato e in particolare degli IPA. La stima dei tempi di vita delle particelle in atmosfera non è semplice e dipende dai diversi tipi di processi che ne causano la rimozione dall'atmosfera (European Commission, 2004). Le particelle più grossolane sono solitamente rimosse per sedimentazione e precipitazione (con tempi di vita di diverse ore per le particelle con diametro maggiore di 20  $\mu\text{m}$  e tra 2 e 4 giorni per particelle più piccole, con diametro tra 2  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ ). Particelle più fini (con diametro tra 0.1  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ ) hanno tempi di vita più lunghi, da alcuni giorni ad alcune settimane. Inoltre il tempo di vita di una particella determina in che misura essa potrà cambiare le sue proprietà, che a loro volta ne modificheranno il tempo di vita, adeguandolo alle nuove caratteristiche. Rispetto a quest'ultima considerazione, occorre inoltre tener conto che il tempo di vita di una particella è condizionato non solo dalle sue proprietà dimensionali ma anche dalla sua composizione chimica (Pósfai and Molnár, 2000; Gaffney et al., 2002) e dalle proprietà termodinamiche dell'atmosfera, quali soprattutto temperatura e umidità che regolano la distribuzione delle varie specie tra fase gassosa e particolato (Adams et al., 1999). Complessivamente quindi sarebbe da ritenere discutibile la scelta di un unico valore come scala temporale da utilizzare per delimitare la massima area di rappresentatività spaziale. Comunque, anche ipotizzando un tempo di scala di almeno una giornata (l'intera scala in blu in Figura 28), l'area identificata, comprendente

gran parte del dominio presentato, sarebbe ampiamente più estesa dell'effettiva area di rappresentatività, che occorrerebbe comunque stimare e delimitare con altri metodi.

Rispetto infine alla mappa delle quote medie già discussa sopra, in riferimento alla sua coerenza con il contesto orografico (Figura 29, in alto), si può qui sottolineare come le masse d'aria provenienti da Ovest/Sud-Ovest, oltre ad essere lievemente più frequenti di quelle da Nord-Est (Figura 27), siano soprattutto caratterizzate da quote più basse, ad indicare una possibile maggiore influenza sulle concentrazioni misurate nel sito delle sorgenti al suolo incontrate da queste traiettorie nel loro percorso. A questo proposito, per questa stazione, classificata come sito di fondo urbano e influenzata in effetti soprattutto dall'area urbanizzata di Firenze, non si può escludere l'influenza del traffico e in particolare del tratto stradale S.G.C. Firenze-Pisa-Livorno, che attraversa la zona dei passaggi frequenti e le cui celle di appartenenza sono caratterizzate, lungo tutto il percorso, da quote medie delle traiettorie inferiori a 200 m (Figura 29, in basso).

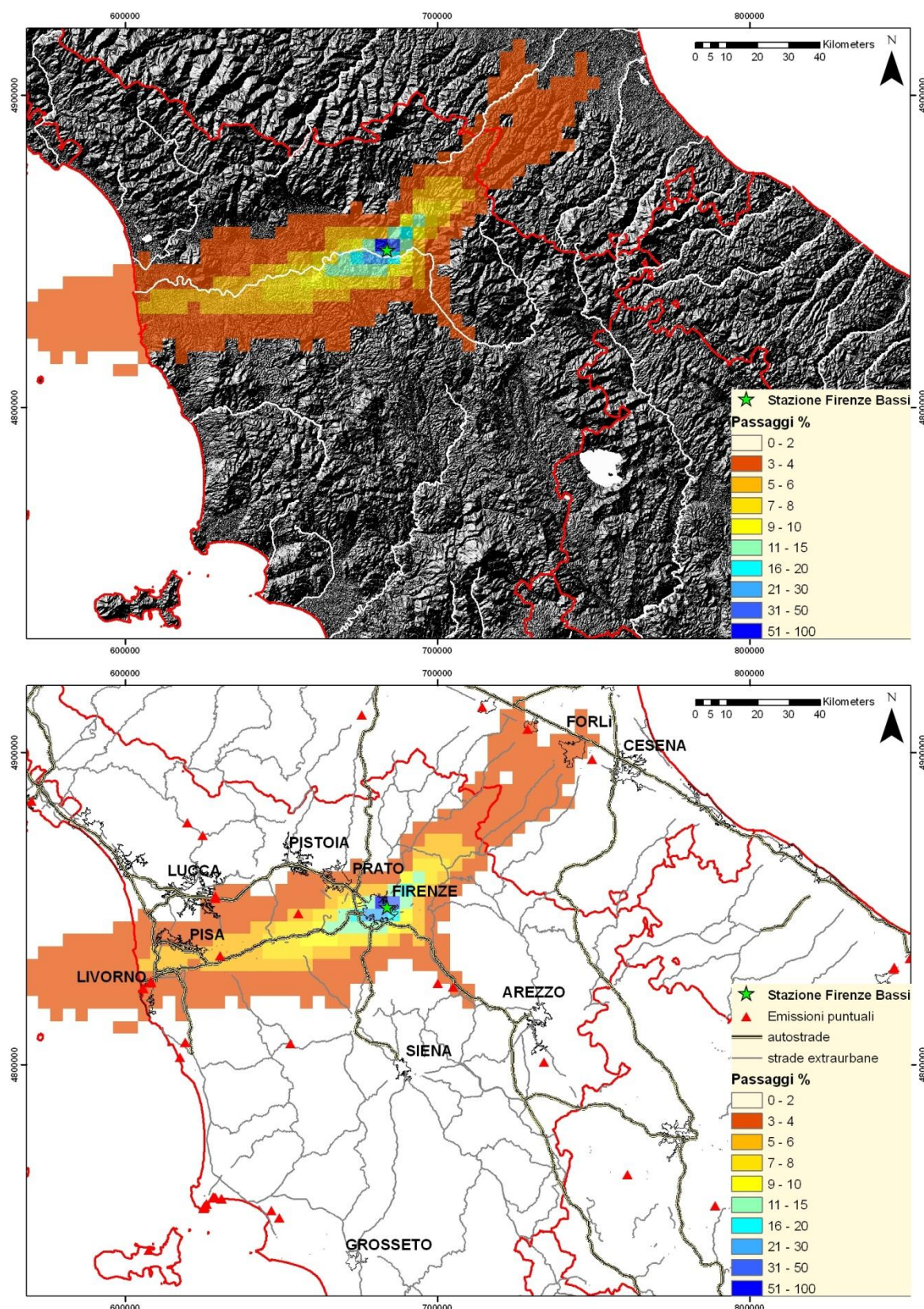


**FIGURA 27. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A FIRENZE BASSI. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

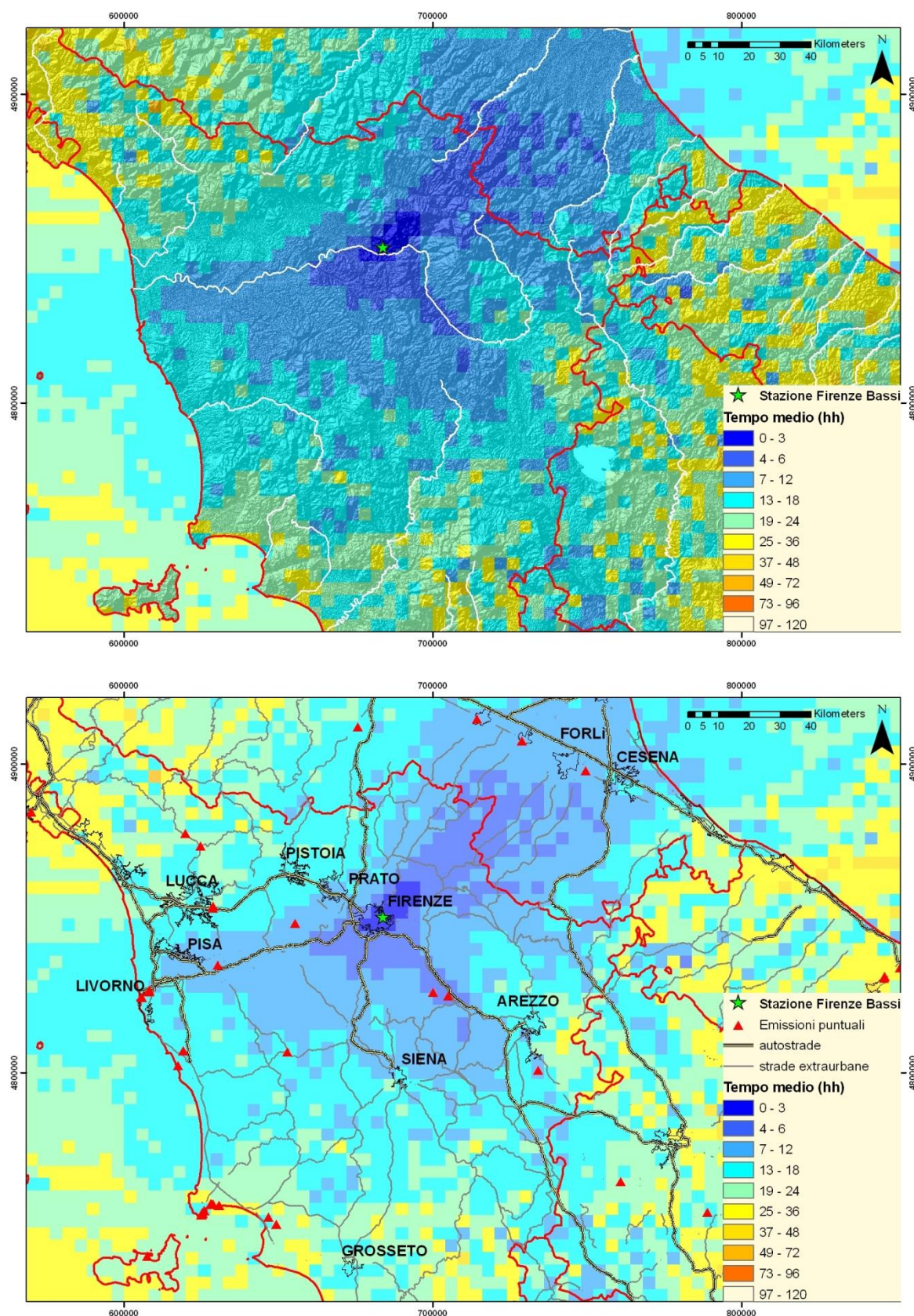


**FIGURA 28. TEMPO MEDIO DI TRASPORTO DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A FIRENZE BASSI. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

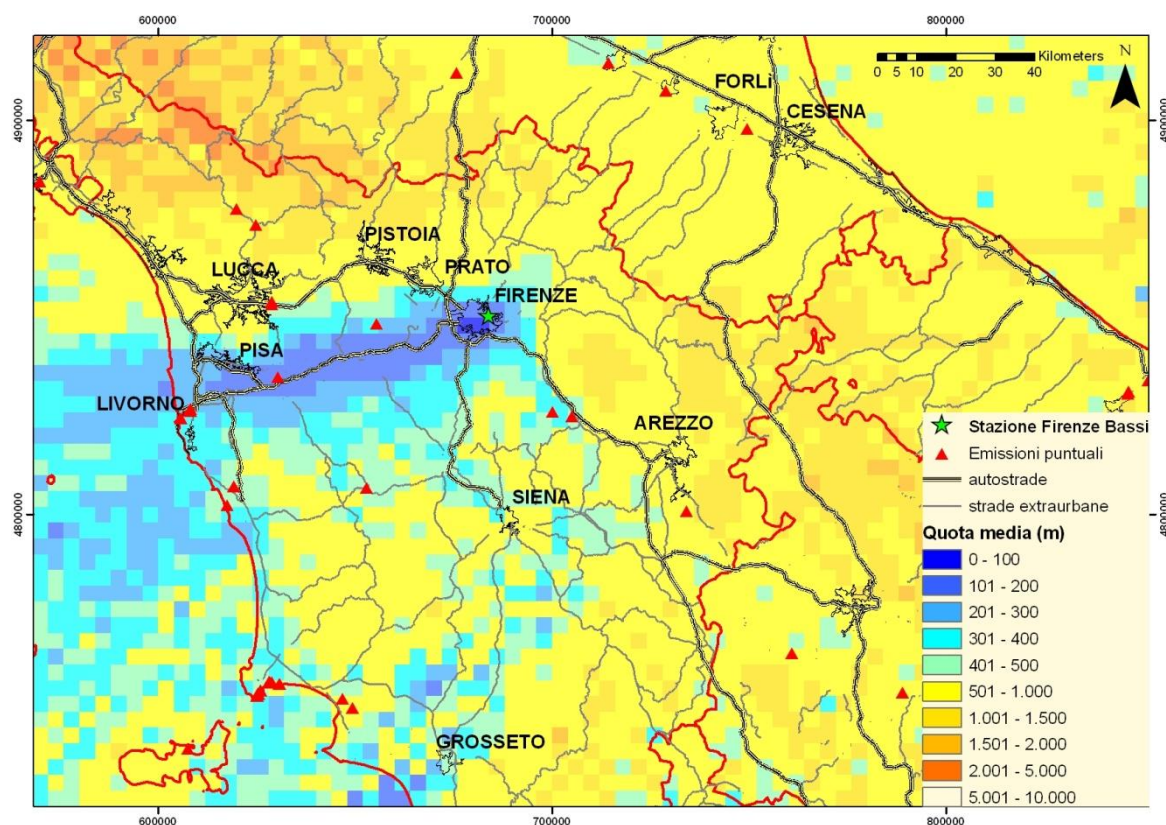
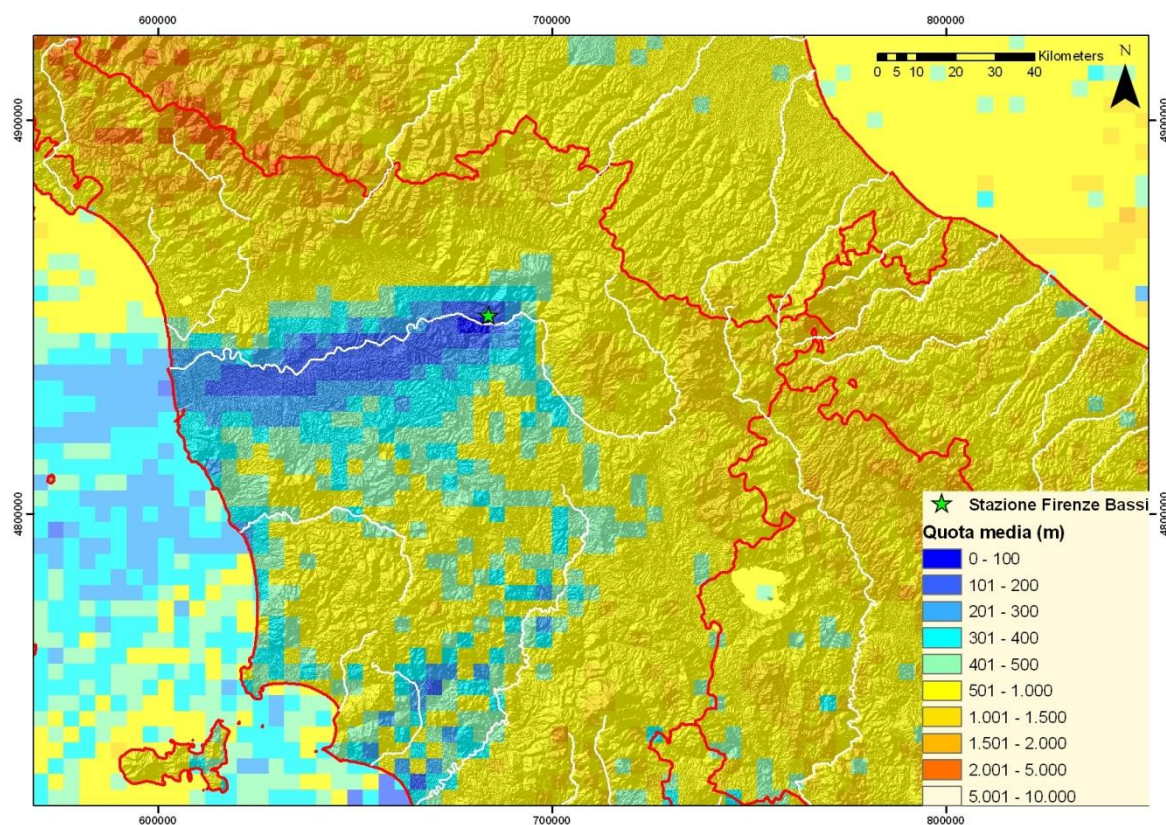


**FIGURA 29. QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A FIRENZE BASSI.**  
 ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).

#### 4.2.5 TARANTO VIA MACHIAVELLI

Viene infine qui presentata e discussa la caratterizzazione meteorologica della rappresentatività spaziale per la stazione di TARANTO VIA MACHIAVELLI.

Come per il sito di CENMO1, la caratterizzazione anemologica della stazione è fortemente condizionata dalla collocazione in prossimità della costa. La mappa della percentuali dei passaggi (Figura 30) mostra chiaramente che la direzione prevalente di provenienza delle masse d'aria è quella perpendicolare alla linea di costa, ad indicare una circolazione fondamentalmente dominata dal regime di brezza terra-mare. Mentre localmente i casi da Sud (da mare) e quelli da Nord (da terra) sono ugualmente frequenti, allontanandosi dal sito l'area caratterizzata da percentuali tra il 2% e 15% è globalmente più estesa verso il mare e allungata in direzione NO-SE. Questo porta a descrivere una circolazione caratterizzata globalmente da venti sinottici prevalenti da Sud/Sud-Est (Scirocco), a cui si sovrappone localmente il regime di brezza. Per quanto riguarda l'influenza delle sorgenti emissive (Figura 30, in basso), all'interno dell'ipotetica regione di influenza (con percentuale di passaggi maggiore del 10%), sono presenti sia lo stabilimento industriale dell'ILVA, sia la porzione Nord dell'area urbanizzata di Taranto. La porzione Sud-Est di Taranto è caratterizzata da una percentuale di passaggi appena più bassa (tra l'8% e il 10%). L'area non è attraversata da autostrade, ma solo da un tratto di una strada statale, la SS7, proseguimento dell'Autostrada Adriatica A14 (Bologna-Taranto). Essendo TARANTO VIA MACHIAVELLI una stazione dedicata alla misura delle componenti chimiche del Particolato e in particolare degli IPA, in questo caso è da ritenere una sorgente emissiva non trascurabile anche il mare, responsabile della produzione di *spray marino*.

La mappa del tempo medio di trasporto (Figura 31) mostra, per l'intero dominio, valori molto bassi. Complessivamente, le masse d'aria provenienti da terra tendono ad arrivare da quote più alte (Figura 32) rispetto a quelle dal mare e sono pertanto caratterizzate da tempi di trasporto più bassi. Per quanto riguarda le sorgenti emissive segnalate (l'area urbanizzata di Taranto e lo stabilimento industriale dell'ILVA), trovandosi entrambe in prossimità della stazione sono caratterizzate da tempi di trasporto molto brevi (inferiori a 3 ore). Per quanto riguarda la possibilità di delimitare la massima area di rappresentatività spaziale, anche in questo caso (come già discusso al paragrafo § 4.2.4) è da ritenere discutibile la scelta di un unico valore come scala temporale da utilizzare per delimitare tale area. Anche in questo caso, come per FIRENZE BASSI, ipotizzando un tempo di scala di almeno una giornata (l'intera scala in blu in Figura 31), l'area identificata sarebbe comunque troppo vasta, ampiamente più estesa dell'effettiva area di rappresentatività, che occorrerebbe delimitare con altri metodi.

In Figura 32 viene infine mostrato il campo della quota media delle traiettorie. Come già notato, le masse d'aria provenienti dal mare sono caratterizzate da quote più basse rispetto a quelle da terra, ad indicare il contributo probabilmente non trascurabile delle emissioni di *spray marino* alle concentrazioni misurate in questo sito. Sono mediamente caratterizzate da quote basse (inferiori a 200 m) anche le masse d'aria in arrivo sia dall'area urbanizzata di Taranto sia dallo stabilimento industriale dell'ILVA. Più elevate sono invece le quote relative ai passaggi sul tratto stradale della SS7.

In conclusione quindi questa caratterizzazione meteorologica ha confermato come, al netto di un eventuale contributo di *spray marino*, il sito di TARANTO VIA MACHIAVELLI sia fondamentalmente influenzato soprattutto dall'area urbanizzata di Taranto e dalle emissioni dello stabilimento industriale dell'ILVA e sia quindi correttamente classificato come sito urbano industriale.

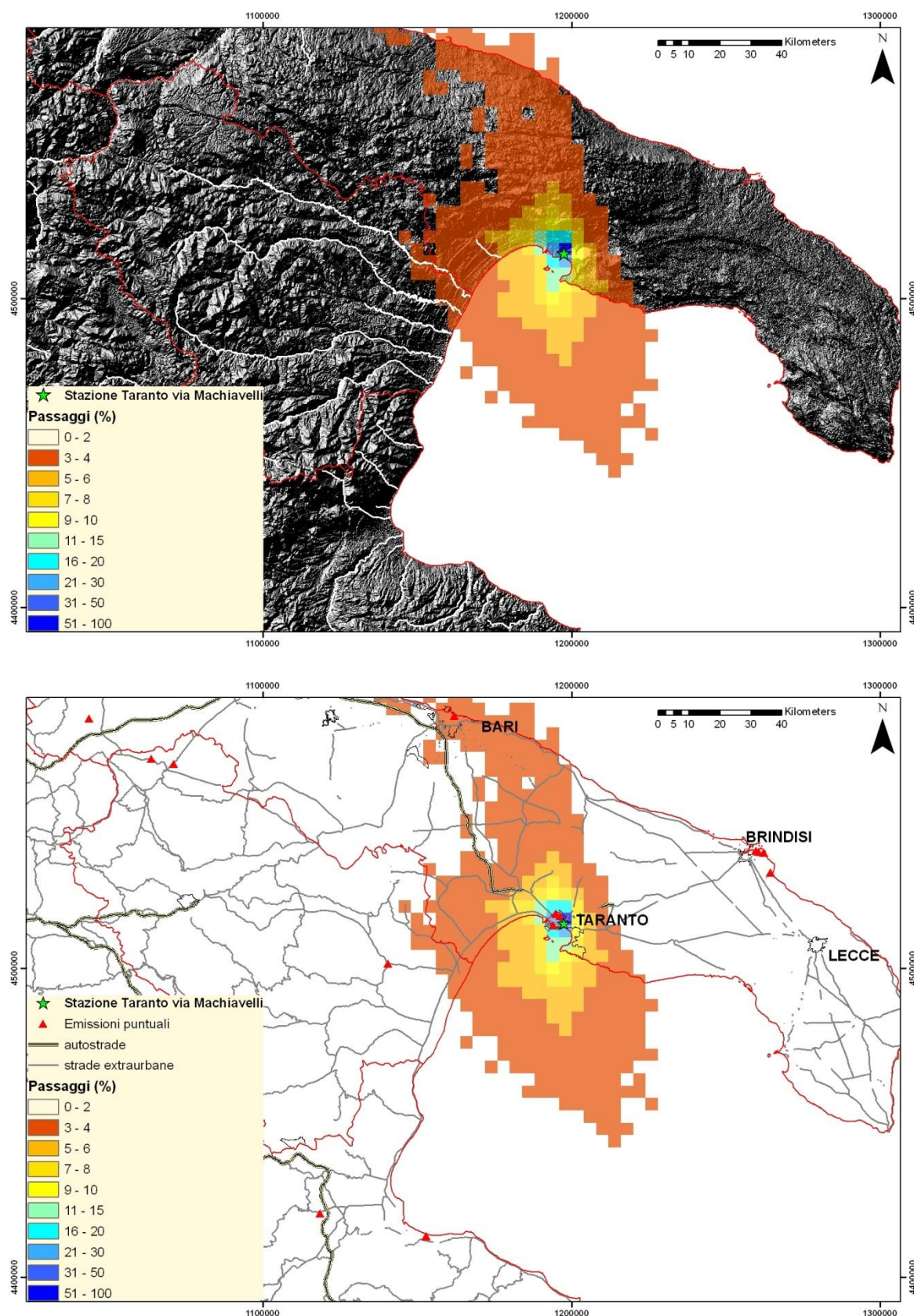


**FIGURA 30. PERCENTUALE DEI PASSAGGI DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TARANTO VIA MACHIAVELLI. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

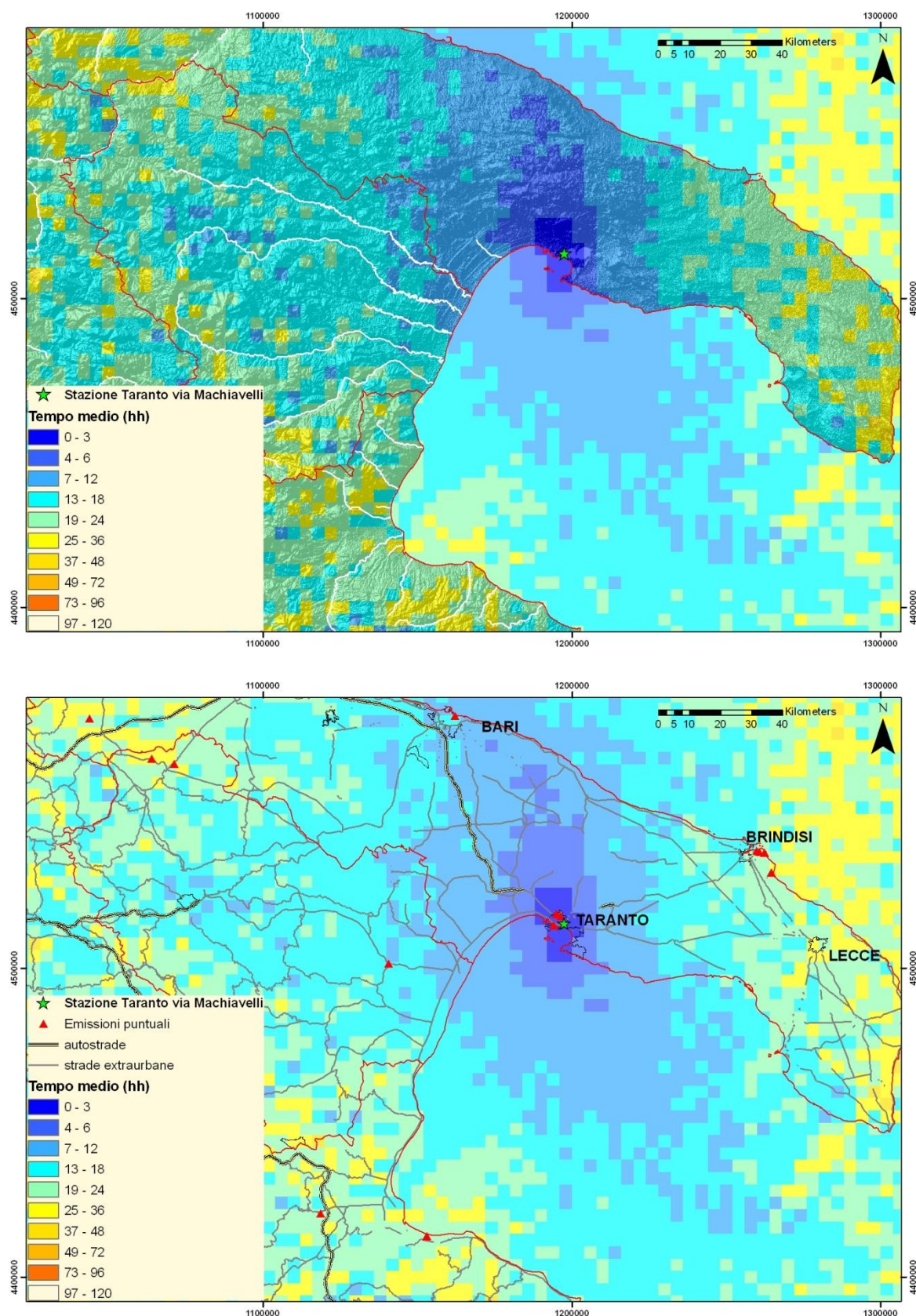


**FIGURA 31. TEMPO MEDIO DI TRASPORTO DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TARANTO VIA MACHIAVELLI . ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

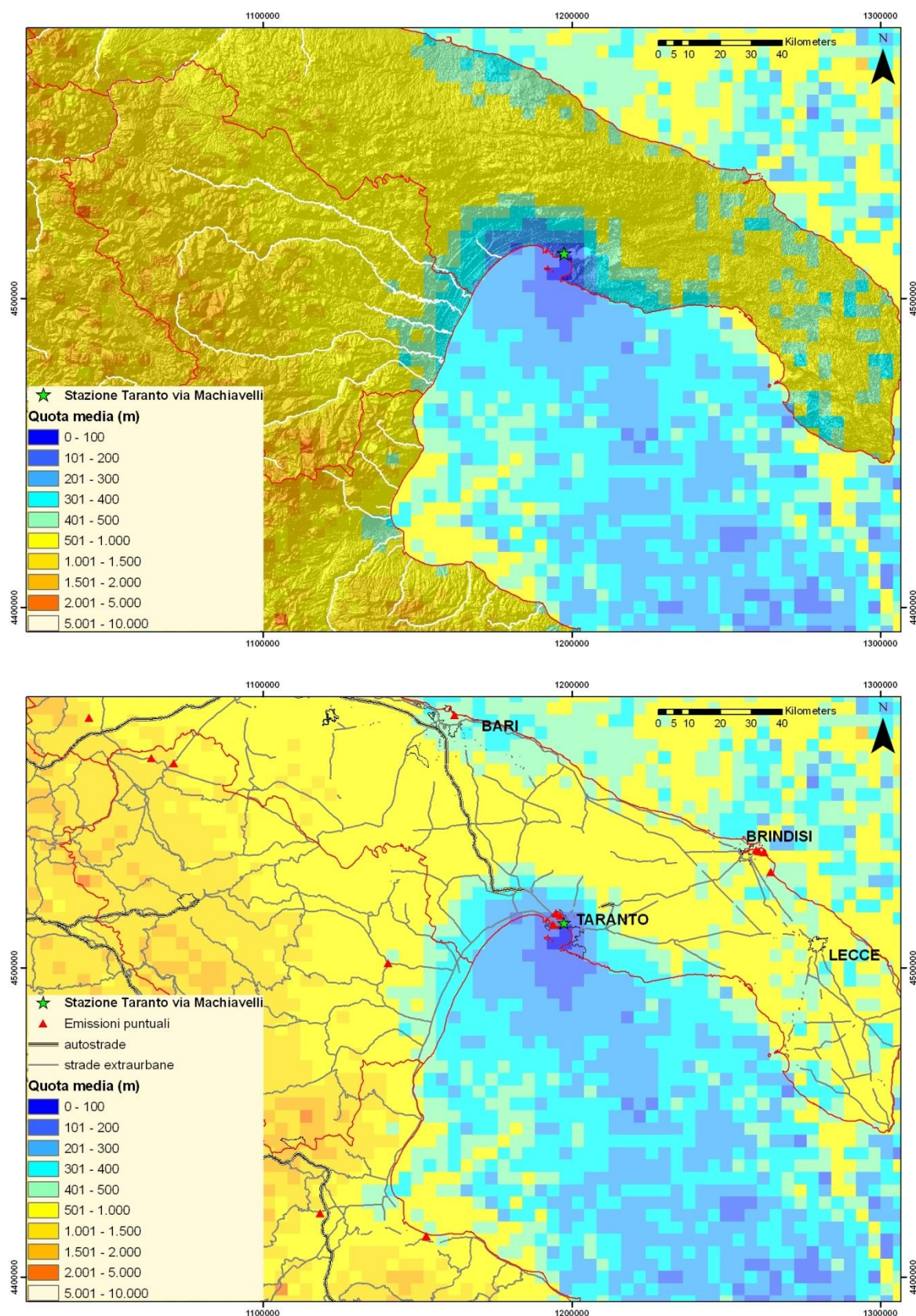


**FIGURA 32. QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE IN ARRIVO A TARANTO VIA MACHIAVELLI. ELABORAZIONI OTTENUTE SU TUTTE LE TRAIETTORIE A DISPOSIZIONE (IN ARRIVO ALLE DIVERSE ORE DELLA GIORNATA, TUTTI I GIORNI DELL'ANNO SULL'INSIEME DELLE TRE ANNUALITÀ). INTEGRAZIONE DEI RISULTATI NEL CONTESTO DEL TERRITORIO NATURALE (IN ALTO) E DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE (IN BASSO).**

## 5 CONCLUSIONI

Nella presente relazione è stato presentato uno studio di rappresentatività spaziale di stazioni di misura dell'inquinamento atmosferico basato sulla caratterizzazione meteorologica del sito in esame dal punto di vista anemologico.

Nei precedenti lavori prodotti per l'Accordo di Collaborazione per l'avvio delle reti speciali, sono stati discussi diversi approcci per la stima della rappresentatività spaziale, basati su diverse basi informative (copertura del suolo, dati emissivi spazializzati, campi di concentrazione); il presente studio completa il quadro, descrivendo e isolando l'effetto dovuto alla meteorologia.

Per caratterizzare la circolazione dominante presso un sito, è pratica comune in letteratura scientifica effettuare uno studio della provenienza delle masse d'aria, ossia ricostruire ed elaborare statisticamente un gran numero di traiettorie in arrivo (*backward trajectories*) nel punto in esame. Complessivamente sono però rari in letteratura lavori scientifici che utilizzino l'elaborazione statistica di *backward trajectories* per l'analisi della rappresentatività spaziale di un sito. In particolare, a conoscenza degli autori e alla luce della ricerca bibliografica effettuata, non è emersa nessuna metodologia condivisa per la stima quantitativa dell'area di rappresentatività.

La metodologia qui presentata, ispirandosi a diversi lavori scientifici, ha proposto l'elaborazione di diverse sintesi statistiche, così da fornire una descrizione anemologica semi-quantitativa ma completa del sito in esame. In particolare tra tutti i parametri calcolati si è scelto di analizzare e discutere i seguenti: la percentuale dei passaggi (per identificare i regimi prevalenti di circolazione), il tempo medio di trasporto (da analizzare in relazione alla scala temporale delle reazioni che avvengono in atmosfera) e la quota media delle traiettorie (per descrivere le proprietà tridimensionali del flusso).

Per poter usufruire della base dati meteorologica ad alta risoluzione messa a disposizione dal Modello Nazionale MINNI, è stato sviluppato un insieme di procedure *ad hoc* (**M-TraCE**) per l'accesso ai campi di vento, il calcolo e infine l'elaborazione statistica delle traiettorie. **M-TraCE** risiede nell'ambiente della GRID-ENEA e può pertanto sia godere di un rapido e immediato accesso allo *storage* MINNI sia usufruire delle ingenti risorse computazionali messe a disposizione della GRID stessa.

Prima della sua applicazione ai siti della Rete delle Stazioni Speciali, il nuovo strumento **M-TraCE** è stato testato verificandone la coerenza con quanto simulato dal modello **HYSPLIT**, uno dei modelli allo stato dell'arte comunemente utilizzati in applicazioni che coinvolgono il calcolo e l'elaborazione di *backward trajectories*. I risultati ottenuti, oltre a confermare la coerenza delle procedure sviluppate, hanno mostrato il valore aggiunto apportato dall'utilizzo di campi di vento a più alta risoluzione, la cui qualità è stata a sua volta valutata tramite il confronto con una base dati meteorologica indipendente e autonomamente validata, fornita dal modello MOLOCH.

La flessibilità e la modularità della procedura sviluppata, insieme alla disponibilità da un lato delle risorse computazionali e dall'altro di una base dati meteorologica comprensiva di diverse annualità, hanno consentito di effettuare l'analisi di rappresentatività per tutti i siti della Rete delle Stazioni Speciali, e per ciascuno di essi su un'ampia base statistica: 4 traiettorie calcolate ogni giorno, per tutti i giorni dell'anno, per tre annualità.

L'insieme dei risultati a disposizione ha fornito quindi, per ciascun sito, non solo un'analisi sintetica d'insieme, ma anche una valutazione della variabilità di tale stima al variare delle condizioni meteorologiche sia su lungo periodo (variabilità meteorologica inter-annuale) sia su breve scala temporale a motivo di eventuali regimi locali, caratterizzati da ciclicità giornaliera.

Lo studio della variabilità meteorologica inter-annuale, in coerenza con quanto emerso da precedenti analisi sulla base dati MINNI, ha mostrato complessivamente il valore aggiunto di un'analisi basata su un campione di tre anni che, essendo statisticamente più rappresentativo, è in grado da un lato di mediare gli effetti dovuti alla variabilità meteorologica inter-annuale e dall'altro di ridurre eventuali effetti di "rumore" statistico.

Lo studio dell'effetto della variabilità meteorologica giornaliera ha mostrato come l'analisi statistica delle traiettorie (calcolate utilizzando la base dati ad alta risoluzione di MINNI) riesca a catturare bene, laddove siano presenti, eventuali regimi locali di circolazione caratterizzati durante il giorno da una specifica ciclicità. Ad esempio sono apparsi globalmente ben ricostruiti sia i regimi di brezza terra-mare sia quelli di brezza monte-valle.

Dall'analisi dei risultati ottenuti sono stati selezionati alcuni siti della Rete delle Stazioni Speciali destinati alla misura di diversi inquinanti e caratterizzati da diversi contesti territoriali, sia dal punto di vista orografico che dal punto di vista delle attività emissive. Al fine di valutare le potenzialità della metodologia sviluppata nel fornire indicazioni sulla rappresentatività spaziale, su tali siti è stata effettuata una più approfondita analisi ambientale e territoriale, basata sull'integrazione, in ambiente GIS, dei parametri statistici elaborati dalla metodologia con altri strati informativi del territorio. In particolare, le informazioni relative al contesto del territorio naturale hanno fornito una spiegazione dei risultati, in termini di origini e di cause della caratterizzazione anemologica ottenuta.

Inoltre, l'analisi congiunta dei campi delle percentuali dei passaggi e delle quote medie delle traiettorie, incrociata con i principali strati informativi delle attività antropiche, ha consentito di identificare, per ciascun sito analizzato, quali fonti emissive, presenti nel suo intorno, si possa ritenere forniscano un contributo sostanziale alle concentrazioni misurate. Alla luce della caratterizzazione meteorologica, per ciascuna stazione, di diversa tipologia (in riferimento alla classificazione EoI), è stato pertanto possibile, fornire una valutazione d'insieme, basata su dati oggettivi, sulla sua corrispondenza o meno con la relativa classificazione.

Per quanto riguarda la definizione delle dimensioni dell'area di rappresentatività, la metodologia non ne ha consentito una stima quantitativa, ma solo una valutazione in termini di estensione massima, analizzando i campi dei tempi medi di trasporto in relazione alla scala temporale delle reazioni che avvengono in atmosfera. Tale stima può però, per definizione (essendo un valore massimo), sovrastimare anche ampiamente (specie per i siti dedicati alla misura del Particolato) l'area di rappresentatività effettiva, che occorre pertanto valutare e delimitare con altri metodi.

Complessivamente quindi questa metodologia non si è mostrata adatta per la stima assoluta e quantitativa dell'area di rappresentatività, anche a causa dell'assenza di letteratura scientifica al riguardo. La stessa stima dell'estensione massima è soggetta all'incertezza associata alla definizione dei tempi di scala delle reazioni chimiche in atmosfera.

Ciò nonostante il metodo sviluppato presenta un approccio innovativo e originale per lo studio della rappresentatività spaziale di una stazione di monitoraggio. In questa sua prima applicazione ha mostrato ottime potenzialità nel fornire, attraverso l'analisi integrata dei diversi parametri statistici elaborati, una particolareggiata caratterizzazione anemologica del sito. Per i casi in cui è stato

effettuato il confronto con l'approccio basato sull'analisi dei campi di concentrazione (Vitali et al., 2013), i risultati forniti dalle due metodologie si sono mostrati coerenti. Inoltre il valore aggiunto di questo studio ha consentito di caratterizzare e isolare gli effetti dovuti alla sola meteorologia, mostrando come questo metodo possa essere efficacemente utilizzato a supporto di altre metodologie.

L'applicazione della metodologia ha permesso inoltre un nuovo, proficuo e innovativo utilizzo dei campi di vento messi a disposizione dal Modello Nazionale MINNI, mentre lo sviluppo del nuovo *tool* **M-TraCE** ha messo a disposizione della suite modellistica di MINNI un nuovo strumento per l'esplorazione e l'analisi integrata del *database*. **M-TraCE** si presenta come un valido strumento per valutazioni generali come la caratterizzazione del regime di circolazione di un sito, ai fini della pianificazione di nuove reti o per l'interpretazione di misure sperimentali o a supporto di validazioni modellistiche di qualità dell'aria.

## 6 BIBLIOGRAFIA CITATA

- Adams P.J., Seinfeld J.H., Koch D.M. (1999), Global concentrations of tropospheric sulphate, nitrate, and ammonium aerosol simulated in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 104, 13791-13823.
- Artuso F., Chamard P., Piacentino S., Di Sarra A., Meloni D., Monteleone F., Sferlazzo D., Thiery F. (2007), Analysis of atmospheric methane measurements in Lampedusa during 1995-2005, *Atmospheric Environment*, 41, 3877-3888.
- Becker A., Wotawa G., De Geer L.E., Seibert P., Draxler R.R., Sloan C., D'Amours R., Hort M., Glaab H., Heinrich P., Grillon Y., Shershakov V., Katayama K., Zhang Y., Stewart P., Hirtl M., Jean M., Chen P. (2007), Global backtracking of anthropogenic radionuclides by means of a receptor oriented ensemble dispersion modelling system in support of nuclear-test-ban treaty verification. *Atmos. Environ.* 41, 4520-4534.
- Bourcier L., Sellegri K., Masson O., Zangrando R., Barbante C., Gambaro A., Pichon J.M., Boulon J., Laj P. (2010), Experimental evidence of biomass burning as a source of atmospheric <sup>137</sup>Cs, puy de Dôme (1465 m a.s.l.), France. *Atmospheric Environment*, 44, 2280-2286.
- Chen L.W.A., Watson J. G., Chow J. C., DuBois D. W., Herschberge, L. (2011), PM<sub>2.5</sub> source apportionment: Reconciling receptor models for U.S. nonurban and urban long-term networks. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 61, 1204-1217.
- Ciardini V., Di Iorio T., Di Liberto L., Tirelli C., Casasanta G., Di Sarra A., Fiocco G., Fuà D., Cacciani M. (2012), Seasonal variability of tropospheric aerosols in Rome *Atmospheric Research*, 118, 205-214.
- Cohen D.D., Crawford J., Stelcer E., Atanacio A. (2012), A new approach to the combination of IBA techniques and wind back trajectory data to determine source contributions to long range transport of fine particle air pollution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 273, 186-188.
- Cotton W.R., Pielke R. A., Walko R. L. , Liston G. E., Tremback C. J., Jiang H., McAnelly R. L., Harrington J. Y., Nicholls M. E., Carrio G. G. and McFadden J. P., (2003), RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 82, 5-29.
- Cremona G., Ciancarella L., Cappelletti A., Ciucci A., Piersanti A., Righini G., Vitali L. (2013), Rappresentatività spaziale di misure di qualità dell'aria. Valutazione di un metodo di stima basato sull'uso di dati emissivi spazializzati, Rapporto Tecnico RT/2013/2/ENEA, ENEA.
- Ding A. J., Wang T., Xue L. K., Gao J., Stohl A., Lei H., Jin D., Ren Y., Wang X., Wei X., Qi Y., Liu J., Zhang X. (2009), Transport of north China air pollution by midlatitude cyclones: case study of aircraft measurements in summer 2007, *J. Geophys. Res.*, 114, D08304, doi:10.1029/2008jd011023.
- Draxler R.R. and Hess G.D. (1998), An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 47, 295-308.

DM 29 novembre 2012: “Individuazione delle stazioni speciali di misurazione della qualità dell'aria previste dall'articolo 6, comma 1, e dall'articolo 8, commi 6 e 7 del decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155” (GU n. 299 del 24 dicembre 2012).

European Commission, 2004. Second position paper on particulate matter—CAFE Working Group on Particulate Matter, April 2004.

[http://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/pdf/working\\_groups/2nd\\_position\\_paper\\_pm.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/pdf/working_groups/2nd_position_paper_pm.pdf)

European Council (1997), Council Decision 97/101/EC of 27 January 1997 establishing a reciprocal exchange of information and data from networks and individual stations measuring ambient air pollution within the Member States (EoI Decision).

Finardi S., (2011), Influenza sullo stato di qualità dell'aria della variazione meteorologica interannuale. ARIANET R2011.41. (V SAL, Prodotto P19 della Convenzione MATTM ed ENEA: “SVILUPPO, VERIFICA E NUOVE APPLICAZIONI DEL SISTEMA MODELLISTICO MINNI A SUPPORTO DELLE POLITICHE DI QUALITÀ DELL’ARIA NAZIONALI E DEI PIANI E PROGRAMMI DI RISANAMENTO DELLA QUALITÀ DELL’ARIA REGIONALI”).

Folini D., Ubl S. and Kaufmann P. (2008), Lagrangian particle dispersion modeling for the high Alpine site Jungfraujoch. *J. Geophys. Res.*, 113, D18111, doi:10.1029/2007JD009558.

Folini D., Kaufmann P., Ubl S. and Henne S. (2009), Region of influence of 13 remote European measurement sites based on modeled CO mixing ratios. *J. Geophys. Res.*, D08307, doi: 10.1029/2008JD011125.

Gaffney J.S., Marley N.A., Cunningham M. M., Martello D.V., Anderson N.J. (2002), Using Natural <sup>210</sup>Pb and its Daughters (<sup>210</sup>Bi and <sup>210</sup>Po) to Estimate Aerosol Residence Times. Proceedings of the NETL Conference "PM<sub>2.5</sub> and Electric Power Generation: Recent Findings and Implications" Pittsburgh, PA, April 9-10, 2002. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/PM25/>

Glaab H., Fay B., Jacobsen I (1998), Evaluation of the emergency dispersion model at the deutscher wetterdienst using ETEX data, *Atmos. Environ.*, 32, 4359–4366.

Henne S., Klausen J., Junkermann W., Kariuki J. M., Aseyo J. O., Buchmann B. (2008), Representativeness and Climatology of Carbon Monoxide and Ozone at the Global GAW Station Mt. Kenya in Equatorial Africa. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3119–3139. <http://www.atmos-chem-phys.net/8/3119/2008/>.

Henne S., Brunner D., Folini D., Solberg S., Klausen J., Buchmann B. (2010), Assessment of parameters describing representativeness of air quality in-situ measurement sites. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3561–3581.

Hussein T., Al-Ruz, R.A., Petäjä T., Junninen, H., Arafah D.-E., Hämeri K., Kulmala M. (2011), Local air pollution versus short-range transported dust episodes: A comparative study for submicron particle number concentration. *Aerosol and Air Quality Research*, 11 (2), 109–119.

Jonson J. E., Stohl A., Fiore A. M., Hess P., Szopa S., Wild O., Zeng G., Dentener F.J., Lupu A., Schultz M.G., Duncan B.N., Sudo K., Wind P., Schulz M., Marmer E., Cuvelier C., Keating T., Zuber A., Valdebenito A., Dorokhov V., De Backer H., Davies J., Chen G.H., Johnson B., Tarasick D.W., Stubi R., Newchurch M.J., von der Gathen P., Steinbrecht W., Claude H.A., (2010), Multi-model analysis of vertical ozone profiles *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5759–5783.

- José R.S., Stohl A., Karatzas K., Bohler T., James P., Pérez J.L. (2005), A modelling study of an extraordinary night time ozone episode over Madrid domain. *Environmental Modelling & Software*, 20, 587-593.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- Kuang S., Newchurch M. J., Burris J., Wang L., Knupp K., Huang G. (2012), Stratosphere-to-troposphere transport revealed by ground-based lidar and ozonesonde at a midlatitude site, *J. Geophys. Res.*, 117, D18305, doi:10.1029/2012JD017695.
- Larssen S., Sluyter R., and Helmis C. (1999), Criteria for EUROAIRNET – The EEA Air Quality Monitoring and Information Network, Technical report No. 12/1999, European Environment Agency.
- Malguzzi P., Grossi G., Buzzi A., Ranzi R., Buizza R. (2006), The 1966 'century' flood in Italy: A meteorological and hydrological revisitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D24106.
- Marenco F., Bonasoni P., Calzolari F., Ceriani M., Chiari M., Cristofanelli P., D'Alessandro A., Fermo P., Lucarelli F., Mazzei F., Nava S., Piazzalunga A., Prati P., Valli G., Vecchi R. (2006), Characterization of atmospheric aerosols at Monte Cimone, Italy, during summer 2004: Source apportionment and transport mechanisms. *J. Geophys. Res.* 111, D24202, doi:10.1029/2006JD007145.
- Masiol M., Rampazzo G., Ceccato D., Squizzato S., Pavoni B. (2010), Characterization of PM<sub>10</sub> sources in a coastal area near Venice (Italy): An application of factor-cluster analysis. *Chemosphere*, 80 (7), 771-778.
- Meloni D., Di Sarra A., Biavati G., DeLuisi J. J., Monteleone F., Pace G., Piacentino S., Sferlazzo D. M. (2007), Seasonal behavior of Saharan dust events at the Mediterranean island of Lampedusa in the period 1999-2005. *Atmos. Environ.*, 41, 3041-3056.
- Nappo C. J., Caneill J. Y., Furman R. W., Gifford F. A., Kaimal J. C., Kramer M. L., Lockhart T. J., Pendergast M. M., Pielke R. A., Randerson D. , Shreffler J. H. and Wyngaard J. C. The Workshop on the Representativeness of Meteorological-Observations, June 1981, Boulder, Colorado, USA, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 63, 761–764, 1982.
- Pace G., Meloni D., Di Sarra A. (2005), Forest fire aerosol over the Mediterranean basin during summer 2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, D21202, doi:10.1029/2005JD005986.
- Papayannis A., Amiridis V., Mona L., Tsaknakis G., Balis D., Bosenberg J., Chaikovski A., De Tomasi F., Grigorov I., Mattis I., Mitev V., Muller D., Nickovic S., Perez C., Pietruczuk A., Pisani G., Ravetta F., Rizi V., Sicard M., Trickl T., Wiegner M., Gerding M., Mamouri R. E., Amico G., Pappalardo G.(2008), Systematic lidar observations of Saharan dust over Europe in the frame of EARLINET (2000-2012). *J. Geophys. Res.*, 113, D10204, doi:10.1029/2007JD009028.
- Perrone M.R., Becagli S., Garcia Orza J.A., Vecchi R., Dinoi A., Udisti R., Cabello M. (2013), The impact of long-range-transport on PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> at a Central Mediterranean site. *Atmos. Environ.*, 71, 176-186.

- Petit R.H., LeGrand M., Jankowiak I., Molinie J., Mansot J.L., Marion G., Asselin De Beauville C. (2005), Transport of Saharan dust over the Caribbean Islands: Study of an event. *J. Geophys. Res.*, 110, No. D18, D18S09, special issue: Quantifying the radiative and the biogeochemical impact of mineral dust.
- Piersanti A., Ciancarella L., Cremona G., Righini G., Vitali L. (2013), Rappresentatività spaziale di misure di qualità dell'aria. Valutazione di un metodo di stima basato su fattori oggettivi, Rapporto Tecnico RT/2013/1/ENEA, ENEA.
- Pósfai M., Molnár A. (2000), Aerosol particles in the troposphere: a mineralogical introduction. In *Environmental Mineralogy*. Edited by David J. Vaughan and Roy A. Wogelius, pp 434.
- Remoundaki E., Papayannis A., Kassomenos P., Mantas E., Kokkalis P., Tsezo, M. (2013), Influence of saharan dust transport events on PM<sub>2.5</sub> concentrations and composition over Athens. *Water Air and Soil Pollution*, 224, 1373.
- Rodriguez S., Querol X., Alastuey A., Kallos G., Kakaliagou O. (2001), Saharan dust contributions to PM<sub>10</sub> and TSP levels in Southern and Eastern Spain, *Atmos. Environ.*, 35, 2433-2447.
- Rousseau D.D., Duzer D., Etienne J.L., Cambon G., Jolly D., Ferrier J., Schevin P. (2004), Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *Journal of Geophysical Research*, 109, D06116, doi:10.1029/2003JD003985.
- Salvador P., Artíñano B., Pio C., Afonso J., Legrand M., Puxbaum H., Hammer S. (2010), Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods. *Atmos. Environ.*, 44, 2316-2329.
- Schäfer K., Birmili W., Cyrys J., Emeis S., Forkel R., Gilge S., Münkelf C., Pitz M., Ries L., Suppan P. (2010), Temporal and spatial structure of a volcanic ash cloud - Ground-based remote sensing and numerical modeling. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7827, pp. lxxx-xci.
- Seibert P. and A. Frank (2004), Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model in backward mode, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 51-63.
- Spangl W., Schneider J., Moosmann L., Nagl C. (2007), Representativeness and classification of air quality monitoring stations – Final Report, Umweltbundesamt, Vienna, July 2007.
- Stohl A., Wotawa G., Seibert P., Kromp-Kolb H. (1995), Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories, *J. Appl. Meteor.*, 34, 2149-2165, 1995.
- Stohl A., Forster C., Eckhardt S., Spichtinger N., Huntrieser H., Heland J., Schlager H., Wilhelm S., Cooper O. (2003), A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 4370, doi:10.1029/2002JD002862.
- Stohl A., Forster C., Frank A., Seibert P., and Wotawa G. (2005), Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2461-2474, 2005. <http://www.atmos-chem-phys.net/5/2461/2005/>.
- Valenzuela A., Olmo F.J., Lyamani H., Antón M., Quirantes A., Alados-Arboledas L. (2012), Classification of aerosol radiative properties during african desert dust intrusions over southeastern

Spain by sector origins and cluster analysis. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 117(6).

Vana M., Tamm E. (2002), Propagation of atmospheric aerosol and the area of representativeness of its measurements in the Baltic Sea region. *Atmos. Environ.*, 36, 391-401.

Verma S., Venkataraman C., Boucher O., Ramachandran S. (2007), Source evaluation of aerosols measured during the Indian Ocean Experiment using combined chemical transport and back trajectory modeling, *Journal of Geophysical Research*, 112, D11210, doi:10.1029/2006JD007698.

Viana M., Querol X., Alastuey A., Cuevas E., Rodriguez. S. (2002), Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network, *Atm. Environ.*, 36:5861-5875.

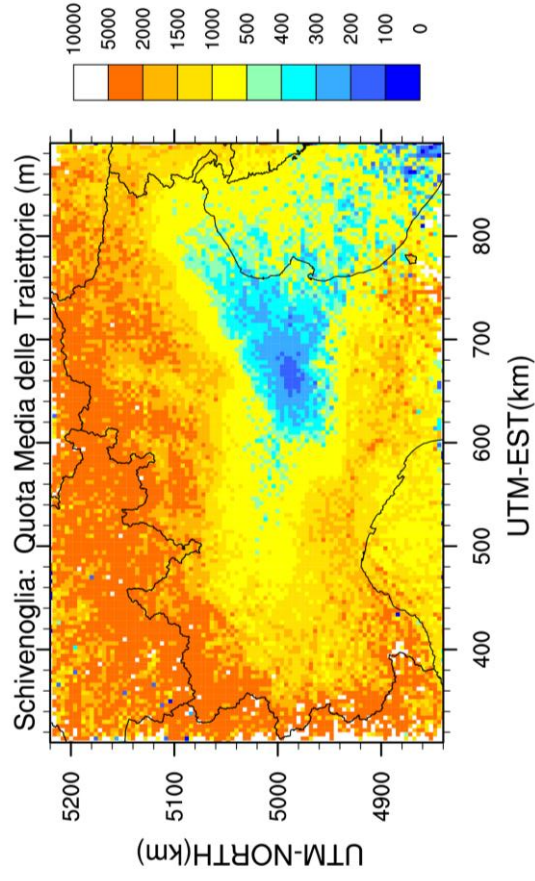
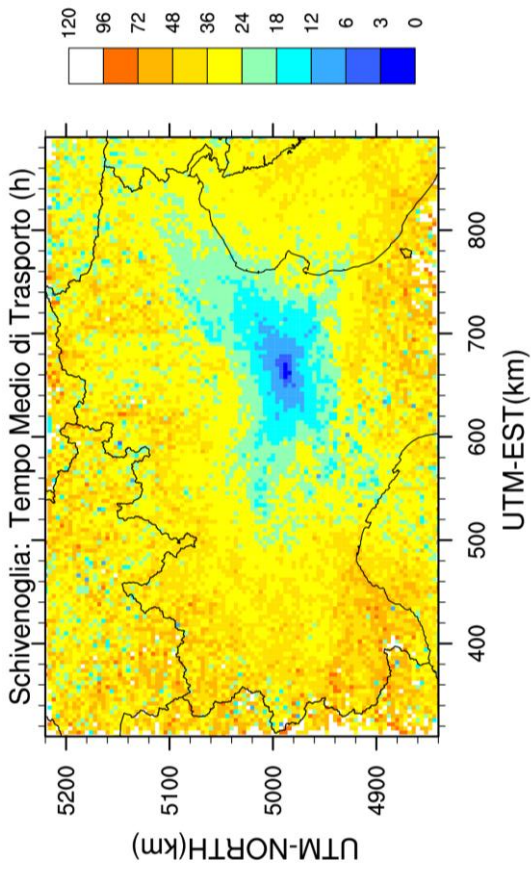
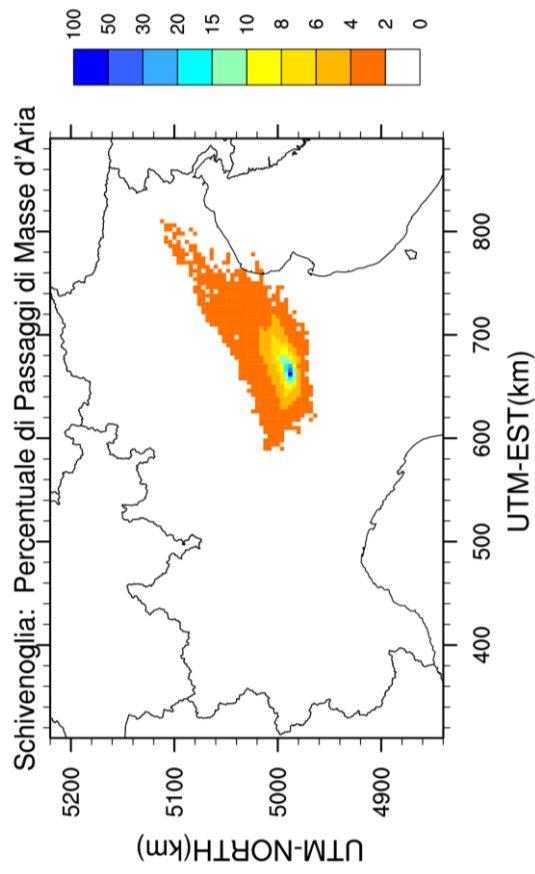
Vitali L., Ciancarella L., Cionni I., Cremona G., Piersanti A., Righini G. (2013), Rappresentatività spaziale di misure di qualità dell'aria. Valutazione di un metodo di stima basato sull'analisi dei campi di concentrazione simulati dal Modello Nazionale MINNI, Rapporto Tecnico RT/2013/3/ENEA, ENEA.

Zender C.S, (2008), Analysis of self-describing gridded geoscience data with netCDF Operators (NCO). *Environmental Modelling & Software*, Vol. 23, Issues 10–11, 1338–1342.

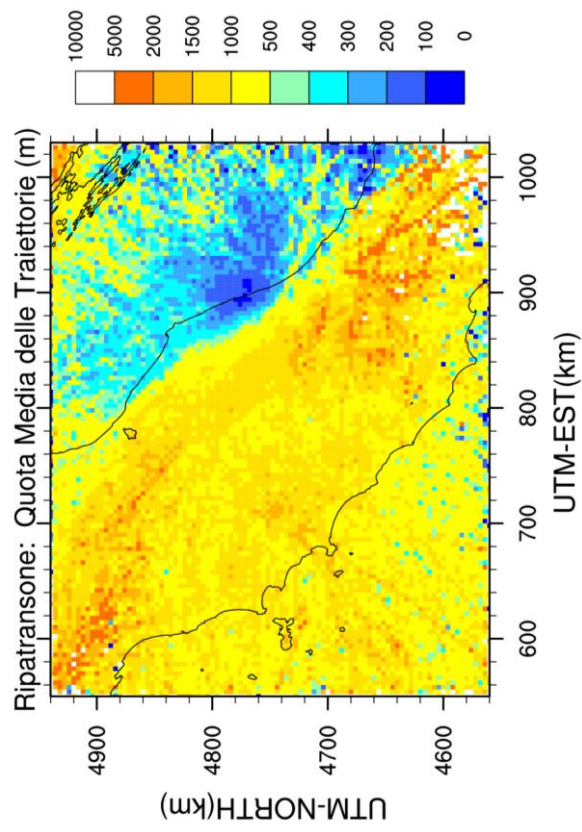
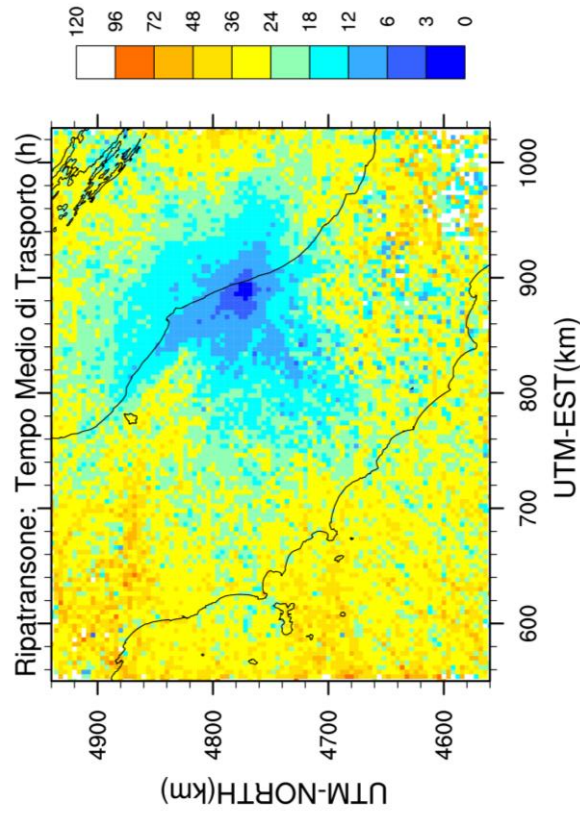
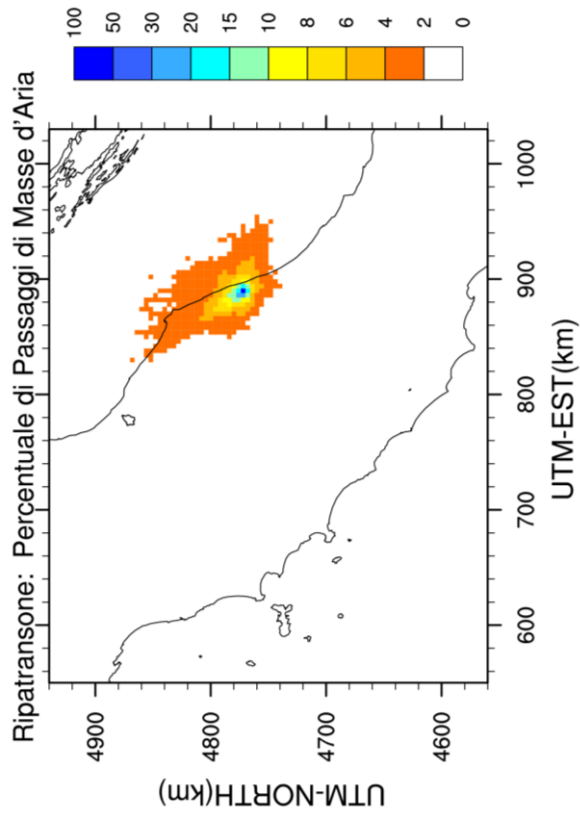
## 7 APPENDICE: MAPPE

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| MAPPA 1 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SCHIVENOGLIA.....                          | 69 |
| MAPPA 2 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A RIPATRANSONE. ....                         | 70 |
| MAPPA 3 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SANTA MARIA CERRATE.....                   | 71 |
| MAPPA 4 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A PORDENONE CENTRO. ....                     | 72 |
| MAPPA 5 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MILANO PASCAL CITTÀ STUDI.....             | 73 |
| MAPPA 6 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MILANO SENATO.....                         | 74 |
| MAPPA 7 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A PADOVA MANDRIA.....                        | 75 |
| MAPPA 8 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SONDRIO CENTRO VIA PARIBELLI.....          | 76 |
| MAPPA 9 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A FIRENZE BASSI.....                         | 77 |
| MAPPA 10 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A ROMA VILLA ADA.....                       | 78 |
| MAPPA 11 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A ROMA STAZIONE ISS VIALE REGINA ELENA..... | 79 |
| MAPPA 12 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A TARANTO VIA MACHIAVELLI.....              | 80 |
| MAPPA 13 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MONTE SANT'ANGELO.....                    | 81 |
| MAPPA 14 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A UDINE VIA CAIROLI.....                    | 82 |
| MAPPA 15 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A COSENZA CITTÀ DEI RAGAZZI.....            | 83 |
| MAPPA 16 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A PIANA ROTALIANA.....                      | 84 |
| MAPPA 17 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A DERNICE COSTA.....                        | 85 |
| MAPPA 18 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SAN PIETRO CAPOFiume.....                 | 86 |

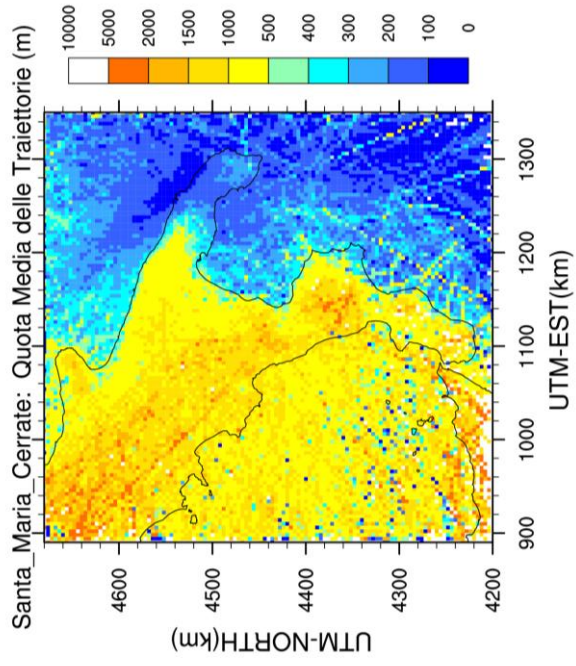
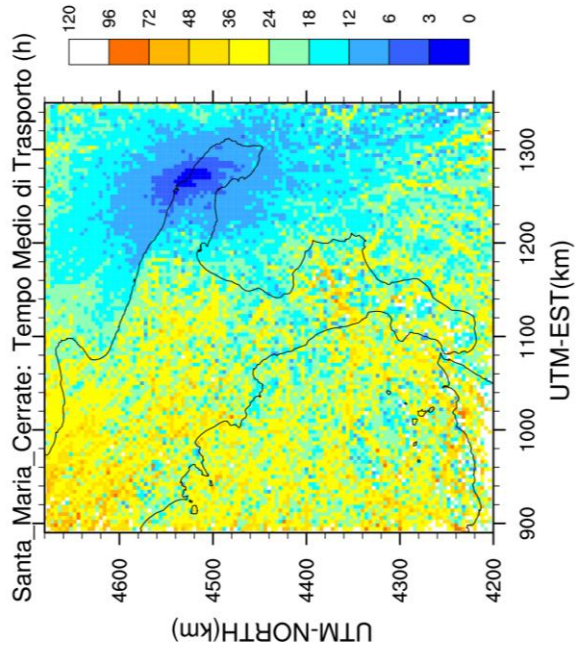
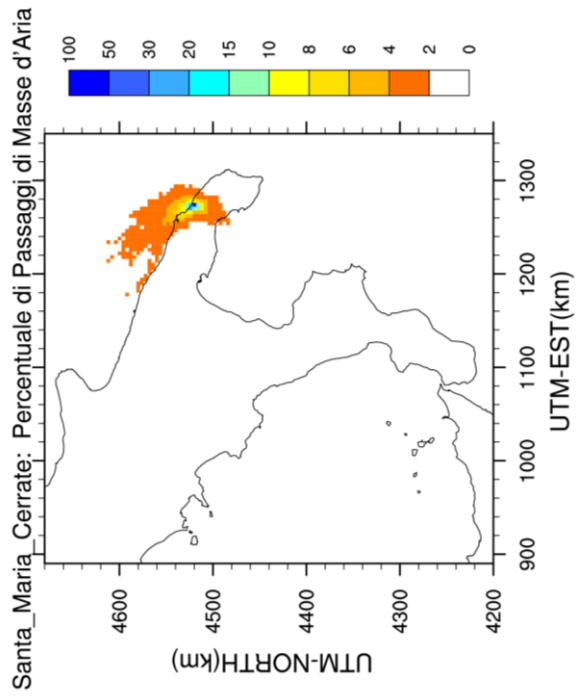
|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| MAPPA 19 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A CASTEL DI GUIDO. ....               | 87 |
| MAPPA 20 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO AD AREZZO CASA STABBL. ....           | 88 |
| MAPPA 21 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A GUARDIAREGIA. ....                  | 89 |
| MAPPA 22 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A CENSE0. ....                        | 90 |
| MAPPA 23 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MACERATA COLLEVARIO VIA VERGA. .... | 91 |
| MAPPA 24 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A CENMO1. ....                        | 92 |
| MAPPA 25 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA<br>MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MONTELIBRETTI. ....                 | 93 |



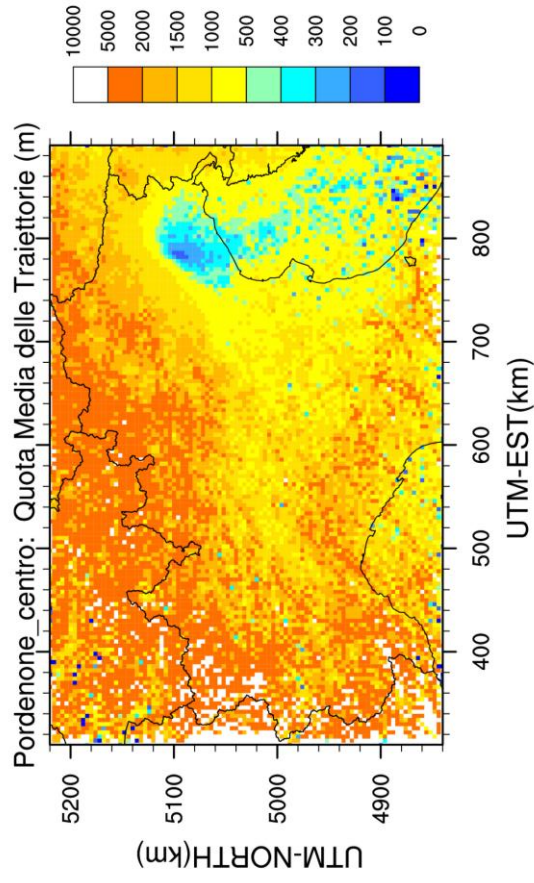
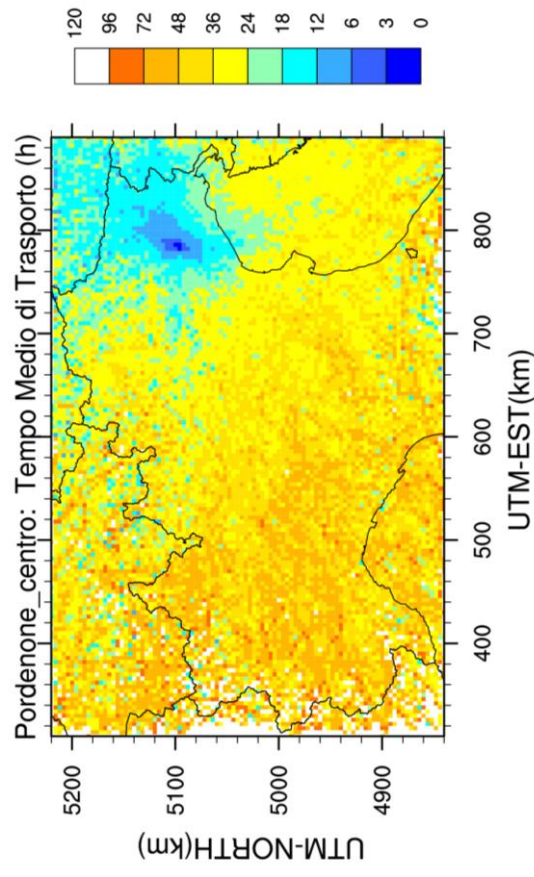
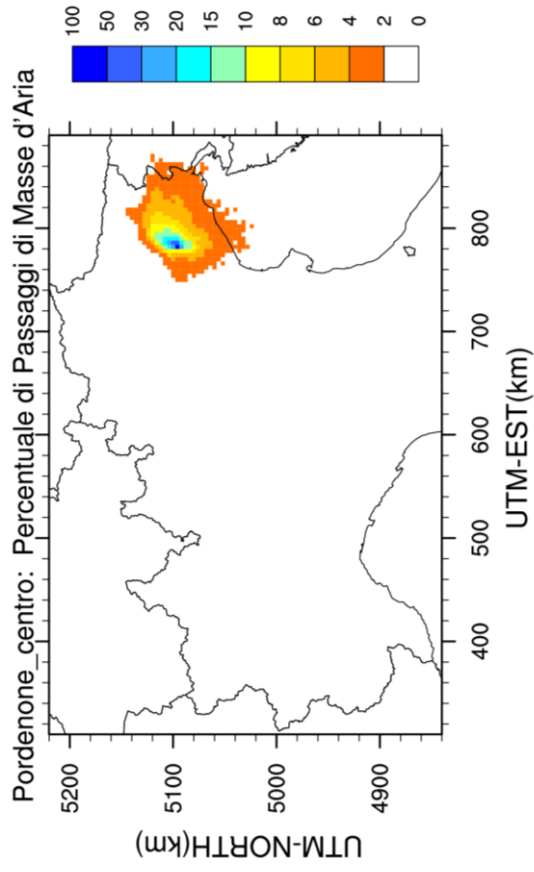
**MAPPA 1 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SCHIVENOGLIA.**



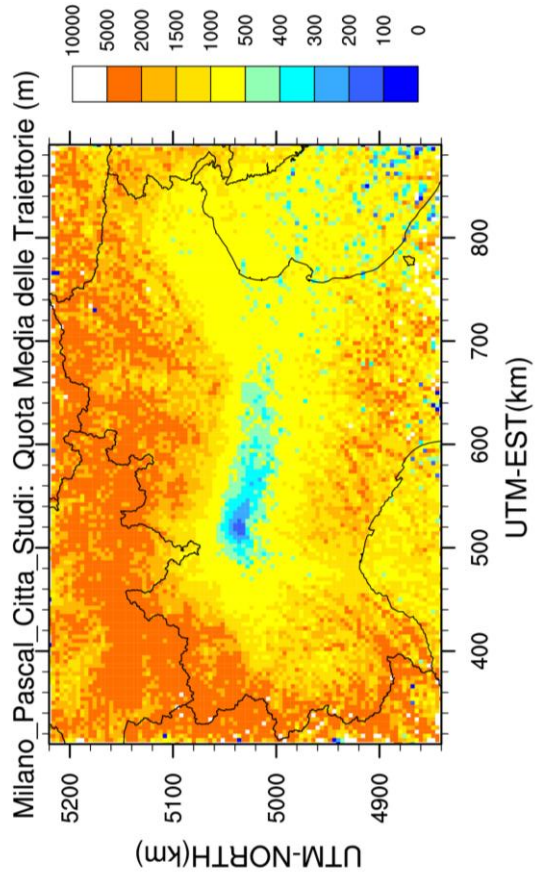
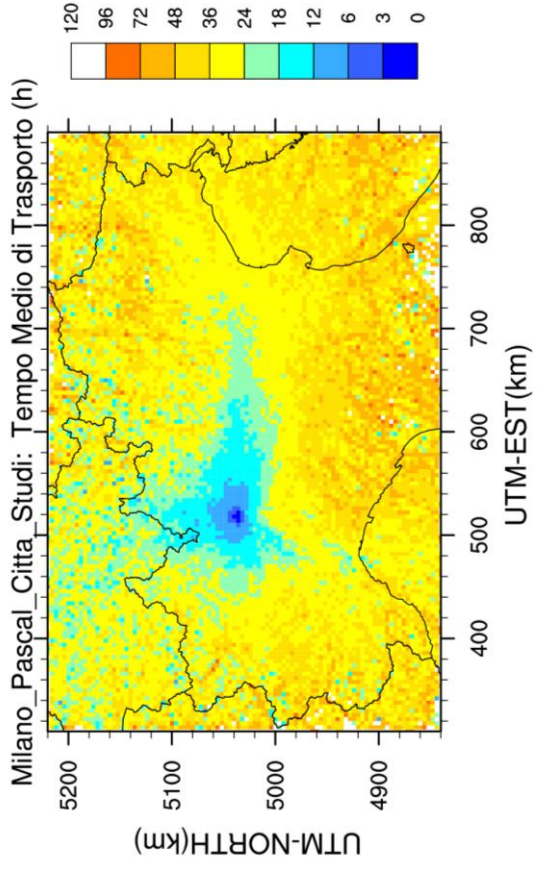
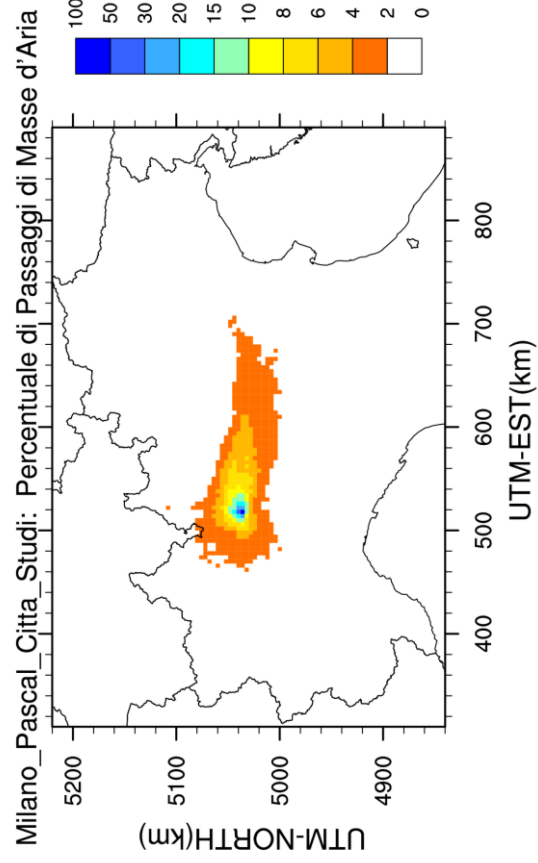
**MAPPA 2 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A RIPATRANSONE.**



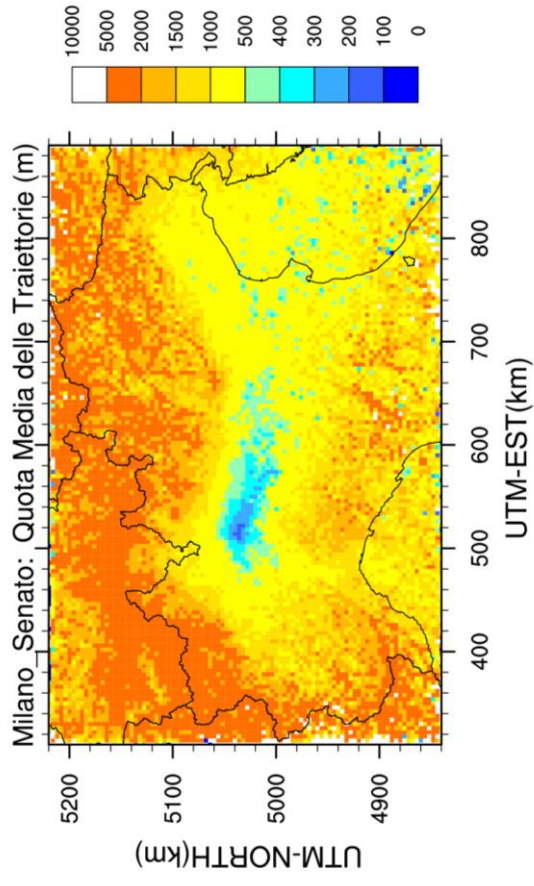
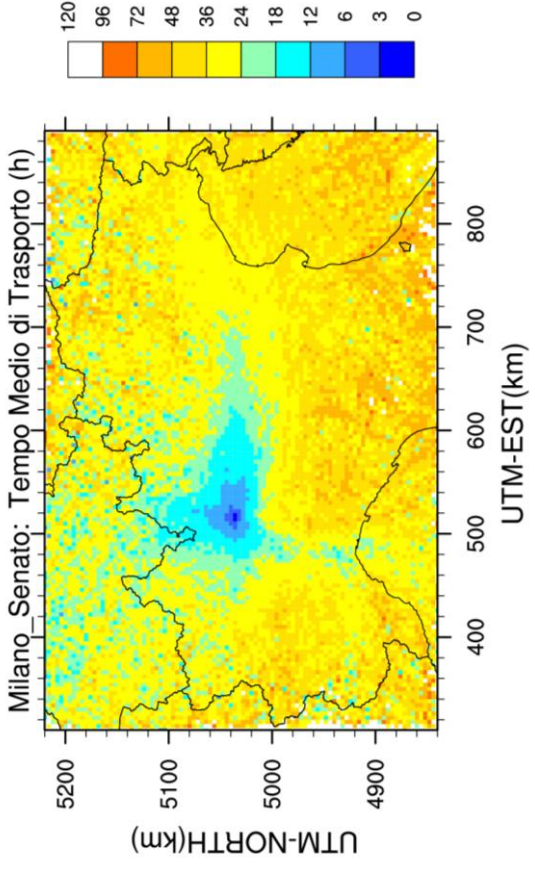
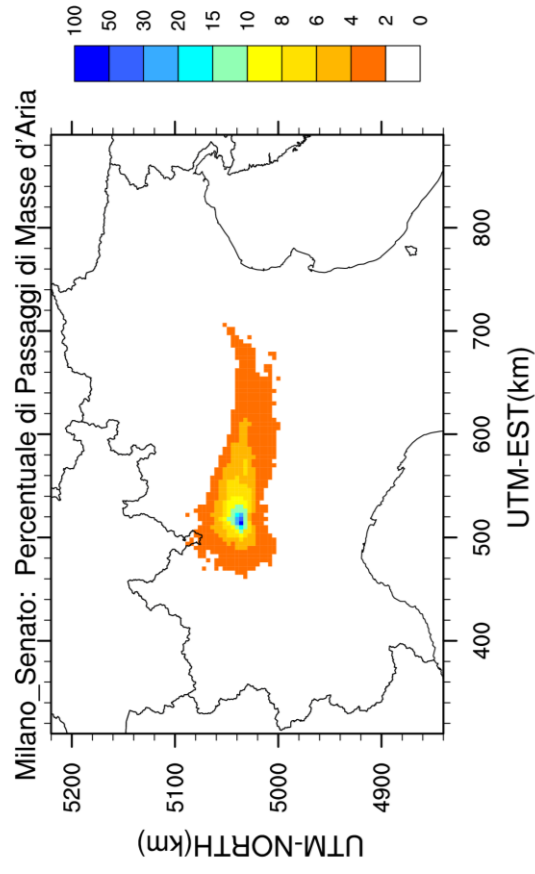
MAPPA 3 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SANTA MARIA CERRATE.



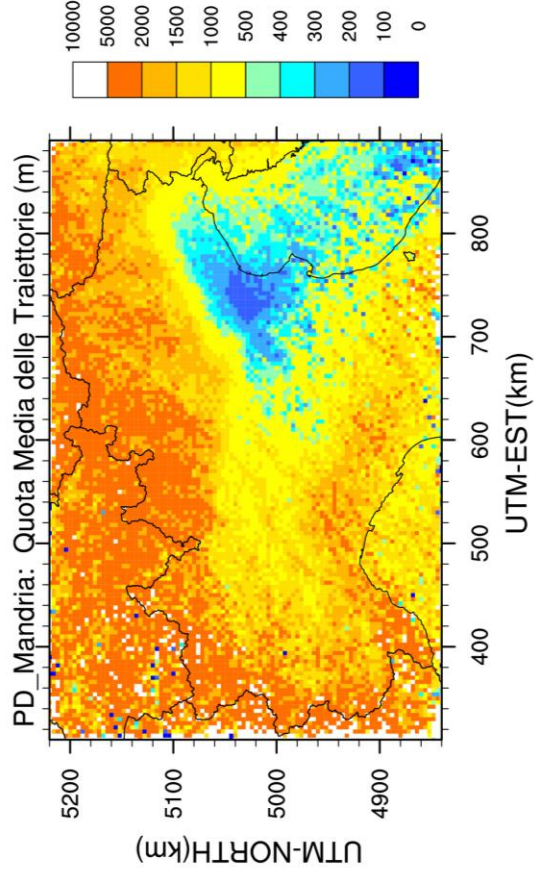
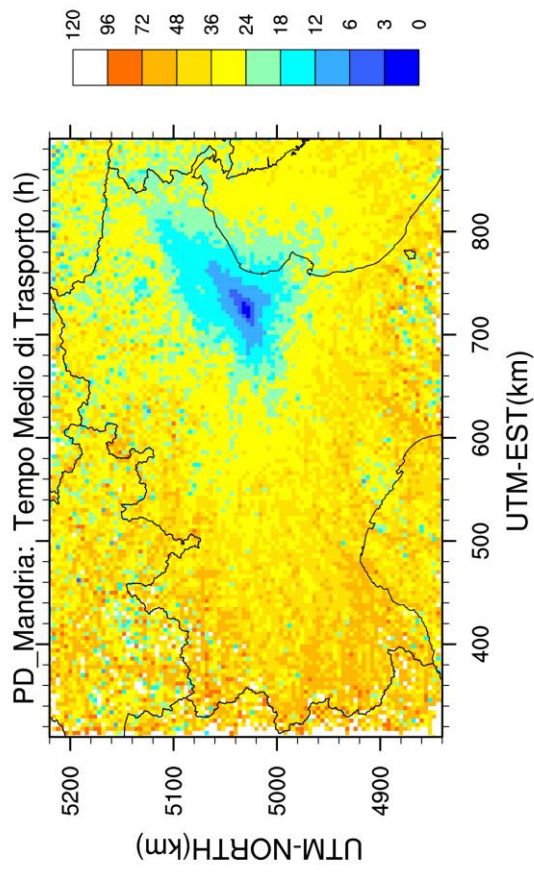
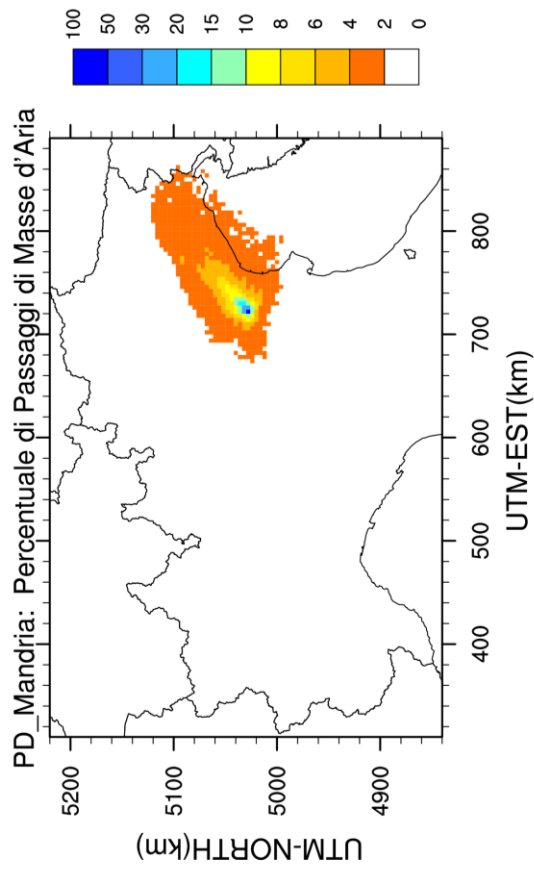
MAPPA 4 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A PORDENONE CENTRO.



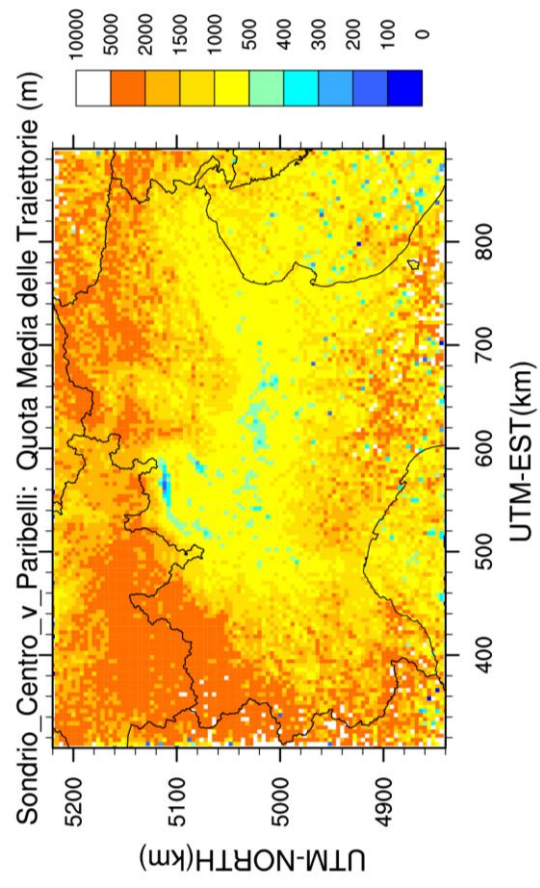
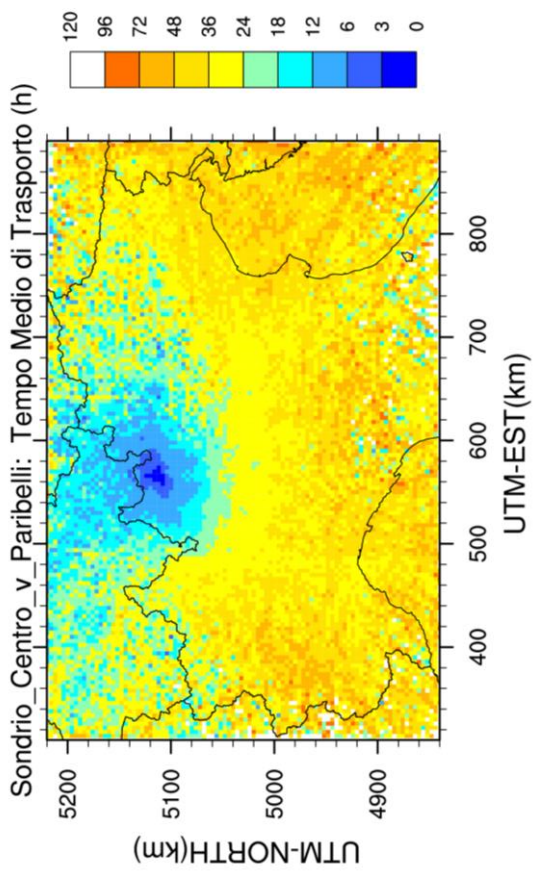
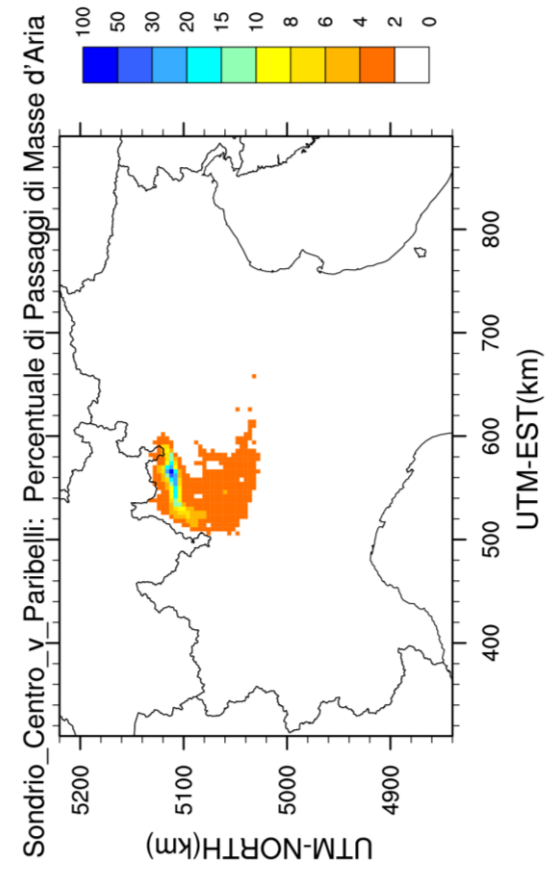
MAPPA 5 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MILANO PASCAL CITTÀ STUDI.



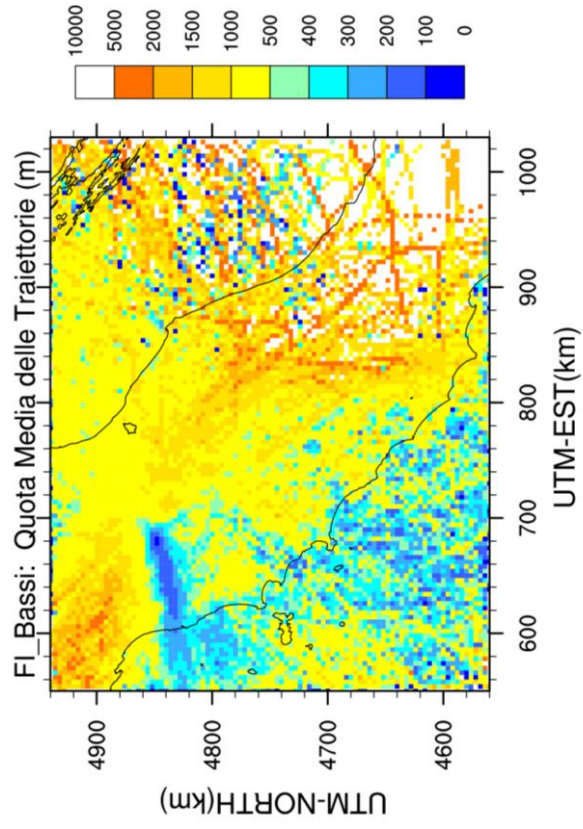
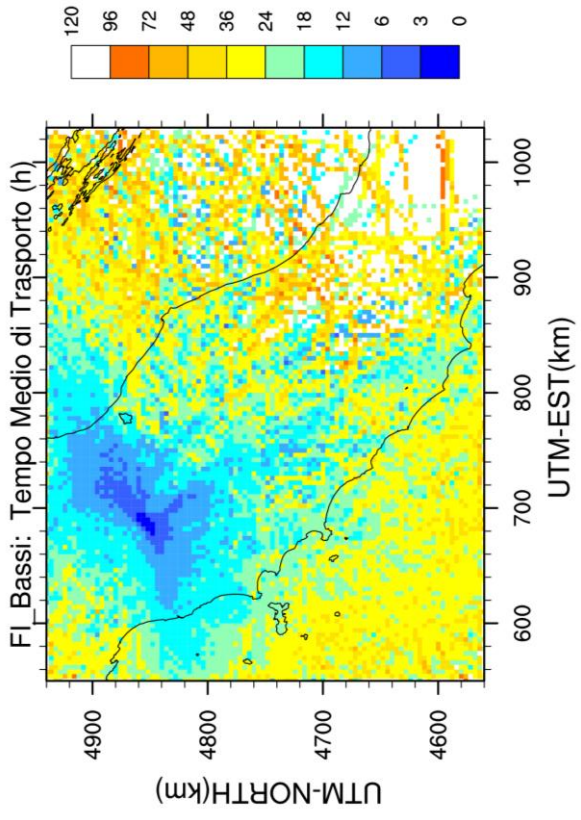
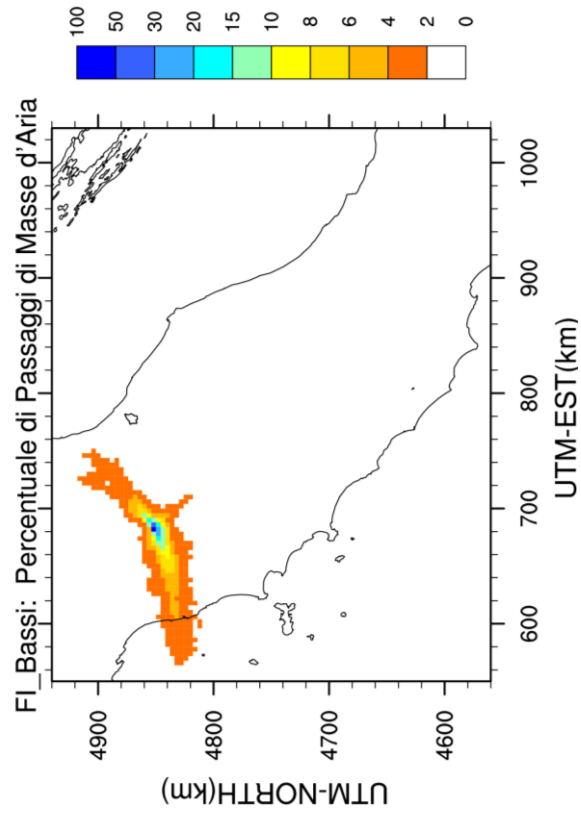
**MAPPA 6 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MILANO SENATO.**



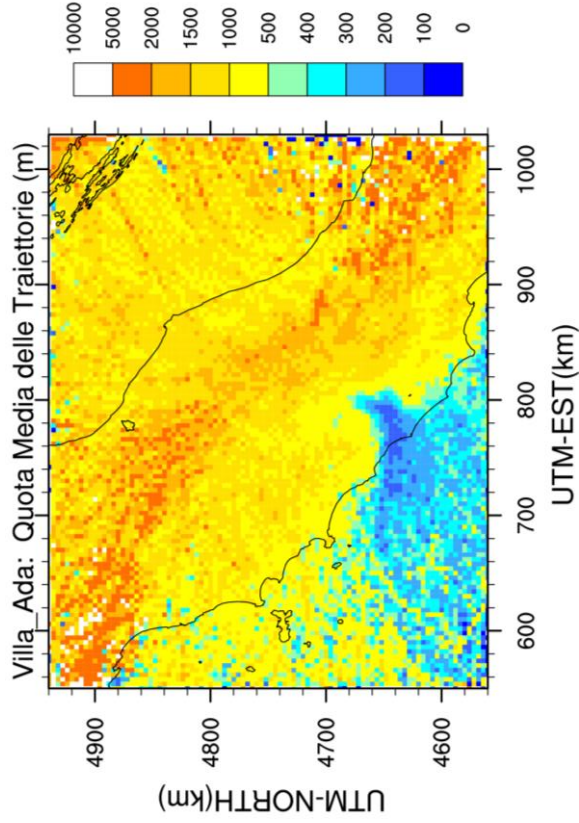
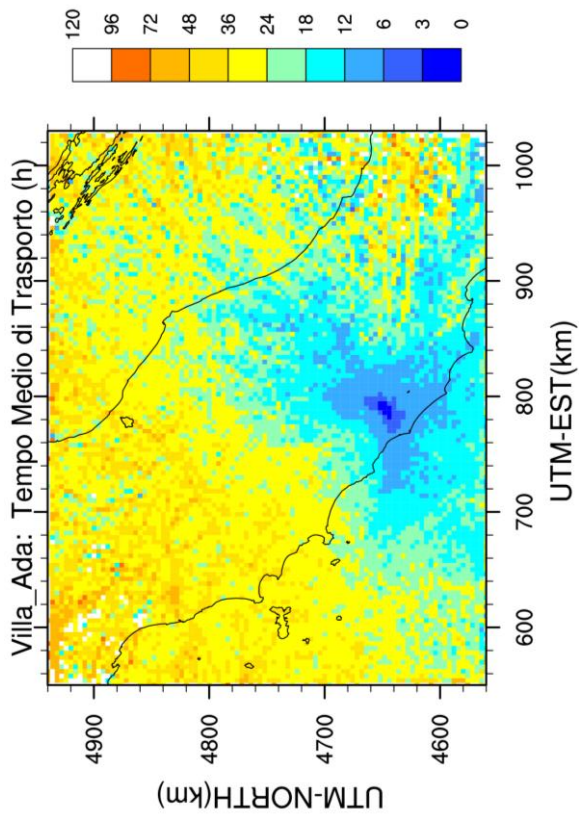
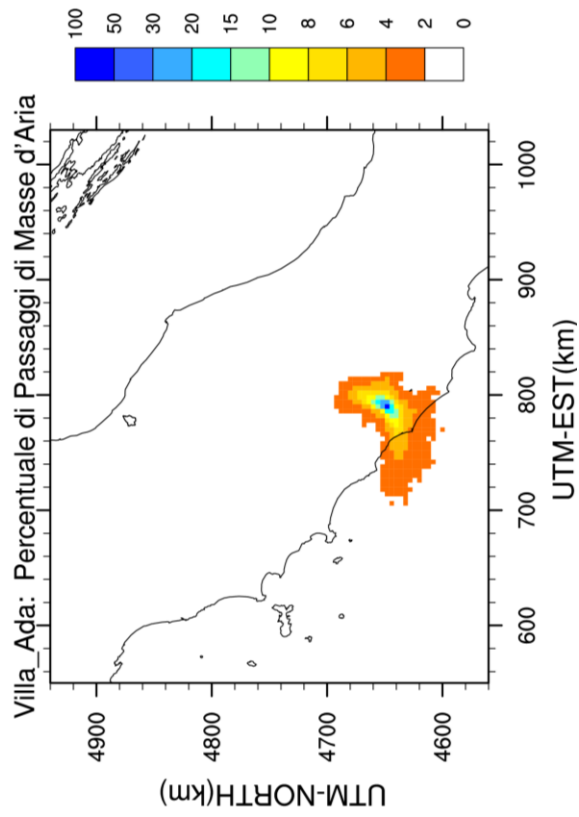
MAPPA 7 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A PADOVA MANDRIA.



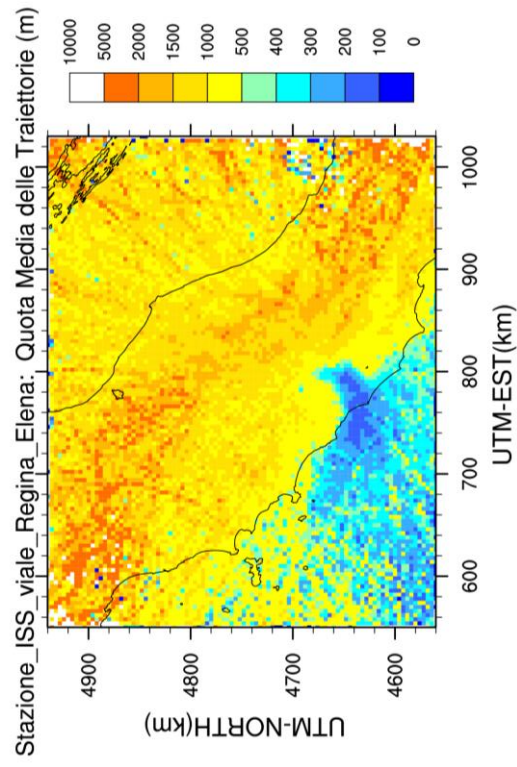
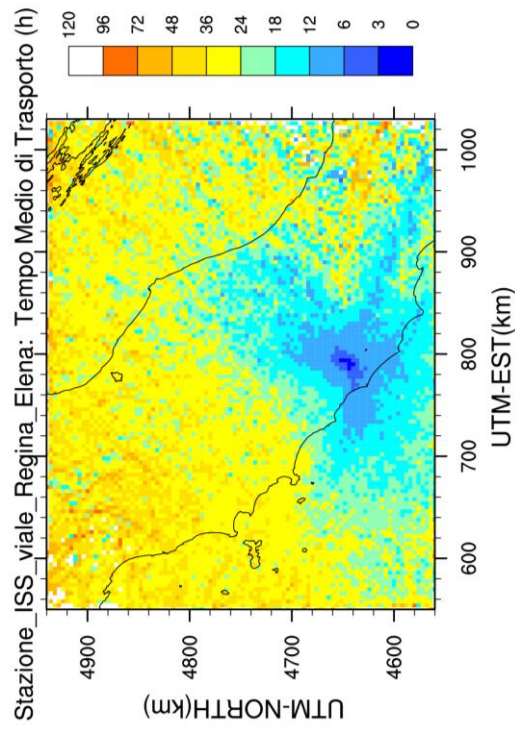
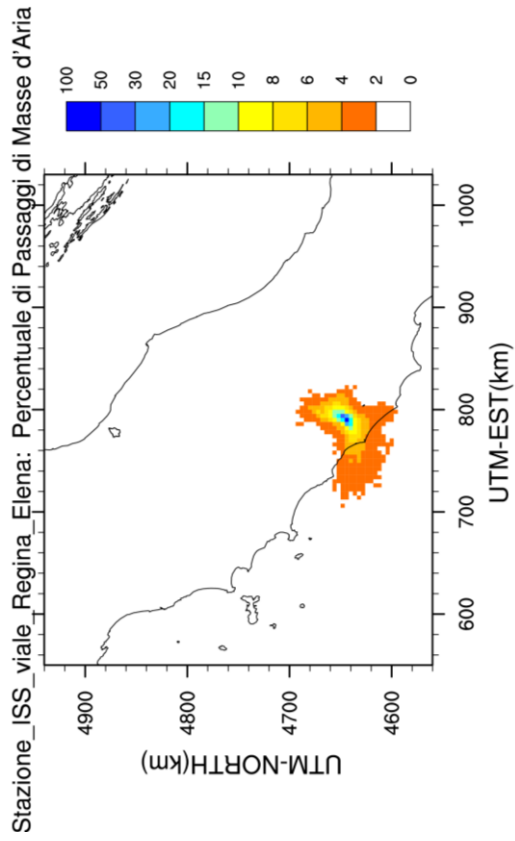
**MAPPA 8 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SONDRIO CENTRO VIA PARIBELLI.**



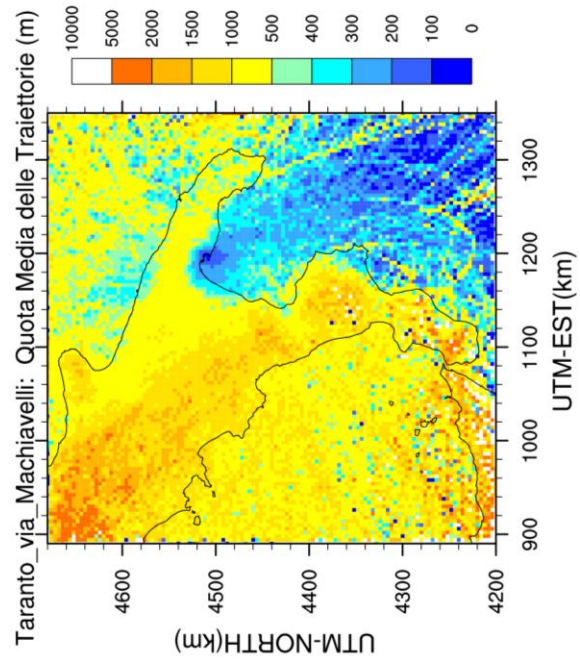
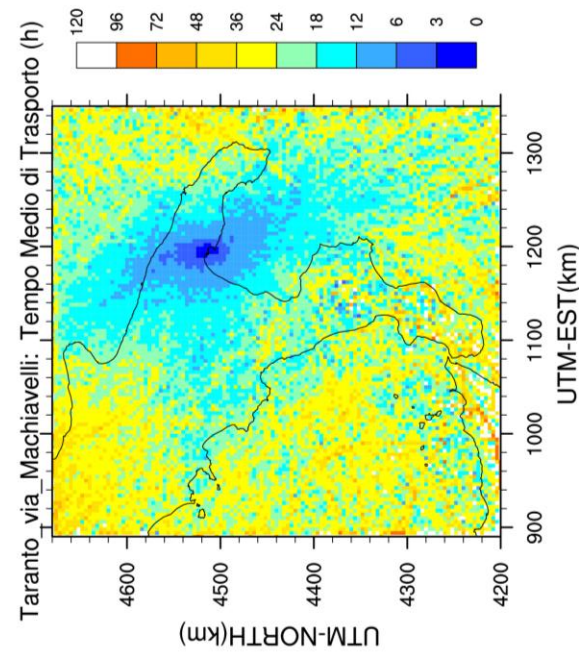
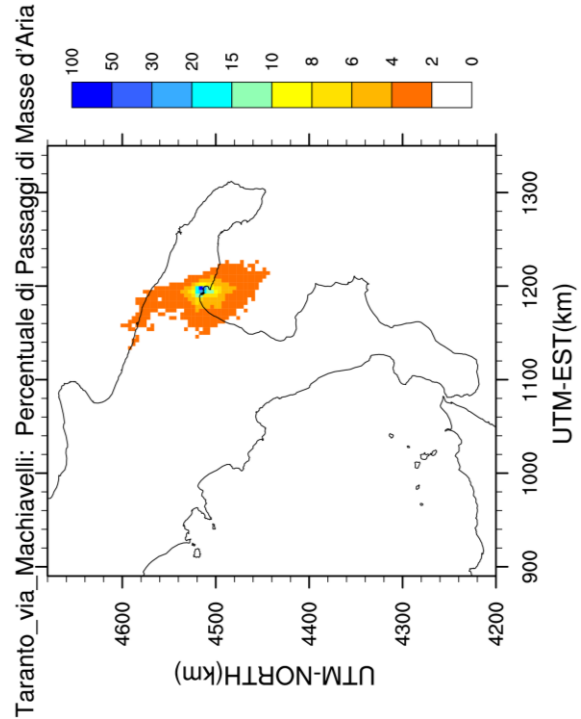
**MAPPA 9 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A FIRENZE BASSI.**



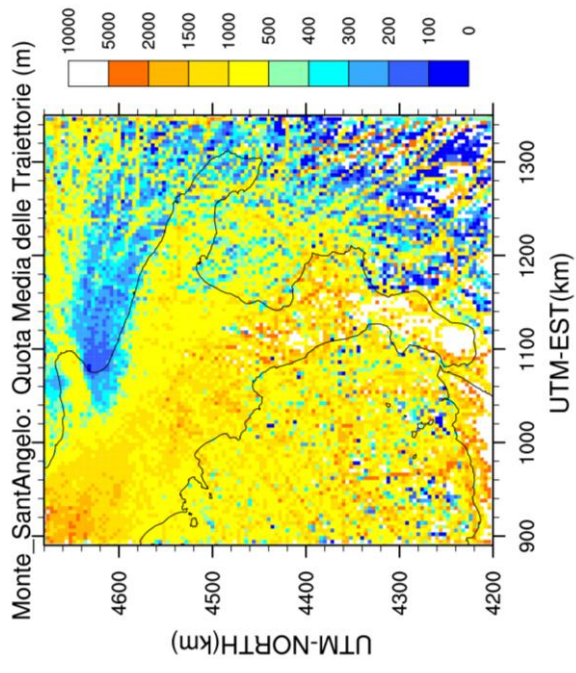
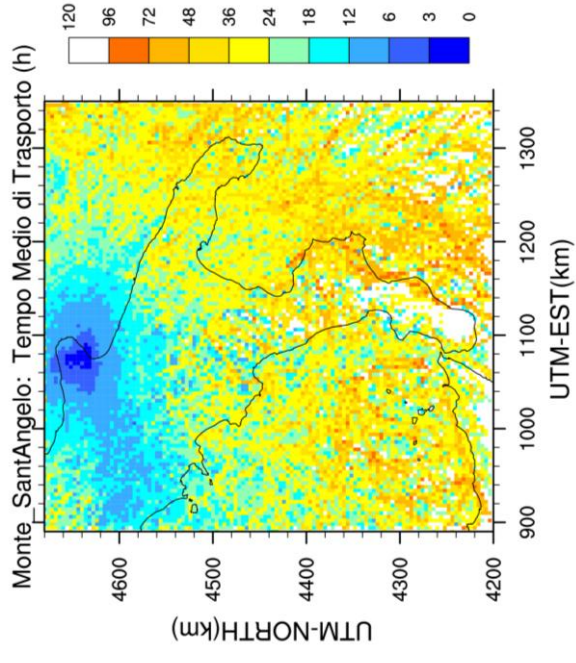
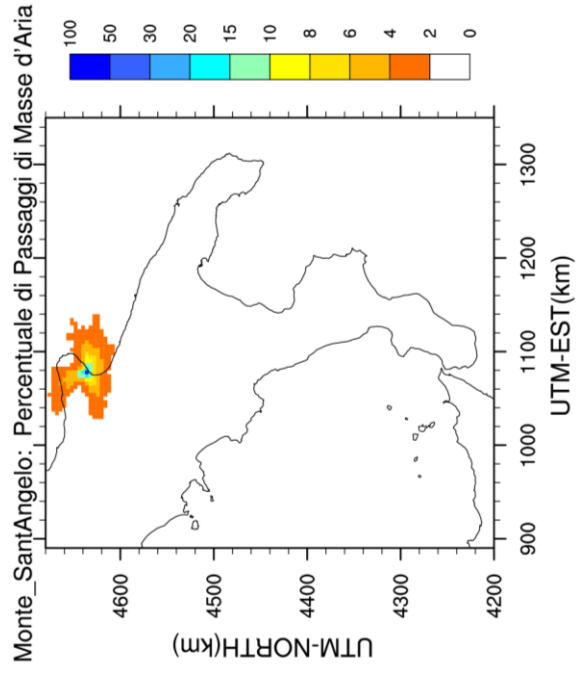
MAPPA 10 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA),  
TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA  
DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A ROMA  
VILLA ADA.



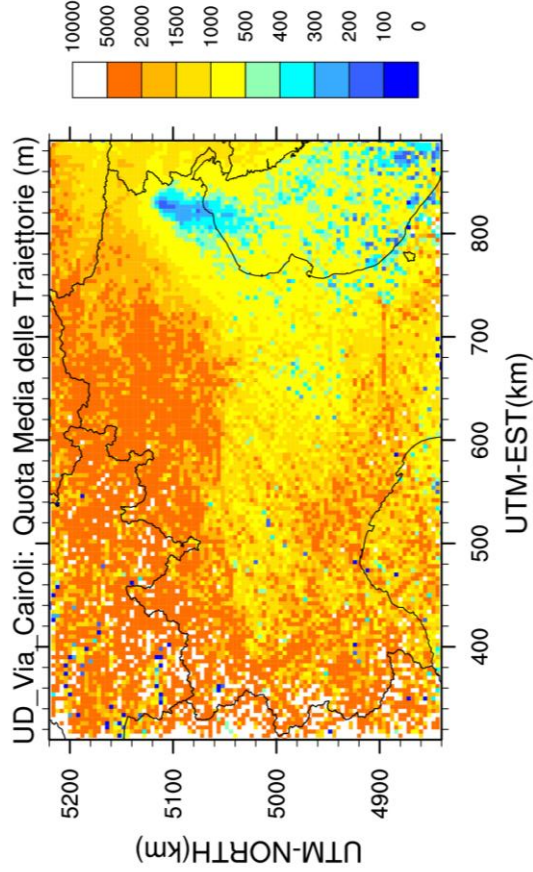
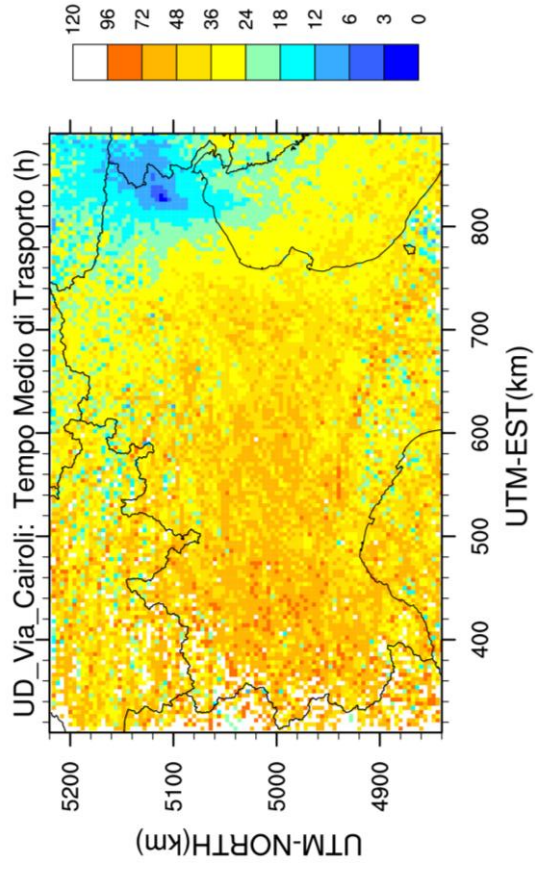
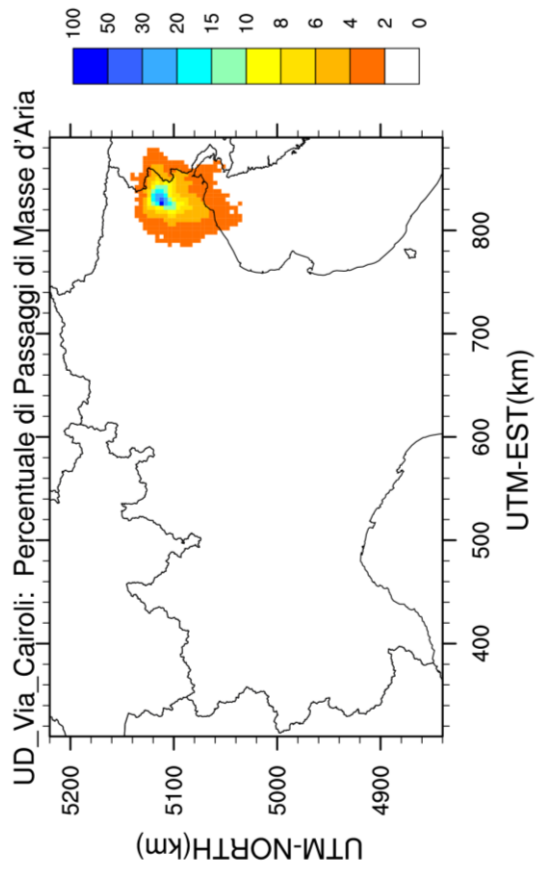
**MAPPA 11 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A ROMA STAZIONE ISS VIALE REGINA ELENA.**



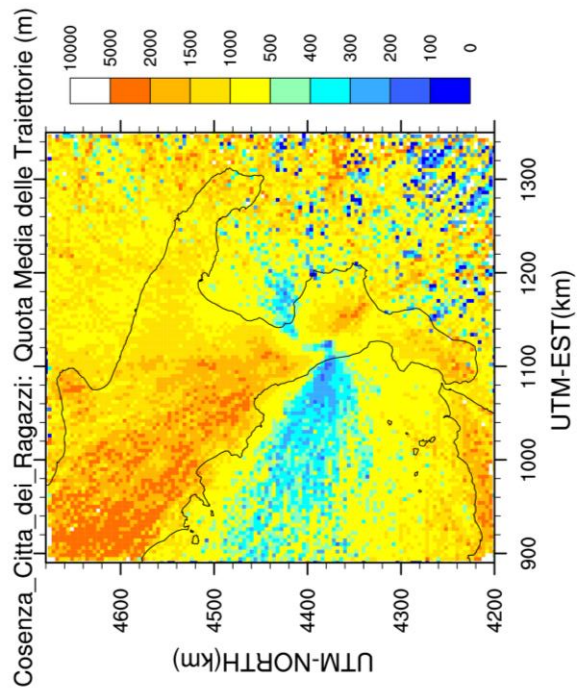
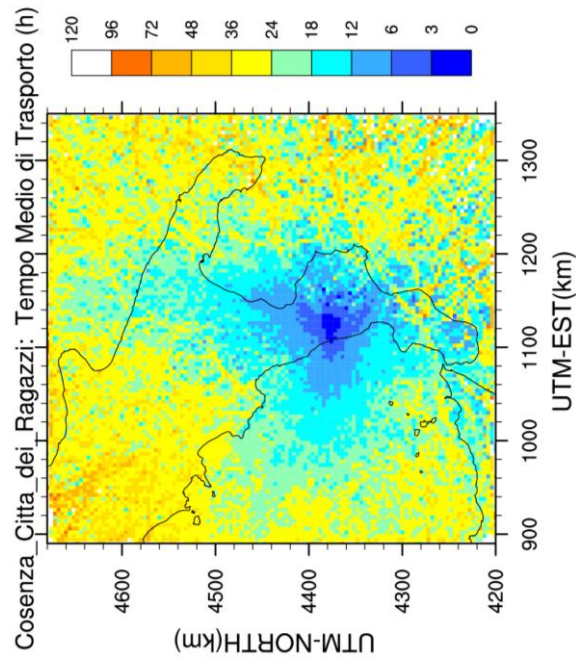
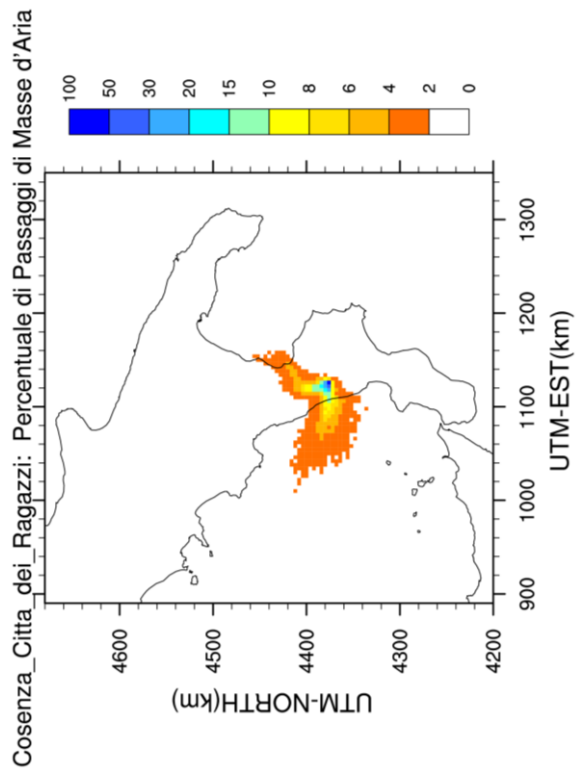
**MAPPA 12 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A TARANTO VIA MACHIAVELLI.**



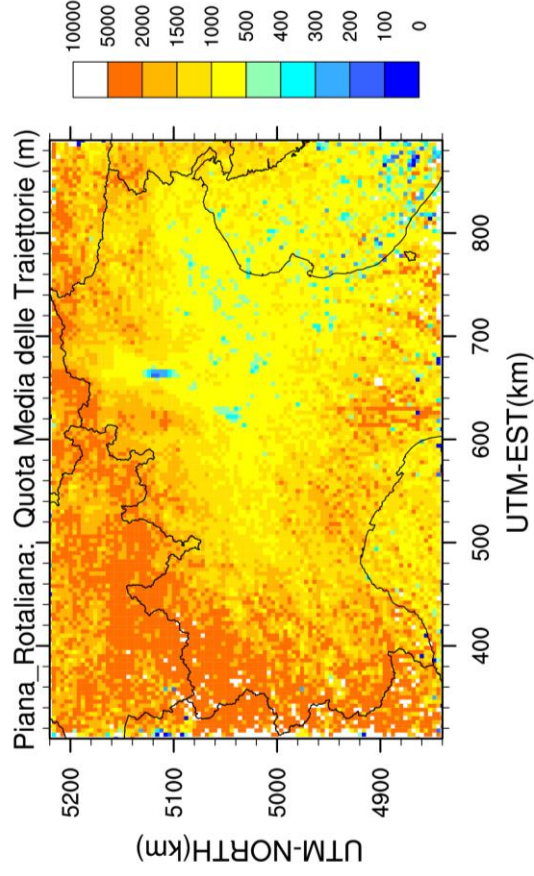
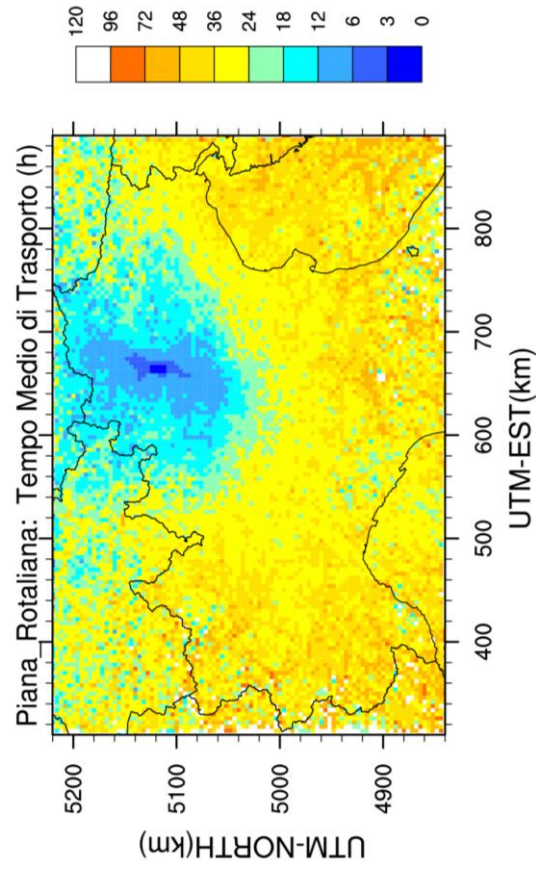
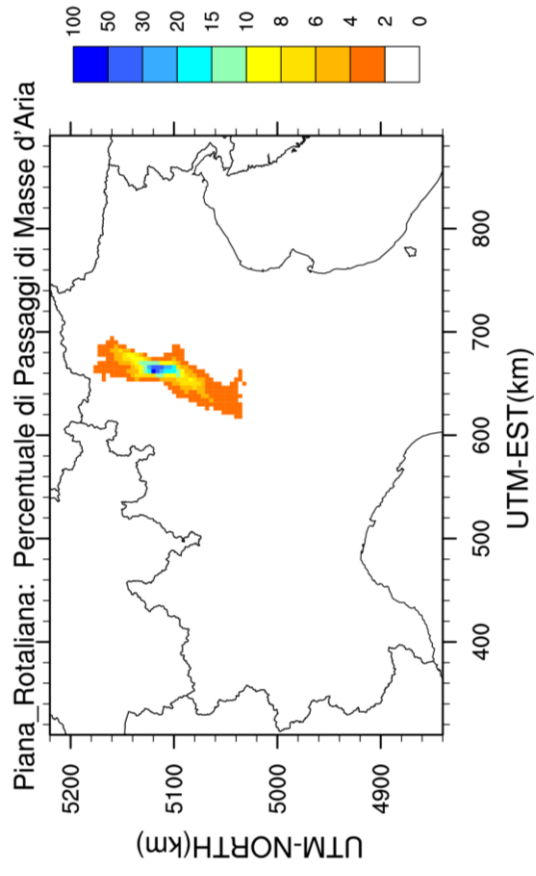
**MAPPA 13 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MONTE SANT'ANGELO.**



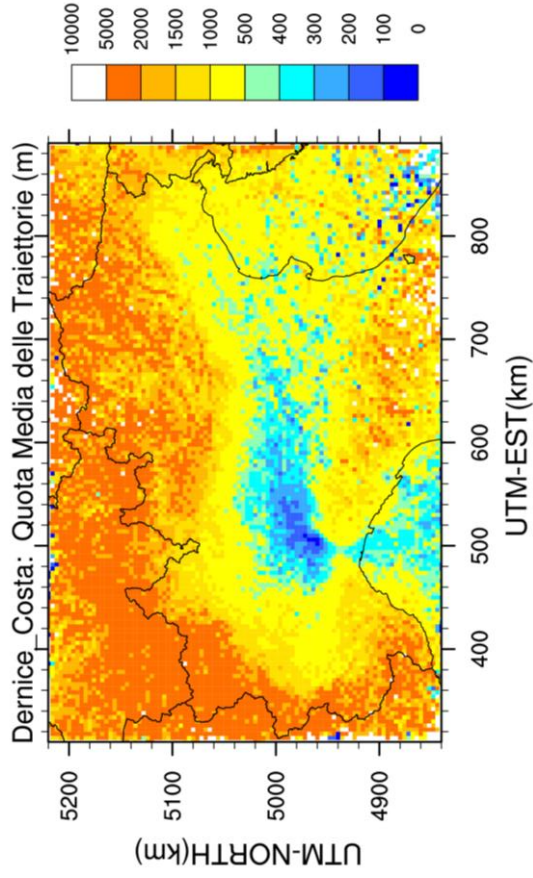
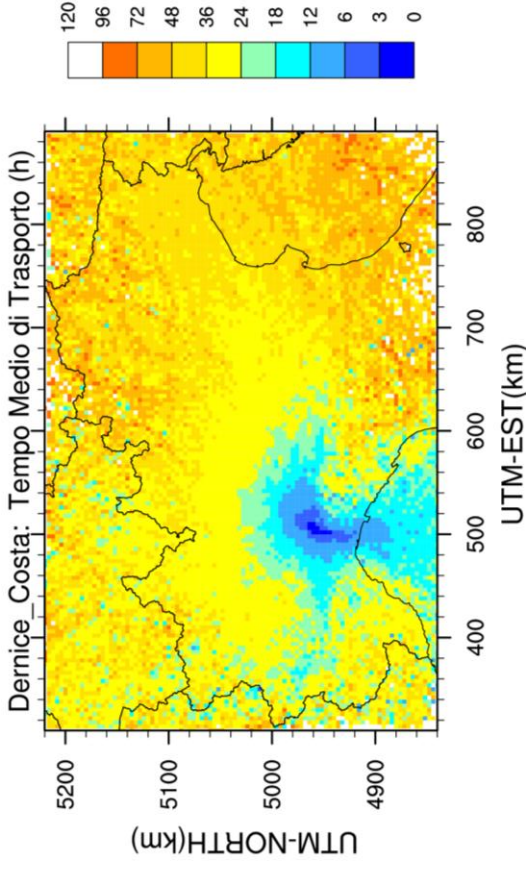
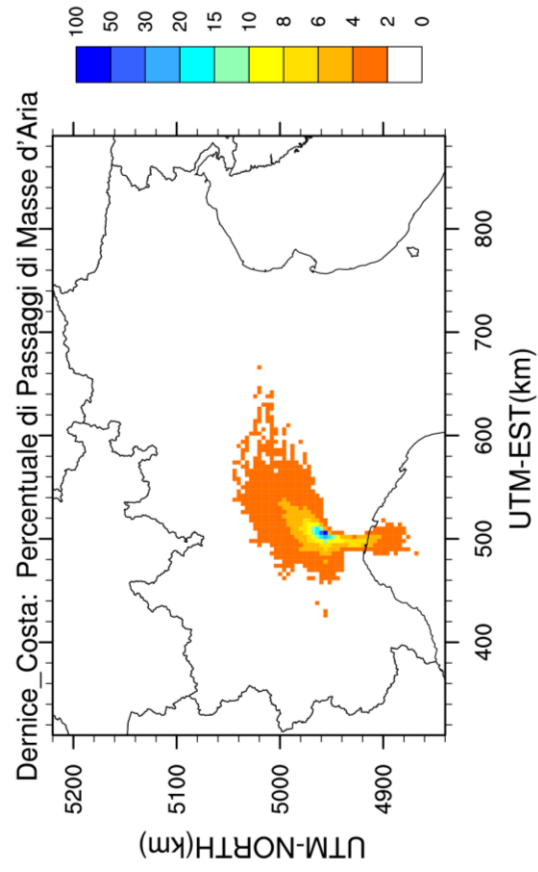
**MAPPA 14 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A UDINE VIA CAIROLI.**



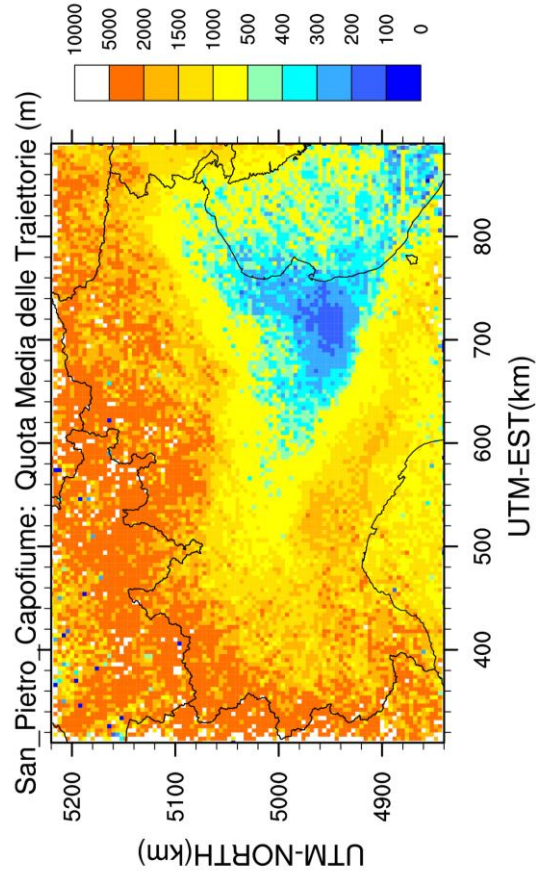
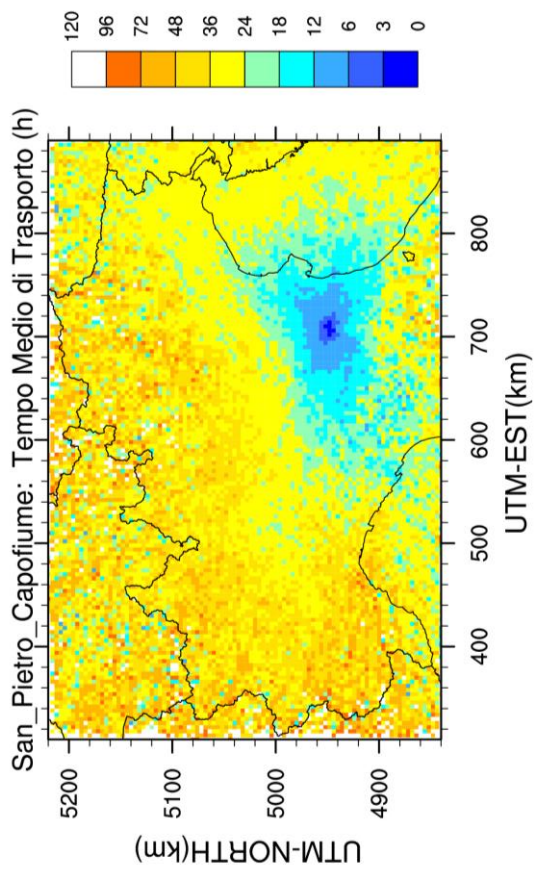
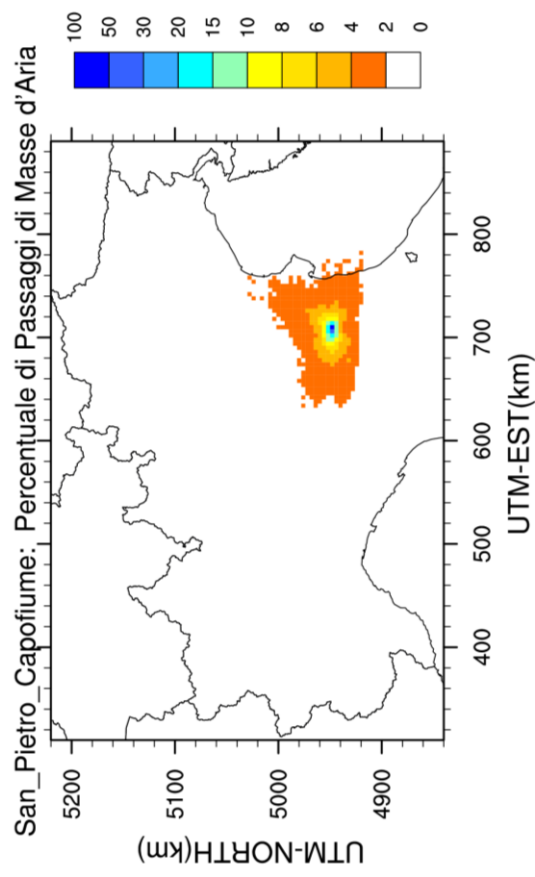
MAPPA 15 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A COSENZA CITTÀ DEI RAGAZZI.



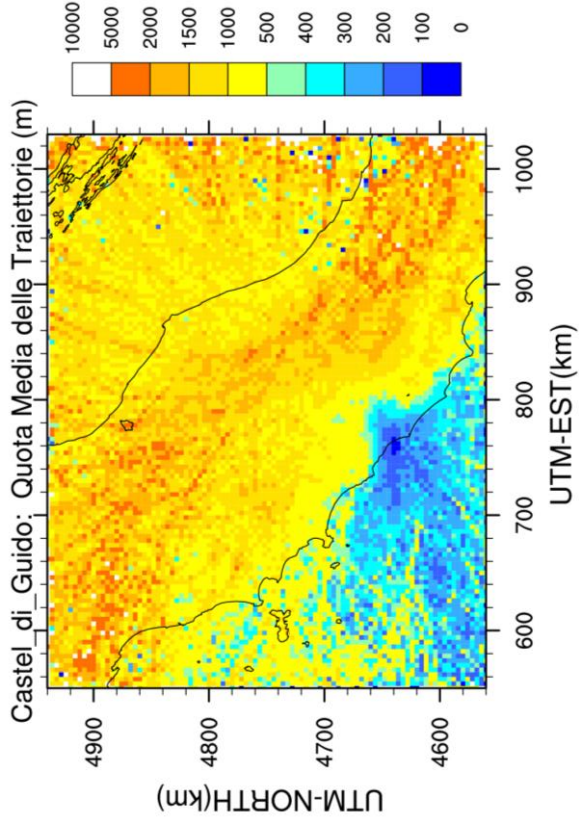
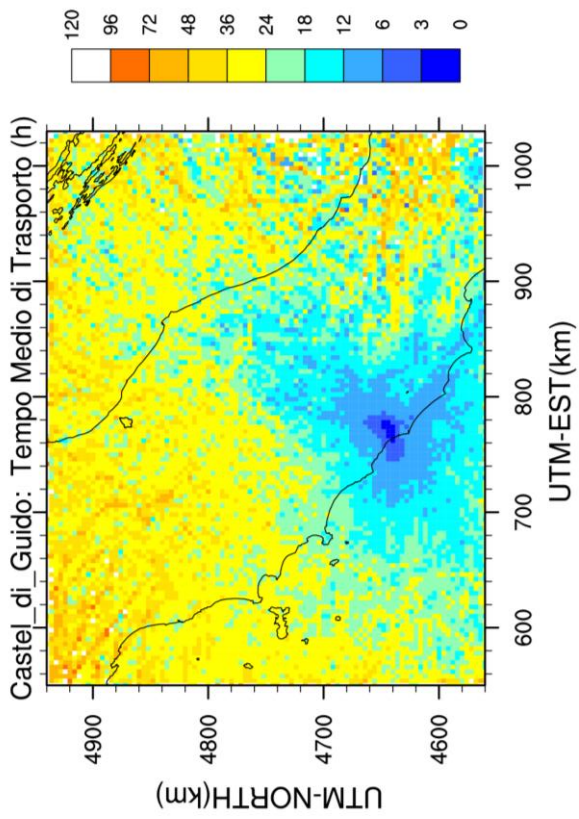
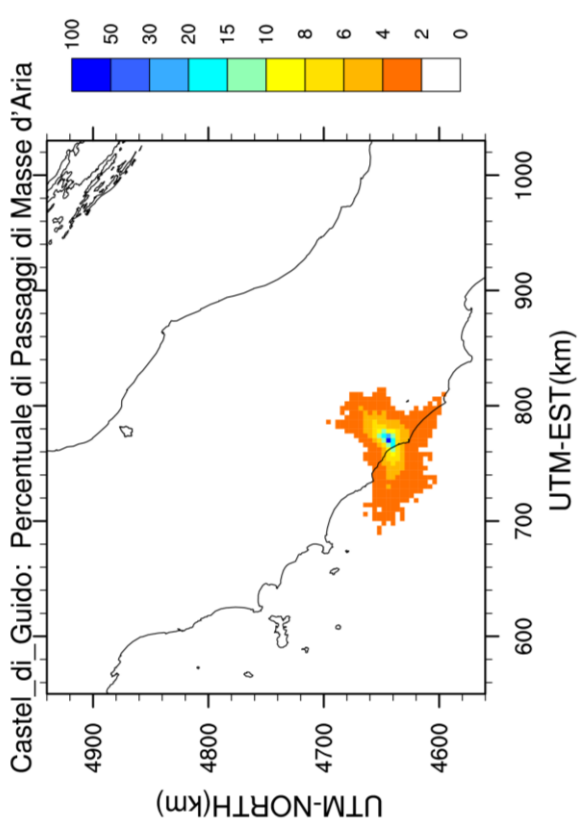
MAPPA 16 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A PIANA ROTALIANA.



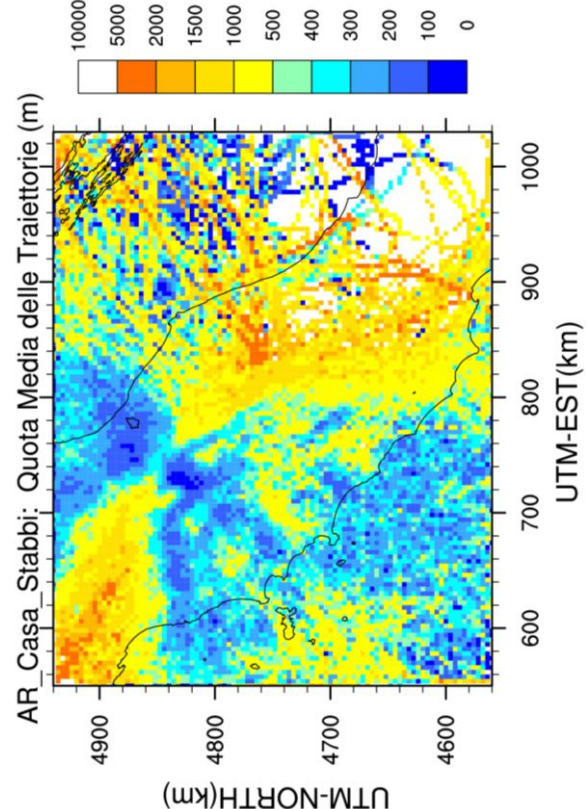
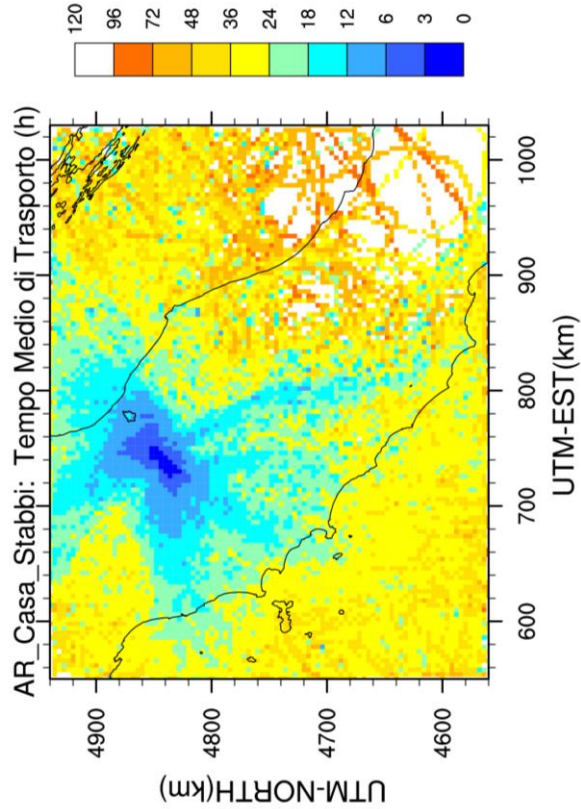
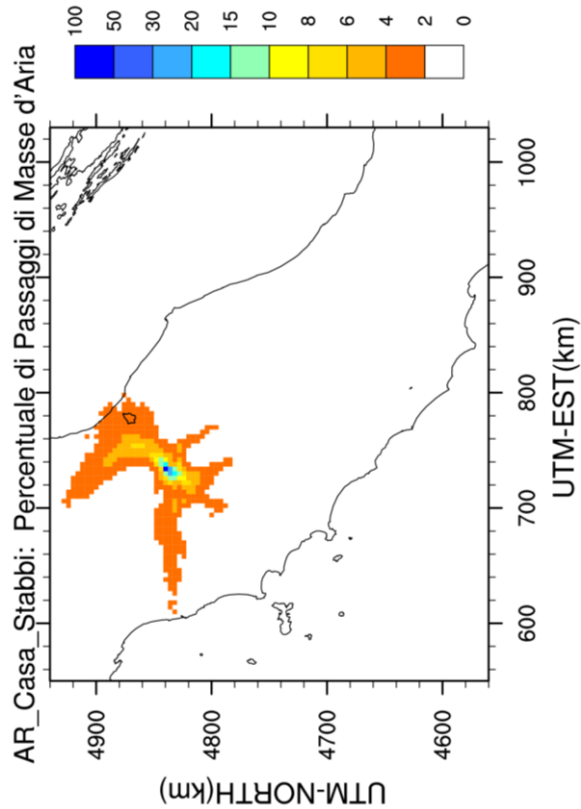
MAPPA 17 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A DERNICE COSTA.



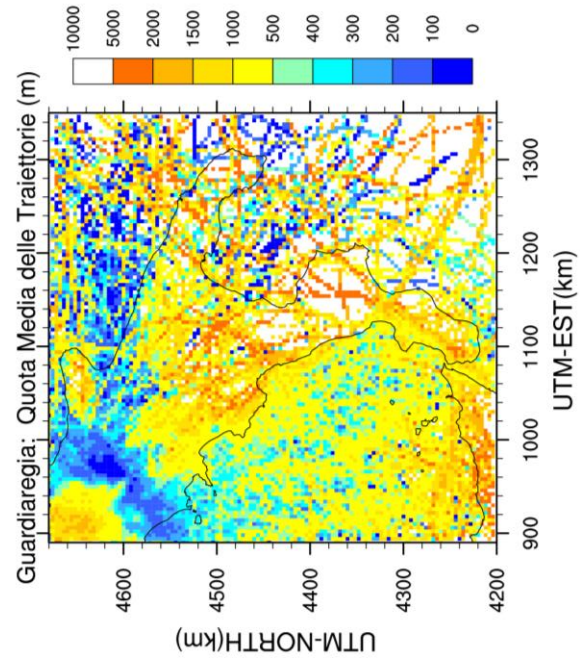
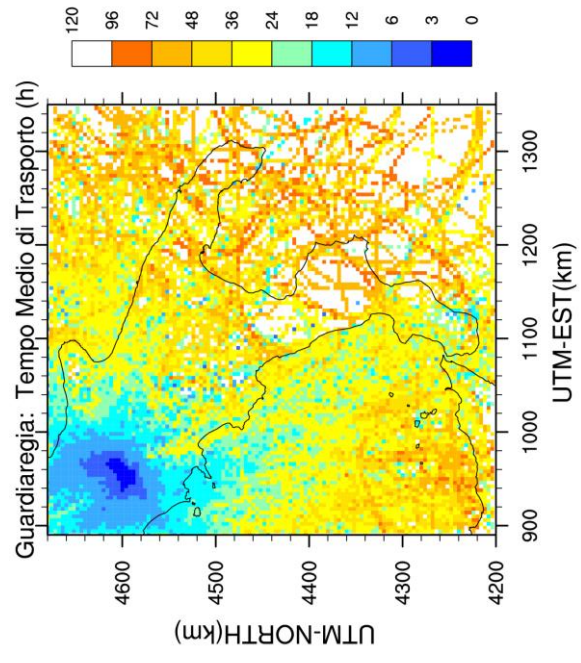
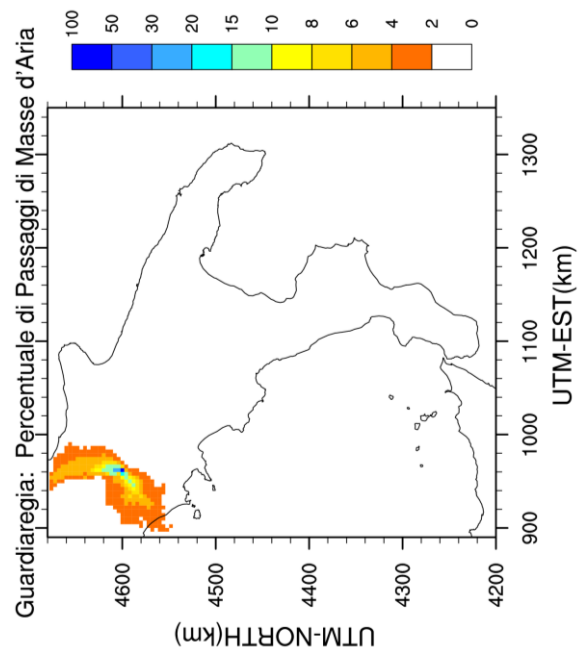
MAPPA 18 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A SAN PIETRO CAPOFIUME.



MAPPA 19 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A CASTEL DI GUIDO.

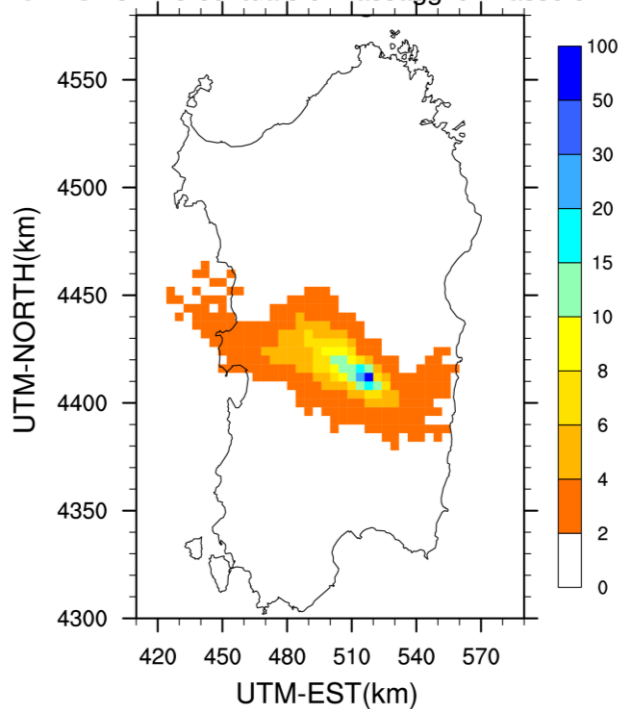


MAPPA 20 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO AD AREZZO CASA STABBI.

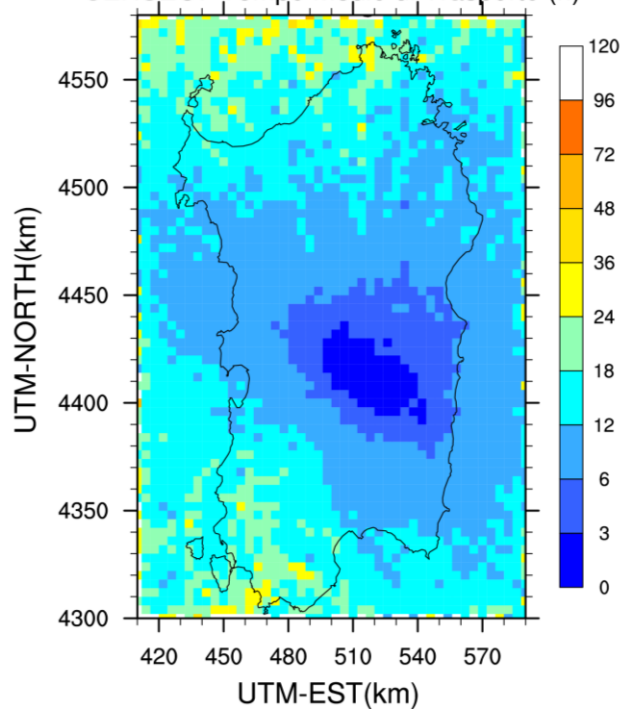


**MAPPA 21 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A GUARDIAREGIA.**

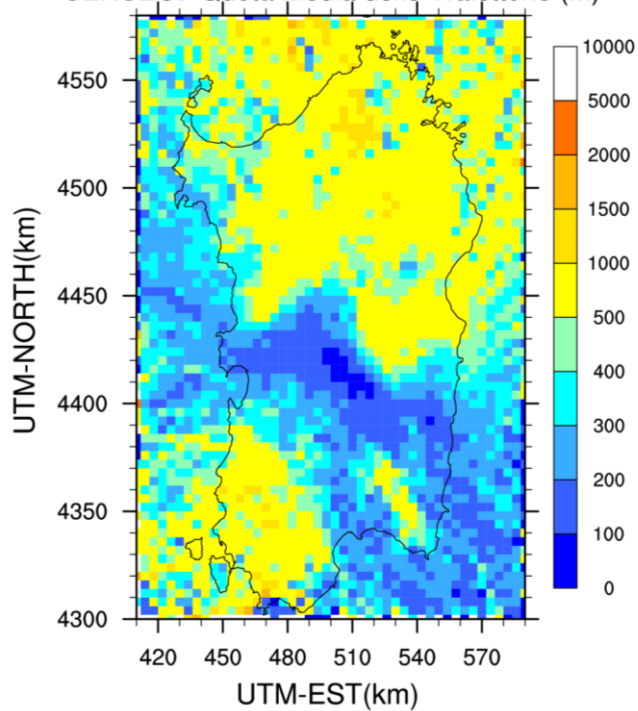
CENSEO: Percentuale di Passaggi di Masse d'Aria



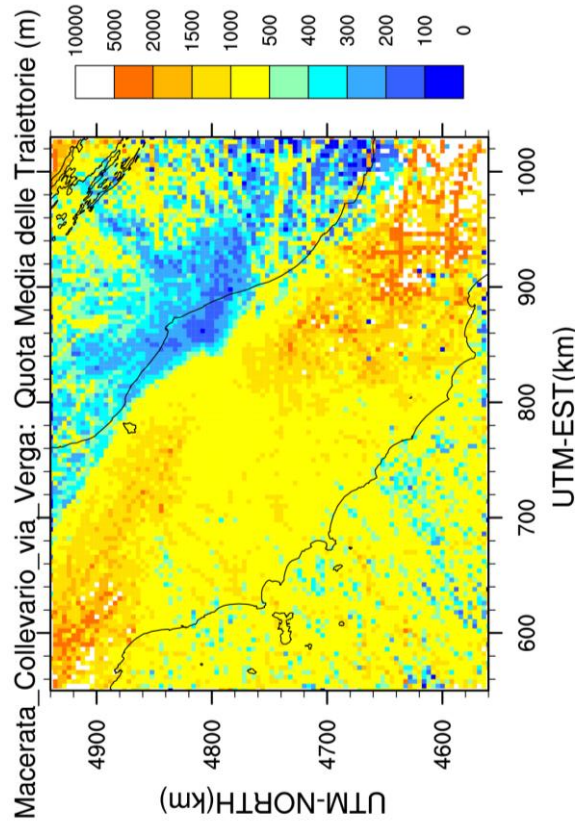
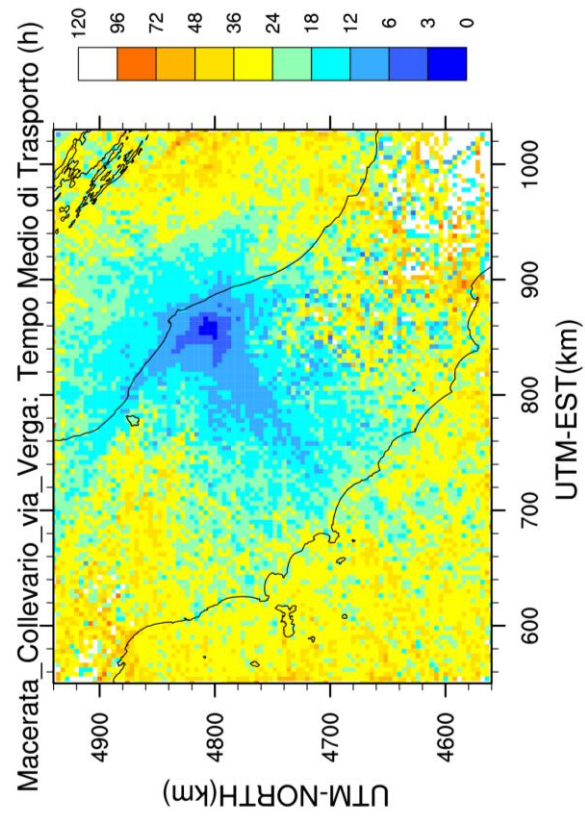
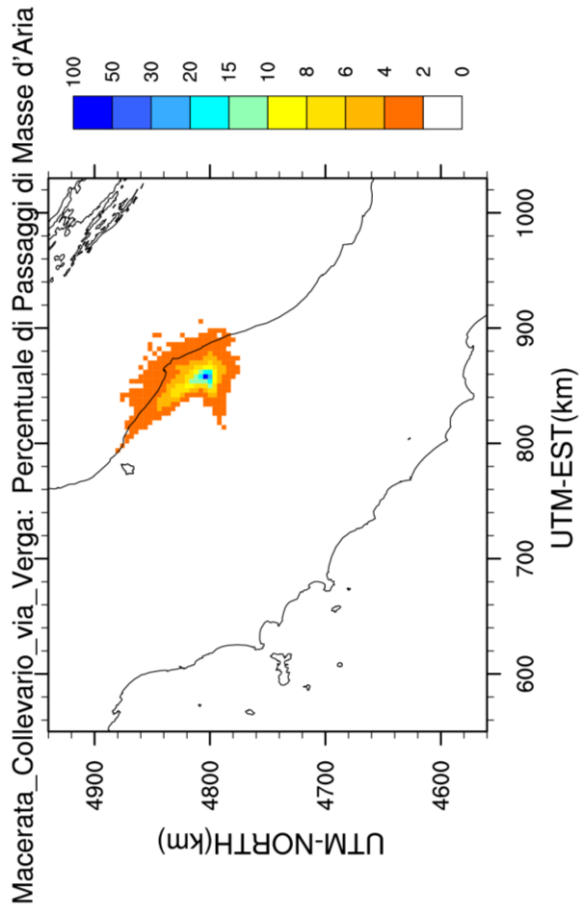
CENSEO: Tempo Medio di Trasporto (h)



CENSEO: Quota Media delle Traiettorie (m)

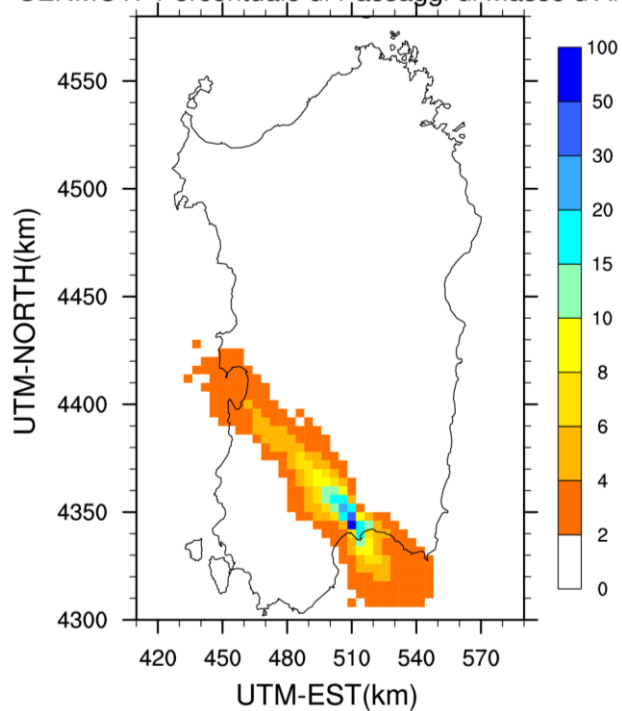


**MAPPA 22 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A CENSEO.**

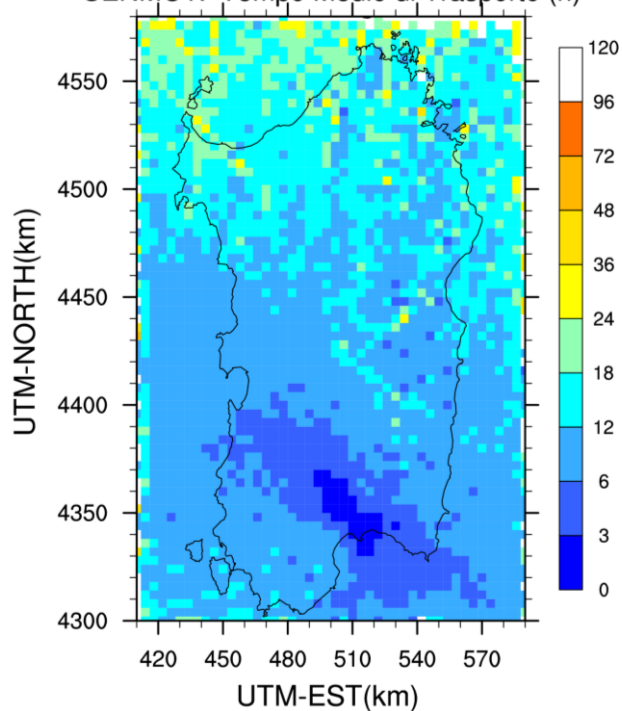


**MAPPA 23 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MACERATA COLLEVARIO VIA VERGA.**

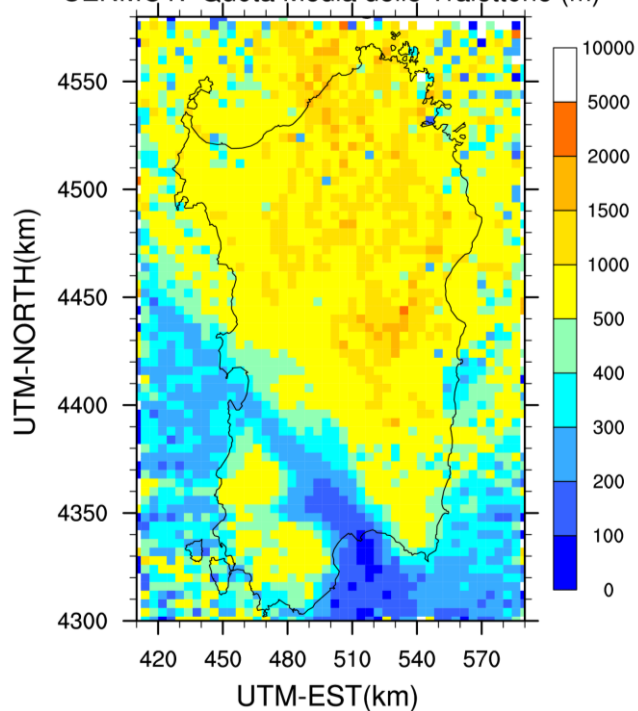
CENMO1: Percentuale di Passaggi di Masse d'Aria



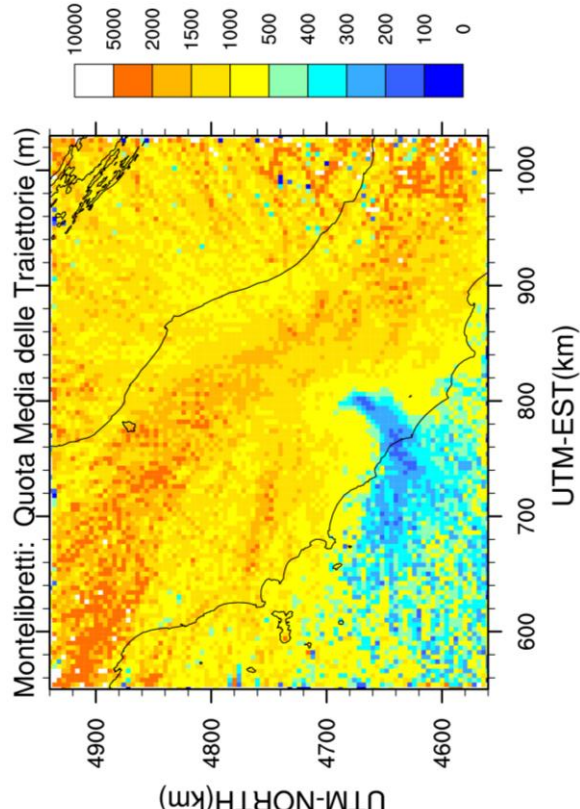
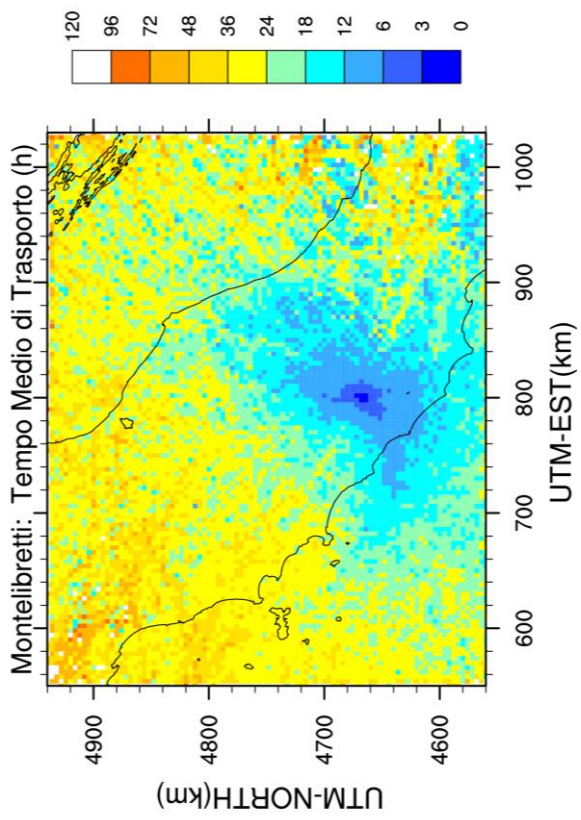
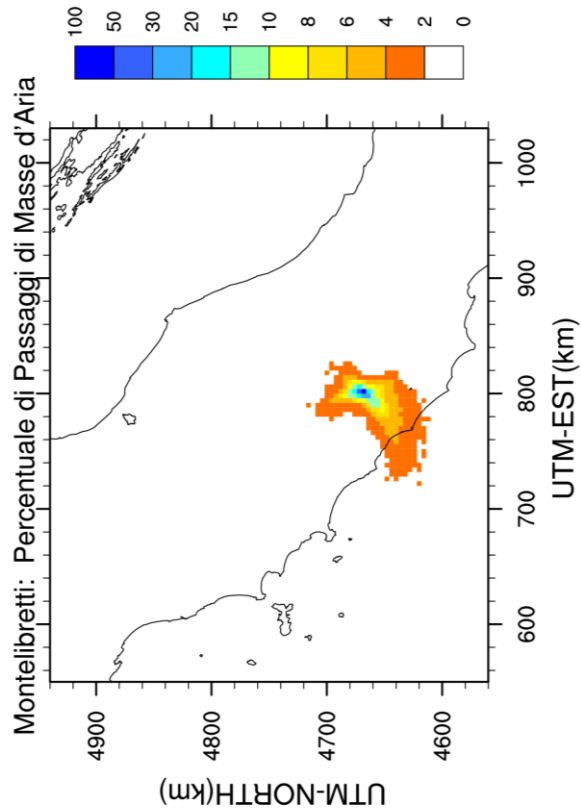
CENMO1: Tempo Medio di Trasporto (h)



CENMO1: Quota Media delle Traiettorie (m)



**MAPPA 24 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A CENMO1.**



**MAPPA 25 - PERCENTUALE DEI PASSAGGI (IN ALTO A SINISTRA), TEMPO MEDIO DI TRASPORTO (IN ALTO A DESTRA) E QUOTA MEDIA DELLE TRAIETTORIE (IN BASSO A SINISTRA) IN ARRIVO A MONTELIBRETTI.**

Edito dall' **ENEA**  
Servizio Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

*[www.enea.it](http://www.enea.it)*

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati  
Pervenuto il 21.6.2013

Finito di stampare nel mese di luglio 2013