

VERT 1.0: un modello originale per la stima delle emissioni da traffico veicolare implementato in ambiente di programmazione R

Giorgio Veratti, Alessandro Bigi, Sergio Teggi, Grazia Ghermandi

Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"
Università degli studi di Modena e Reggio Emilia

giorgio.veratti@unimore.it

PM2024 – Torino

28-31 Maggio 2024

Obiettivi dello studio:

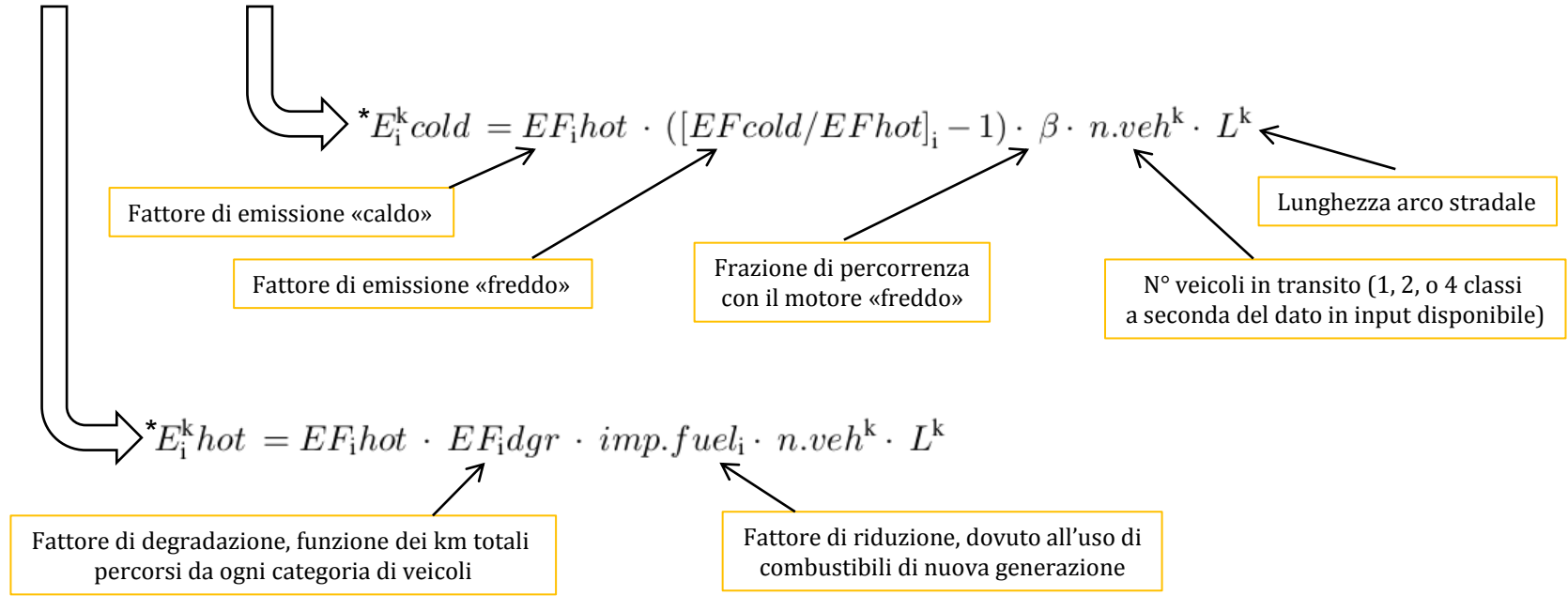
- Sviluppo di un pacchetto R per la stima bottom-up delle emissioni da traffico (CO, NO_x, NMVOC, PM, BC, OC, NH₃, SO₂, N₂O, CO₂, and CH₄), partendo da:
 - Stime di flussi di traffico
 - Composizione del parco veicolare
 - Fattori di emissione EMEP/EEA
- Caso studio 1: Accoppiamento di VERT con GRAMM/GRAL per la stima delle concentrazioni di NO_x in ambiente urbano
- Caso studio 2: Confronto risultati tra VERT e INEMAR a livello regionale per l'Emilia-Romagna

Implementazione: approccio bottom-up

La stima delle emissioni viene fatta a livello di singolo elemento (arco stradale o area di sosta).

Per un generico arco stradale k , una generica area di parcheggio m ed inquinante i , l'emissione totale sarà:

$$E_i^k = E_i^k hot + E_i^k cold + E_i^k non - exhaust + E_i^k resuspensions + E_i^{k,m} evaporative$$



Implementazione: approccio bottom-up

La stima delle emissioni viene fatta a livello di singolo elemento (arco stradale o area di sosta).

Per un generico arco stradale k , una generica area di parcheggio m ed inquinante i , l'emissione totale sarà:

$$E_i^k = E_i^k \text{ hot} + E_i^k \text{ cold} + E_i^k \text{ non-exhaust} + E_i^k \text{ resuspensions} + E_i^{k,m} \text{ evaporative}$$

$$* E_i^k \text{ non-exhaust} = EF_i \text{TSP} \cdot F_s \cdot Ss(v) \cdot n.veh^k \cdot L^k$$

Fattore di emissione per TSP

Fattore di correzione, funzione della velocità media di percorrenza

size-scaling factor (es. PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC, etc.)

$$** E_i^k \text{ resuspensions} = (sL^{0.91}) \cdot F_s \cdot (W^{1.02}) \cdot (1 - (1/4 \cdot \text{perc.wet.days})) \cdot L^k$$

Silt loading ($g \text{ m}^{-2}$) per la generica strada k

Massa media della flotta circolante

Frequenza di precipitazione (>0.254 mm) durante il periodo di simulazione

Alternativa 1)

$$*** E_i^k \text{ non-exhaust} = \text{user} - EF_i \cdot n.veh^k \cdot L^k$$

Alternativa 2)

* Ntziachristos, L. and Boulter, P.: 1.A.3.b.vi-vii Road tyre and brake wear 2019 — <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-gchapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-vi>

** EPA: Emission Factor Documentation for AP-42 - Final Report, <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/c13s0201.pdf>, 2011

*** es: Amato, F. et al.: Emission factors from road dust resuspension in a Mediterranean freeway, Atmospheric Environment, 61, 580-587, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.065>

Implementazione: approccio bottom-up

La stima delle emissioni viene fatta a livello di singolo elemento (arco stradale o area di sosta).

Per un generico arco stradale k , una generica area di parcheggio m ed inquinante i , l'emissione totale sarà:

$$* E_i^{k,m} \text{ evaporative} = E_i^m \text{ diurnal} + E_i^m \text{ soak} + E_i^k \text{ run}$$

$$E_i^m \text{ diurnal} = EF_i^{\text{diu}} \cdot n.\text{days} \cdot n.\text{veh}^m$$

Fattore di emissione giornaliero, funzione della categoria di veicolo

$$E_i^m \text{ soak} = n.\text{days} \cdot n.\text{veh}^m \cdot n.\text{trip.days} \cdot [\gamma \cdot ((1 - \beta) \cdot EF_{\text{hot,carb}} \text{soak} + \beta \cdot EF_{\text{cold,carb}} \text{soak}) + (1 - \gamma) \cdot E_{\text{hot,inj}} \text{soak}]$$

Frazione di veicoli equipaggiati con carburatore o sistema di ritorno

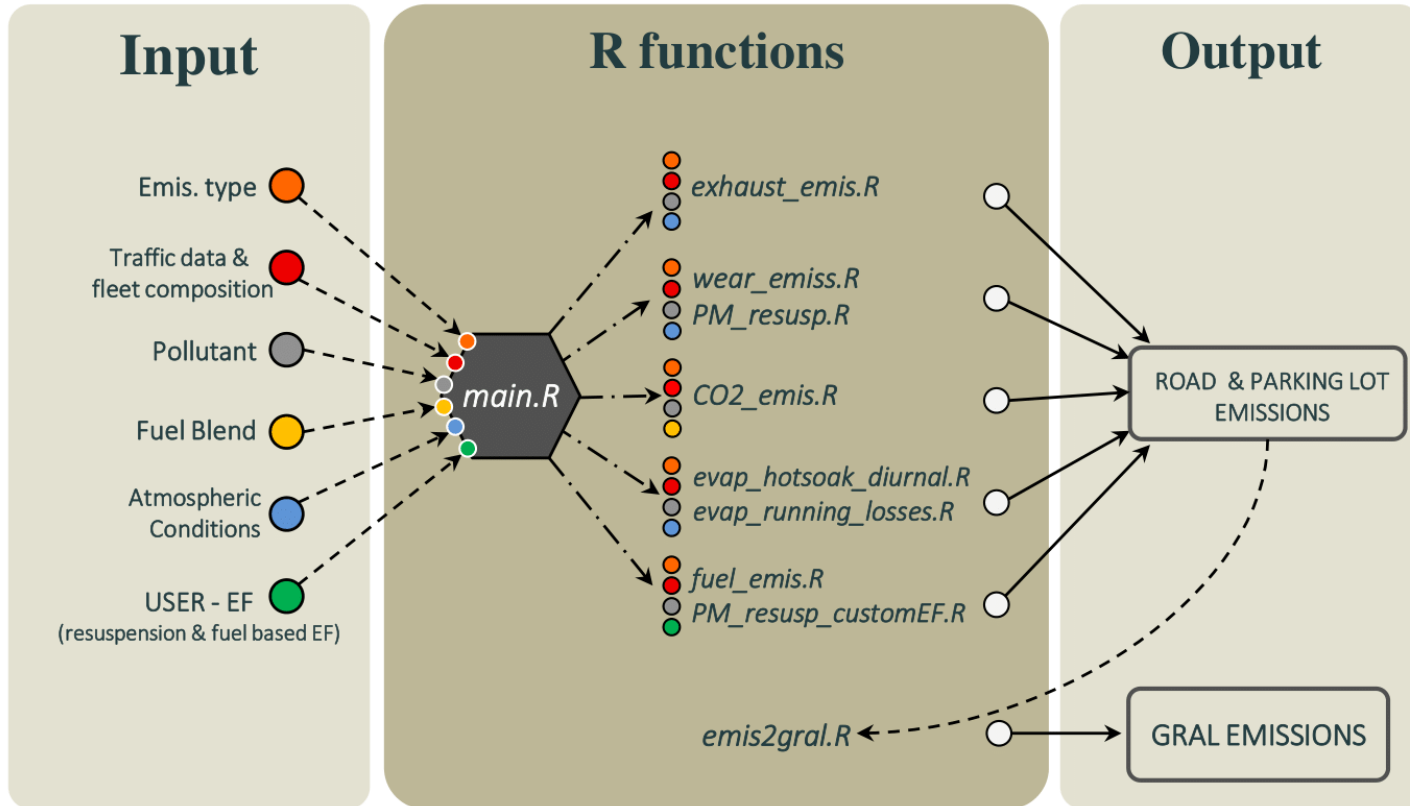
Fattori di emissione per
veicoli a carburatore

Fattore di emissione per
veicoli a iniezione

$$E_i^k \text{ run} = Lt^{-1} \cdot n.\text{veh} \cdot L \cdot [\gamma \cdot ((1 - \beta) \cdot EF_{\text{hot,carb}} \text{run} + \beta \cdot EF_{\text{cold,carb}} \text{run}) + (1 - \gamma) \cdot EF_{\text{hot,inj}} \text{run}]$$

Distanza media di percorrenza per ogni viaggio

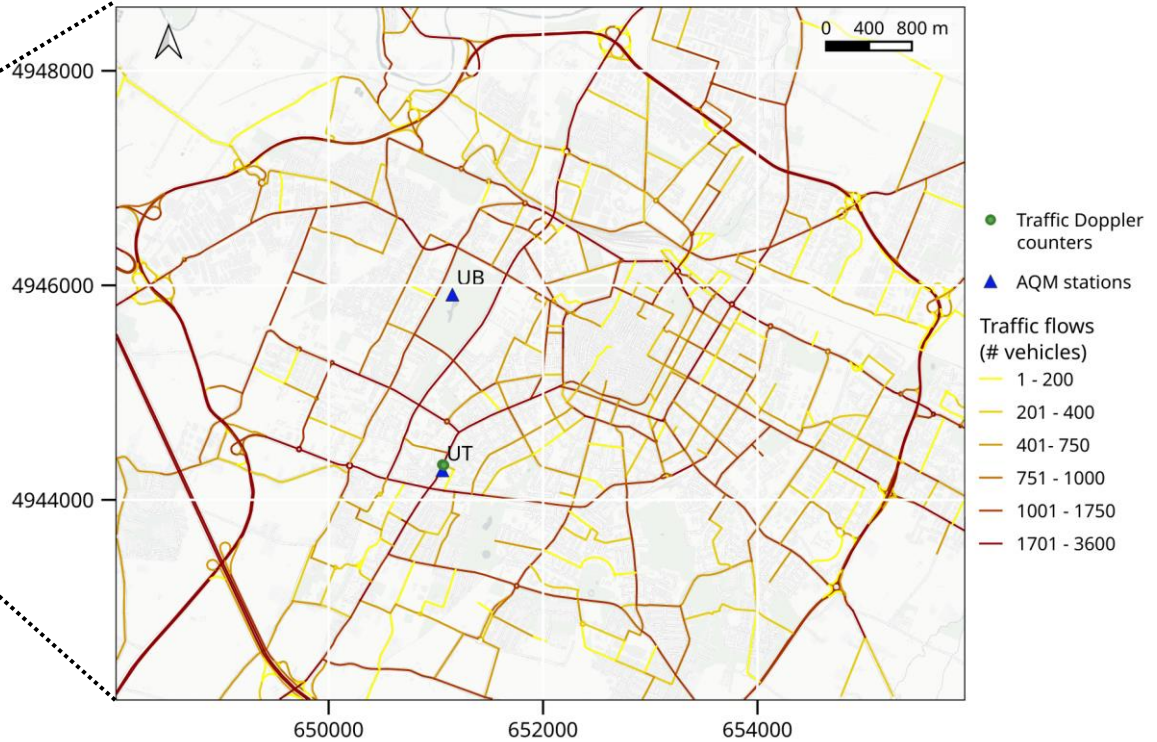
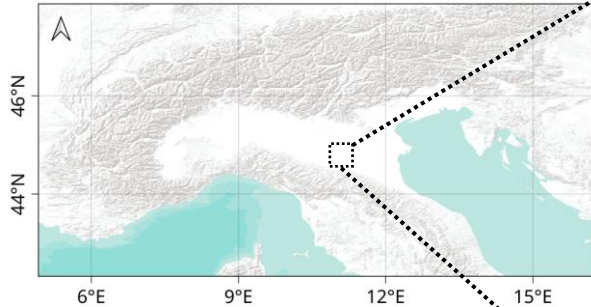
Rappresentazione schematica del funzionamento di VERT



Caso Studio 1:

Accoppiamento VERT - GRAMM/GRAL per la stima delle concentrazioni di NO_x in ambiente urbano (città di Modena)

Po valley

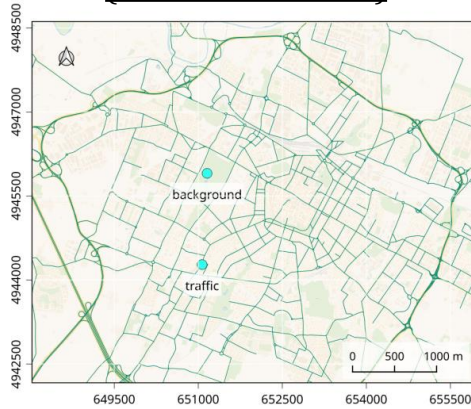


Modena urban domain -> **7.9 km x 6.5 km**
Resolution -> **4 m**

Caso Studio 1

Sviluppo di un sistema modellistico integrato per la stima delle concentrazioni di NOx

Stima dei flussi di traffico (simulati + misurati)



Modello emissivo

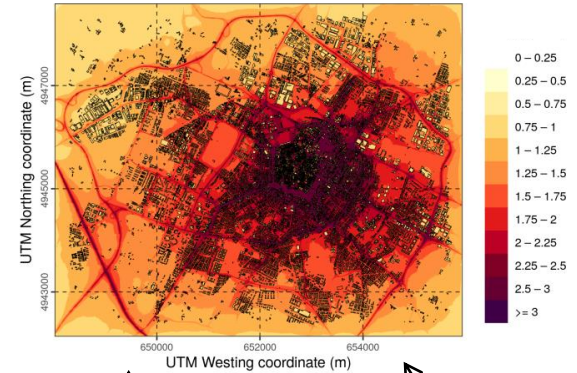


Composizione
parco veicolare
(anno 2021)

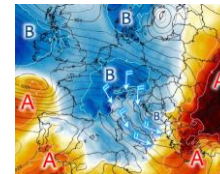


EMEP/EEA
Emissions Factors

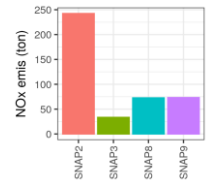
Modello Lagrangiano a particelle GRAMM/GRAL



Meteorologia

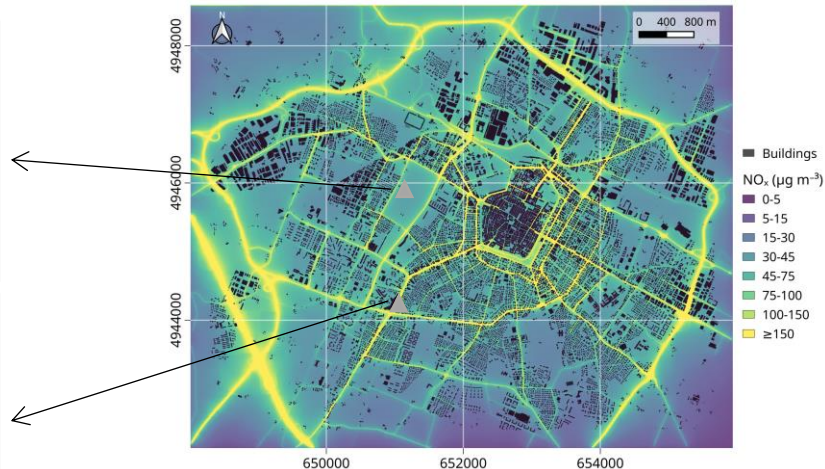
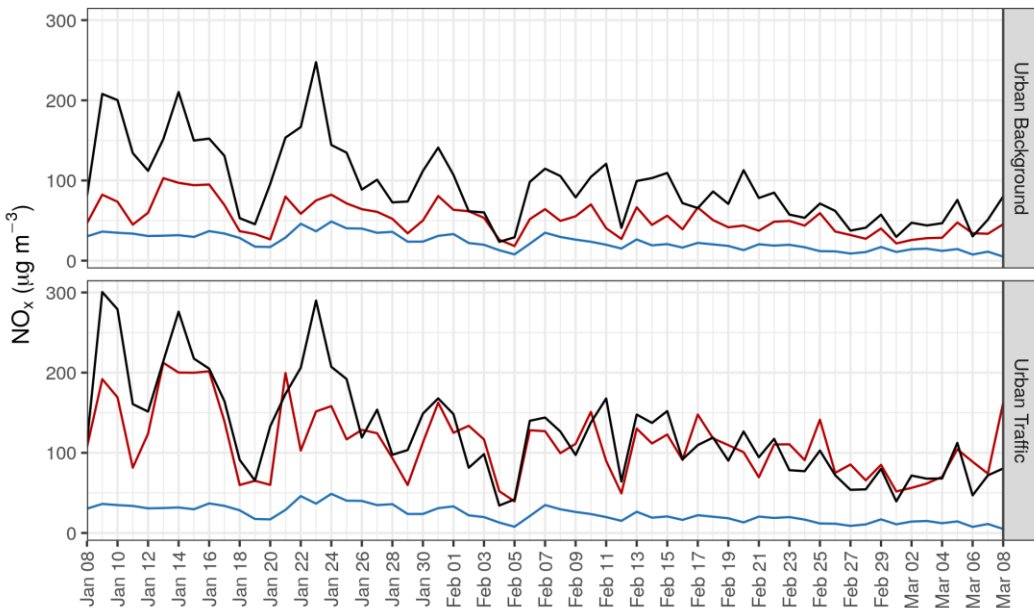


Inventario emissivo
per altre sorgenti



Risultati: Confronto concentrazioni simulate vs. osservate

— rural bkg — GRAL + rural bkg — obs



Analisi statistica delle concentrazioni orarie di NO_x

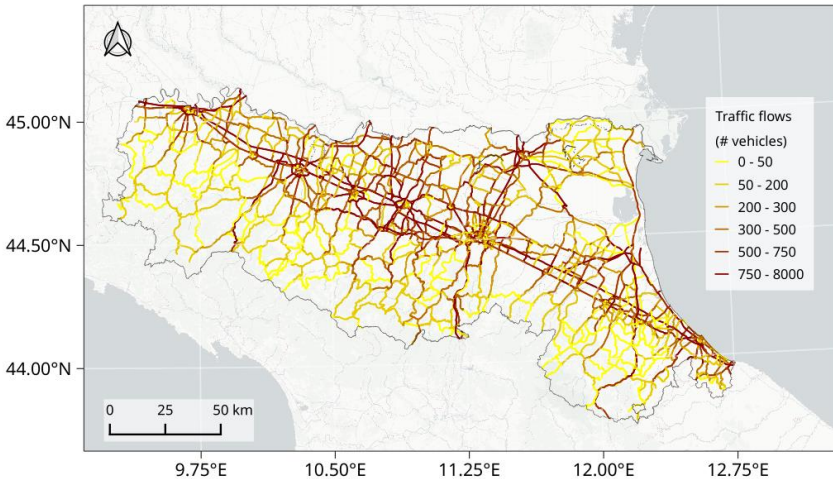
Stazione	MB ($\mu\text{g m}^{-3}$)	NMB	FAC2	NMSE	r	FB
Background	-13	-0.10	0.63	1.07	0.72	0.53
Traffic	-39	-0.42	0.80	0.37	0.62	0.11

I punteggi delle metriche considerate soddisfano ampiamente i criteri di accettazione stabiliti da Hanna e Chang nel 2012 (doi.org/10.1007/s00703-011-0177-1) per la modellistica urbana di dispersione.

Caso Studio 2:

Confronto tra le stime emissive prodotte da VERT e l'inventario INEMAR 2019 per la regione Emilia-Romagna

Metodologia – strade extraurbane & autostrade:



Stima dei flussi di traffico tramite il modello PTV VISUM (regione Emilia-Romagna)



72 scenari distinti per stagione, giorno della settimana e fascia oraria

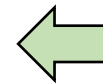


Stima della velocità di percorrenza tramite curve di deflusso misurate in alcune strade rappresentative della rete

Temperatura atmosferica media stagionale (emissioni cold-start ed evaporative)



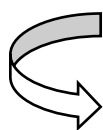
Stima delle emissioni annuali Strade extraurbane & autostrade



Caso Studio 2:

Confronto tra le stime emissive prodotte da VERT e l'inventario INEMAR 2019 per la regione Emilia-Romagna

Metodologia – strade urbane:

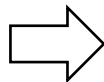
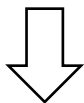


Il traffico urbano delle singole città necessita di simulazioni ad hoc per una stima accurata dei flussi di traffico

Stima delle emissioni tramite il consumo annuale regionale di carburante

$$\text{Consumo carburante aree urbane} = \text{Consumo totale regionale (fonte MASE, 2019)} - \text{Consumo carburante autostrade \& strade extra urbane}$$

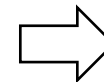
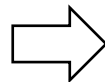
Stimato tramite VERT dalle simulazioni precedenti



In maniera iterativa calcolo quanti km deve percorrere la flotta veicolare per consumare la quantità di combustibile stimato con la formula precedente



Km percorsi

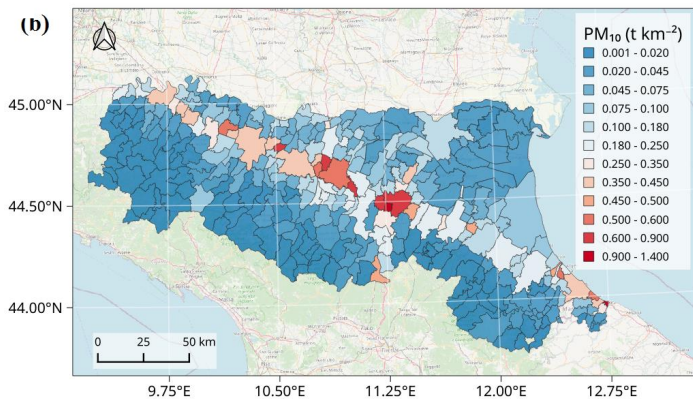
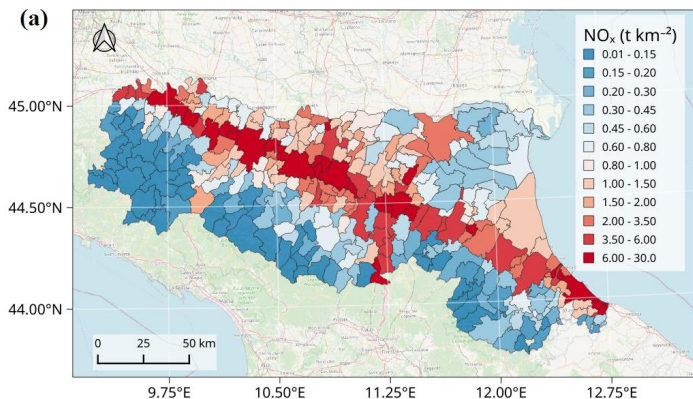


Emissioni urbane

Caso Studio 2:

Confronto tra le stime emissive prodotte da VERT e l'inventario INEMAR 2019 per la regione Emilia-Romagna

Esempio output VERT



Inquinante	VERT (ton)	INEMAR (ton)	Diff. (%)
NO _x	39606	33812	15
CO	52297	26819	49
PM exhaust	813	656	19
NMVOC exhaust	11549	2794	76
NMVOC evaporative	1281	1691	-24
SO ₂	64	57	11
NH ₃	354	489	-38
wear TSP	2064	2211	-7
wear PM ₁₀	1348	1430	-6
wear PM _{2.5}	718	774	-8
resusp. PM ₁₀ EPA-42	5506	-	-
resusp. PM ₁₀ Custom EF*	2649	-	-

*Amato et al., 2012: Emission factors from road dust resuspension in a Mediterranean freeway



Conclusioni:

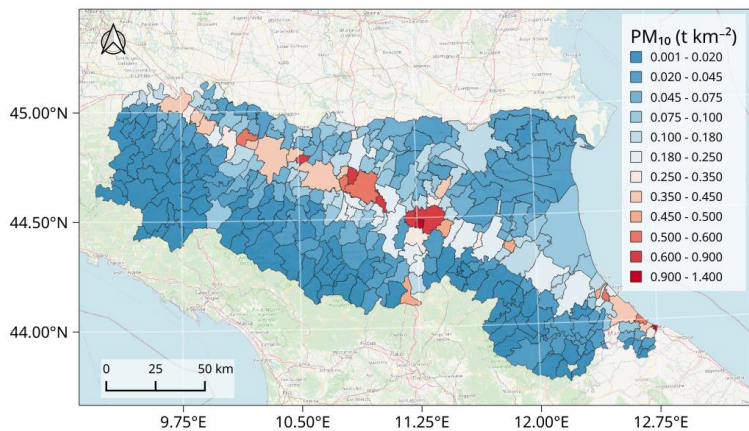
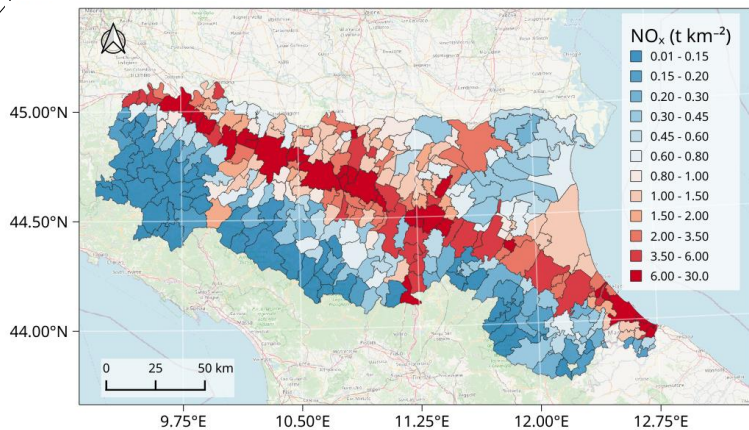
- È stato rilasciato VERT 1.0, un modello libero, gratuito e aperto (GNU GPL-3) per la stima delle emissioni da traffico ed integrato con la suite modellistica di dispersione GRAMM-GRAL
- VERT è stato applicato per la simulazione di NO_x su Modena, mostrando che il sistema integrato riproduce efficacemente le concentrazioni osservate, specialmente nei siti di traffico
- VERT è stato applicato a livello regionale e confrontato con le stime di INEMAR. I due modelli forniscono risultati concordi per NO_x , PM-exhaust, SO_2 , NMVOC-evaporative, PM-wear, con differenze percentuali nel range $-24 \div 19\%$. Per CO, NH_3 , NMVOC le differenze sono più accentuate (in valore assoluto fra 38% e 76%), sottolineando come l'incertezza nella stima delle emissioni di alcuni composti sia ancora elevata.

THANK YOU!



Caso Studio 2:

Confronto tra le stime emissive prodotte da VERT e l'inventario INEMAR 2019 per la regione Emilia-Romagna



Inquinante	autostrade		extraurbane		Urbane	
	VERT (ton)	VERT vs. INEMAR (%)	VERT (ton)	VERT vs. INEMAR (%)	VERT (ton)	VERT vs. INEMAR (%)
NO _x	19469	34	12748	0	7209	-11
CO	7428	-27	6371	16	38498	69
PM exhaust	373	39	254	12	186	-9
NMVOC exhaust	856	41	1112	43	9582	83
NMVOC evaporative	42	-24	41	-31	1198	-24
SO ₂	27	22	23	1	14	6
NH ₃	131	-77	91	-86	132	34
wear TSP	868	12	724	-42	473	11
wear PM ₁₀	543	16	486	-41	349	10
wear PM _{2.5}	293	12	256	-43	169	11
resusp . PM ₁₀ EPA-42	2015	-	1687	-	1804	-
resusp . PM ₁₀ Custom EF*	1088	-	682	-	879	-

*Amato et al., 2012: Emission factors from road dust resuspension in a Mediterranean freeway