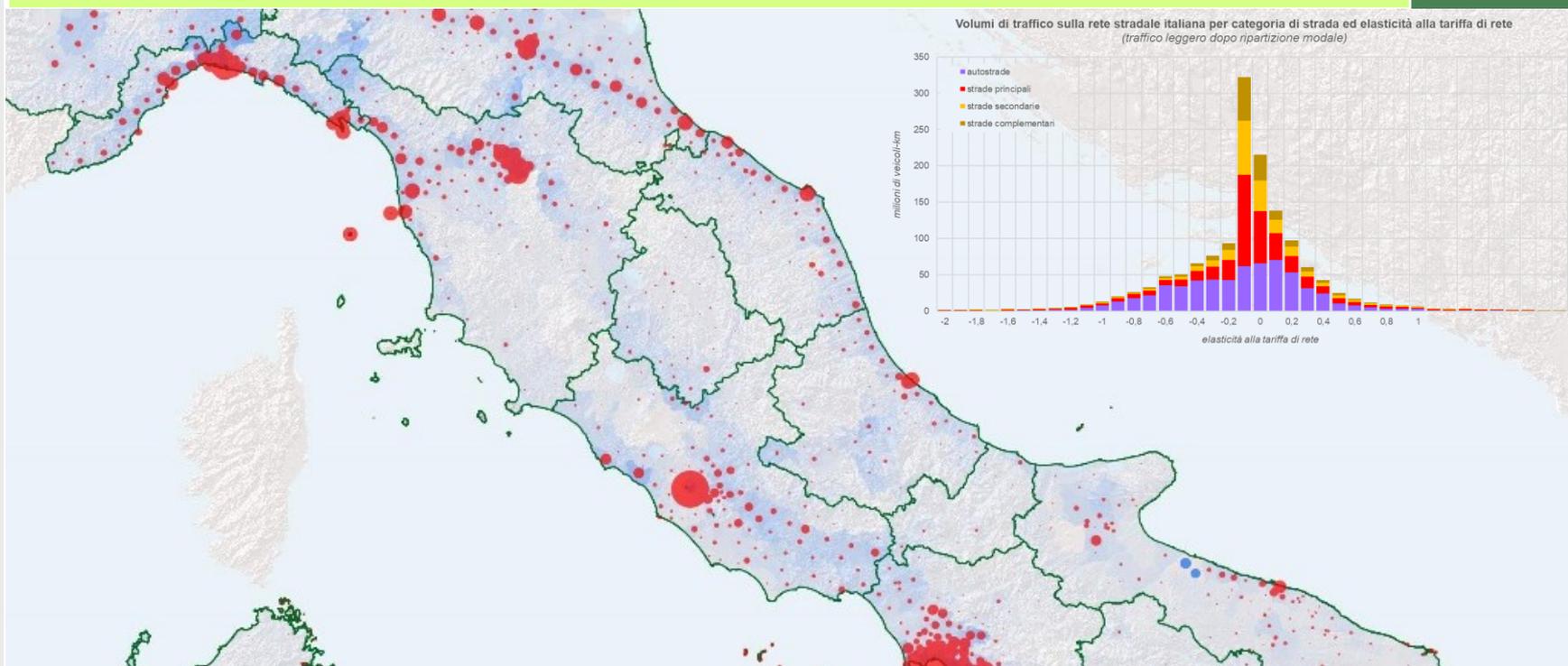


VERSO UNO SCENARIO DI TARIFFAZIONE EFFICIENTE DELLA RETE STRADALE

Andrea Debernardi, Samuel Tolentino, Francesca Traina Melega

Politecnico di Milano, 21 febbraio 2024



Introduzione

Presentiamo qui i risultati di una ricerca effettuata da META srl, su incarico di **Bridges Research onlus**, finalizzata a sviluppare **scenari di rimodulazione dei pedaggi autostradali sulla rete autostradale italiana**, secondo criteri:

- di completa **gratuità** («AUTZERO»); scenario di controllo, qui non presentato);
- di tariffazione ai **costi marginali** («COSTMARG»)
- ispirati a (maggiore) **efficienza** (à la *Ramsey-Boiteaux*, «CONGELAST»)

La ricerca è stata sviluppata utilizzando **i-TraM** (*italian Transport Model*) modello multimodale e multiscalare del sistema di trasporto italiano, sviluppato da META in collaborazione con il Laboratorio di Politica dei Trasporti (TRASPOL) del Politecnico di Milano.



CONTENTS

- La mobilità nazionale e il modello i-TraM
- La tariffazione a costi marginali
- Elasticità, congestione, tariffe
- Verso una tariffazione efficiente
- Conclusioni

La mobilità nazionale e il modello i-TraM

Introduzione

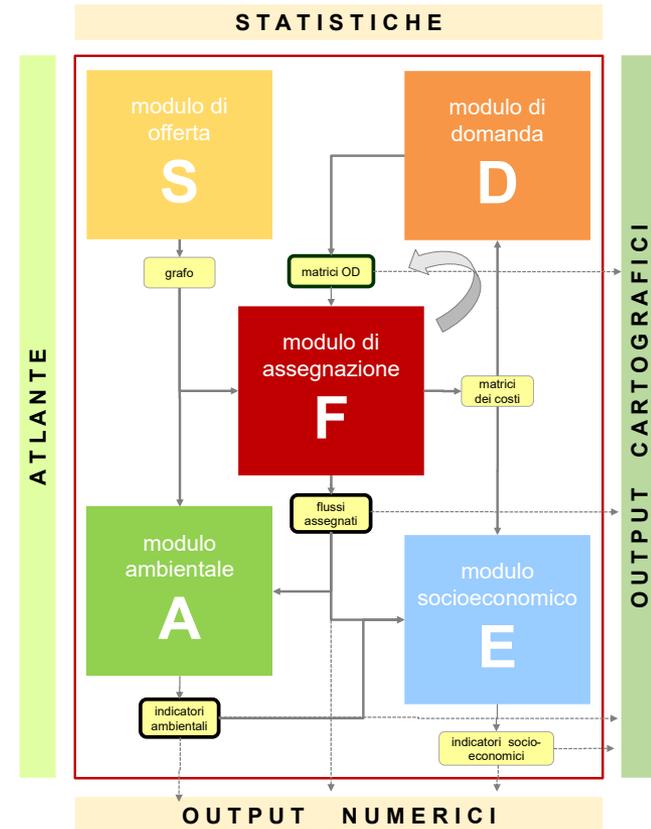
Il modello **i-TraM** è un «normale» modello multimodale a quattro stadi...

... con la particolarità di una **architettura multiscalare**, che gli consente di funzionare rinfittendo o diradando la zonizzazione a seconda delle necessità.

Il modello è in grado di stimare:

- la **domanda di mobilità** passeggeri e merci
- i **flussi di traffico** sulle diverse reti
- una serie di **indicatori di pressione ambientale**

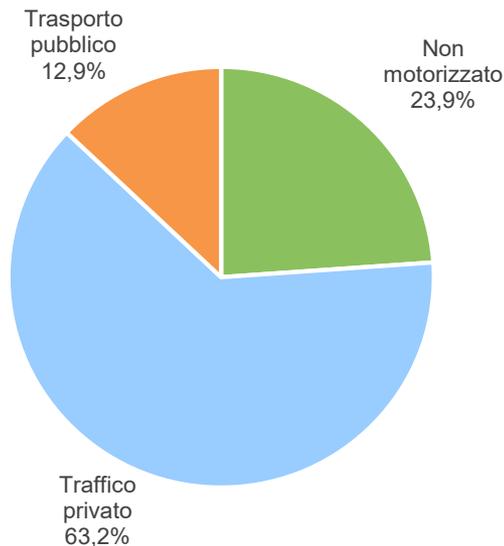
Uno dei punti di forza del modello è l'elevato numero di zone (>1.700) che consente di sviluppare analisi dettagliate anche a scala regionale e metropolitana.



Spostamenti generati/attratti

Il modello, riferito ad una tipica giornata feriale (lavorativa/scolastica) dell'anno 2019, riproduce circa **121,6 milioni di spostamenti**, così ripartiti:

- 23,9% non motorizzato
- 63,2% motorizzato individuale (privato)
- 12,9% motorizzato collettivo (pubblico)

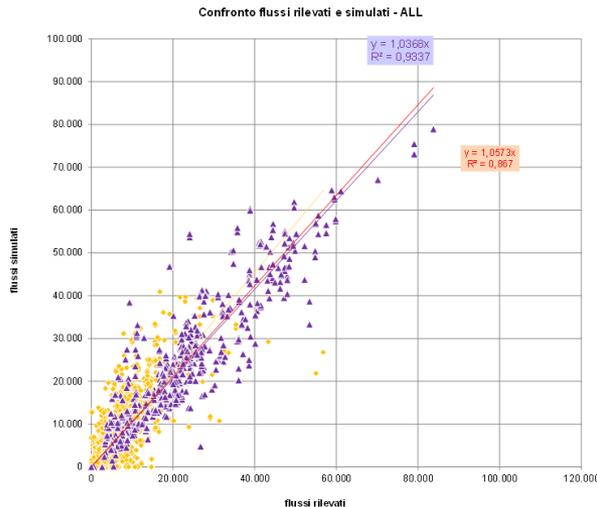


Elaborazioni META su modello i-TraM

Traffico motorizzato individuale

L'assegnazione del trasporto privato riproduce con buona approssimazione i carichi veicolari rilevati sulla rete (dati Autostrade, ANAS, ecc...).

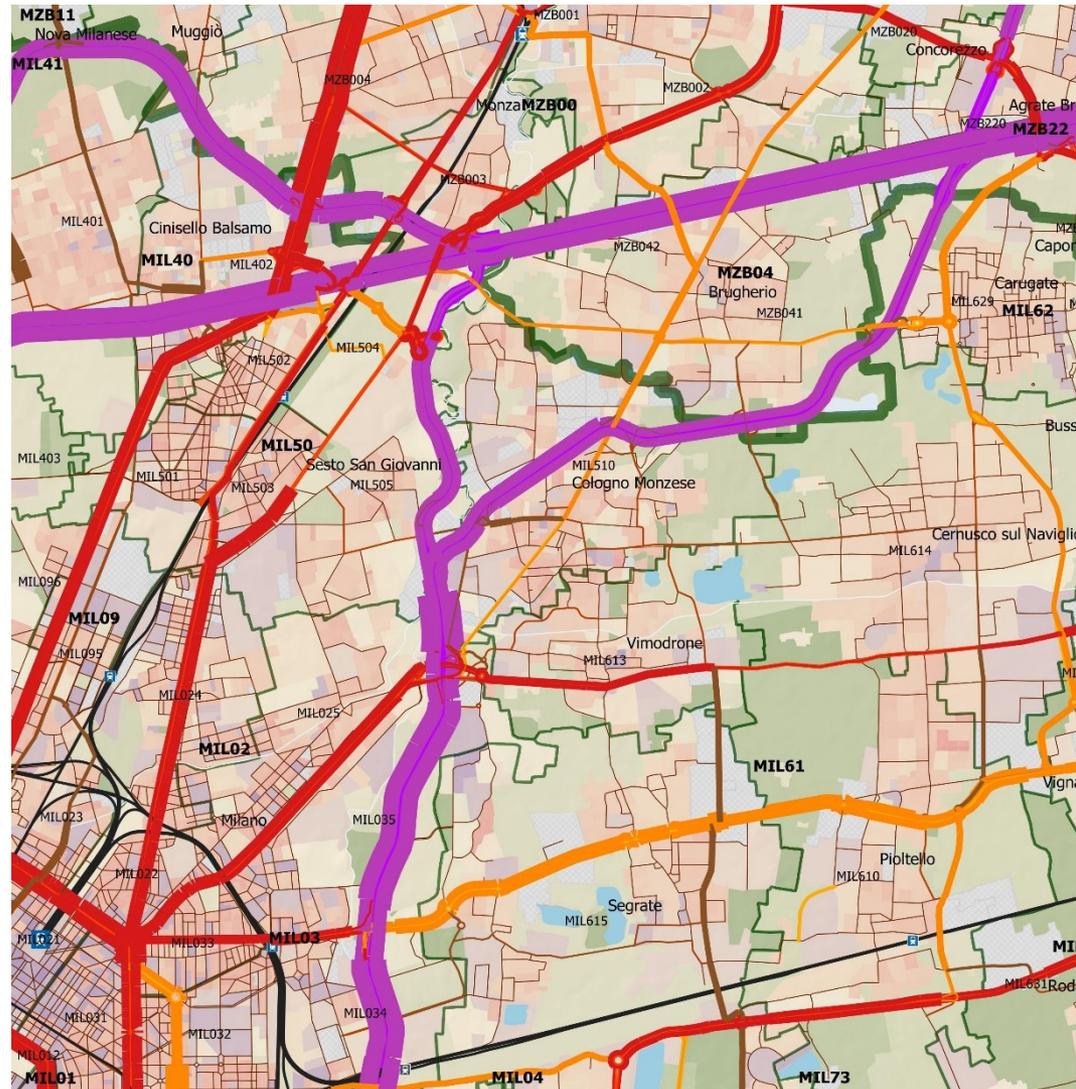
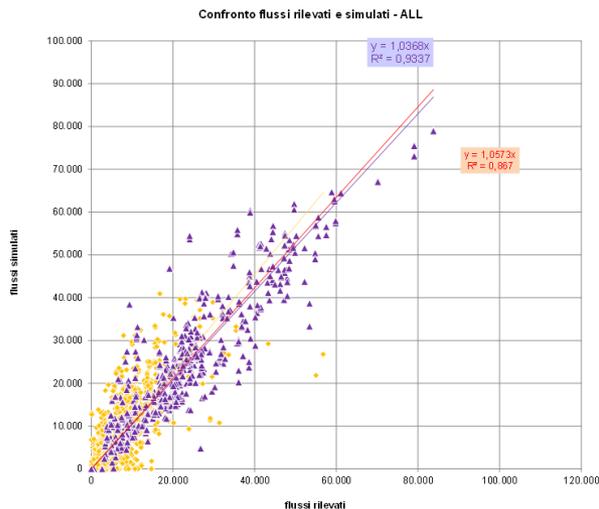
L'assegnazione del trasporto privato consente di stimare un volume di traffico giornaliero feriale di **1,33 miliardi di $v_{eq}km$** , di cui 1,09 imputabili a traffico leggero e 0,24 a traffico pesante.



Elaborazioni META su modello i-TraM

Traffico motorizzato individuale

Anche se non scende sino al livello comunale, la zonizzazione di base è sufficientemente fitta da riprodurre in modo attendibile i flussi anche in contesti metropolitani complessi. Ne deriva una maggiore precisione in termini di stima degli indicatori funzionali ed ambientali.

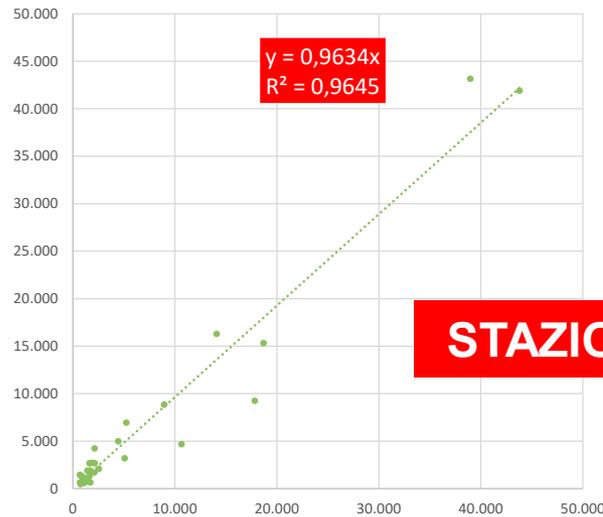


Elaborazioni META su modello i-TrAM

Trasporto pubblico

L'assegnazione del trasporto pubblico riproduce circa 6,9 milioni di spostamenti giorno su treni, aerei, navi e bus lunga percorrenza nonché su metropolitane e tram.

Valori coerenti con i dati di transito nelle stazioni...

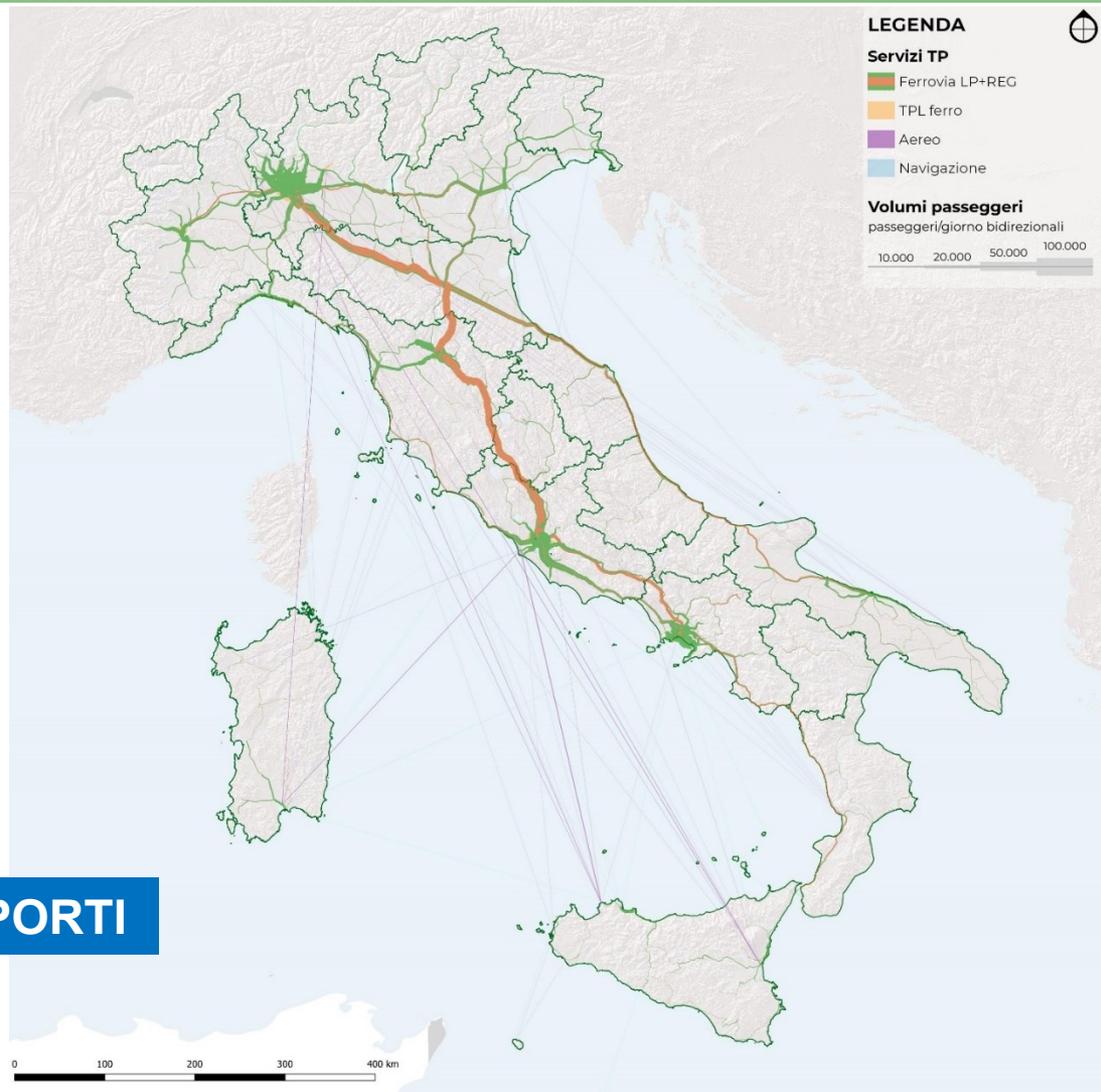
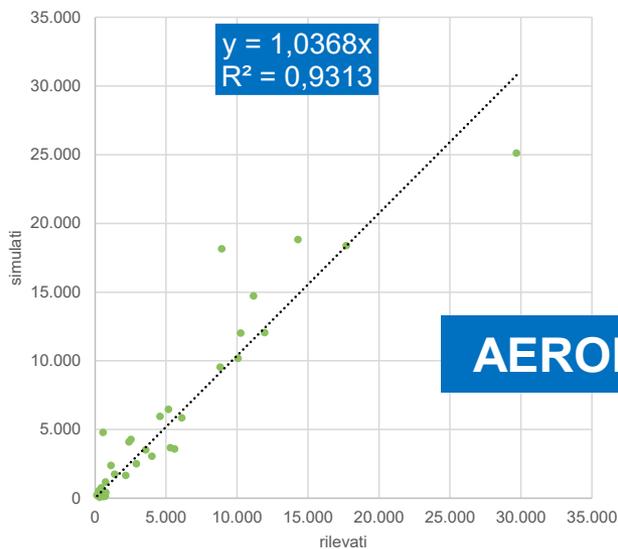


Elaborazioni META su modello i-TraM

Trasporto pubblico

L'assegnazione del trasporto pubblico riproduce circa 6,9 milioni di spostamenti giorno su treni, aerei, navi e bus lunga percorrenza nonché su metropolitane e tram.

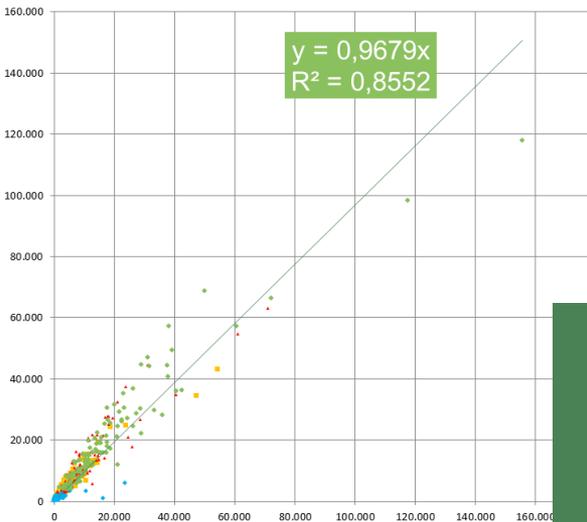
... e negli aeroporti



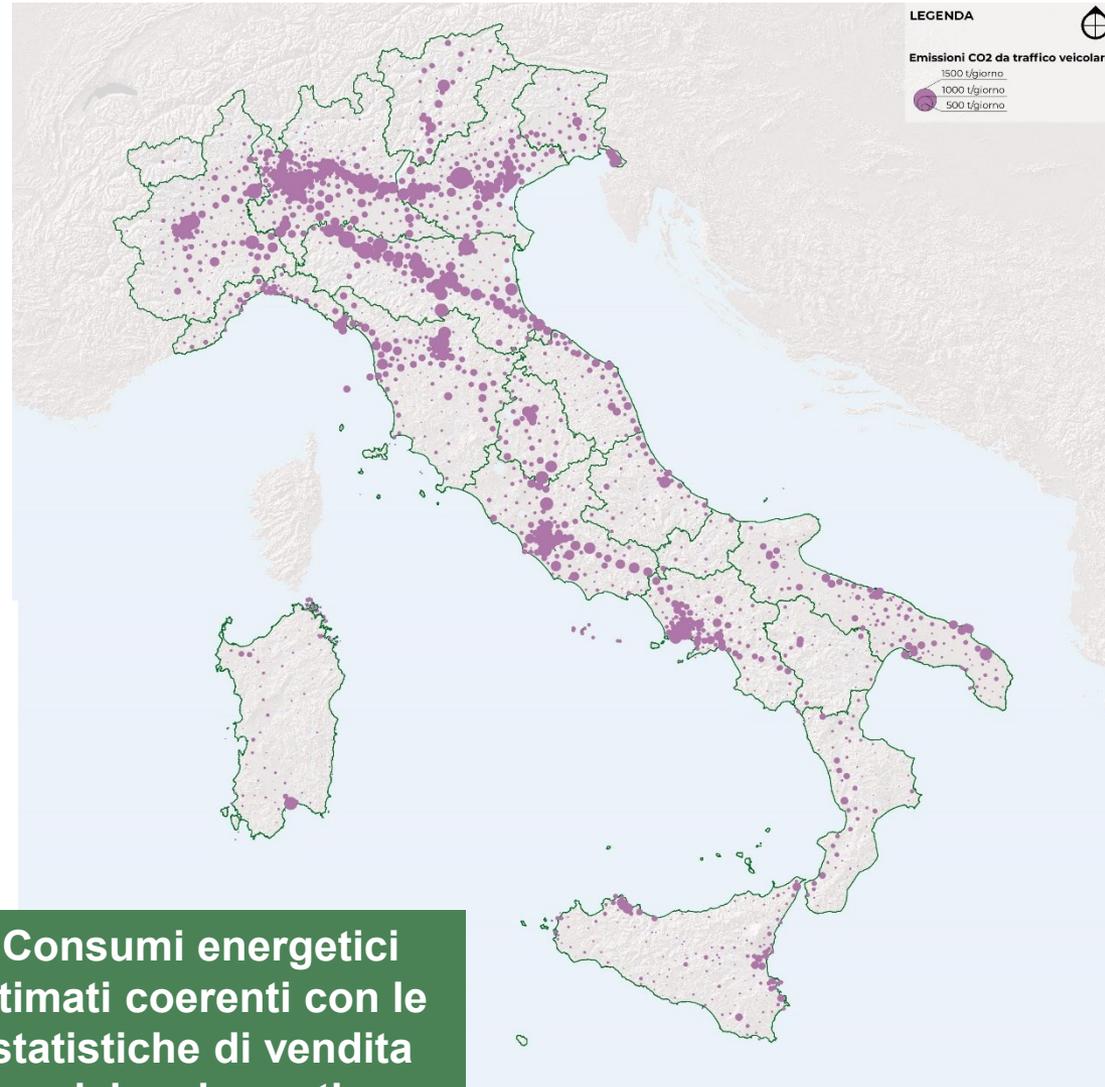
Elaborazioni META su modello i-TraM

Consumi energetici ed emissioni atmosferiche

Il modulo ambientale stima un consumo di carburanti per autotrazione pari a circa 106 ktep/giorno, in buon accordo con i valori di vendita forniti dal Bollettino Petrolifero. A questo valore corrispondono emissioni di CO₂ pari a 328 kt/giorno e 100 Mt/anno, valore coerente con le stime ufficiali.



Consumi energetici stimati coerenti con le statistiche di vendita dei carburanti

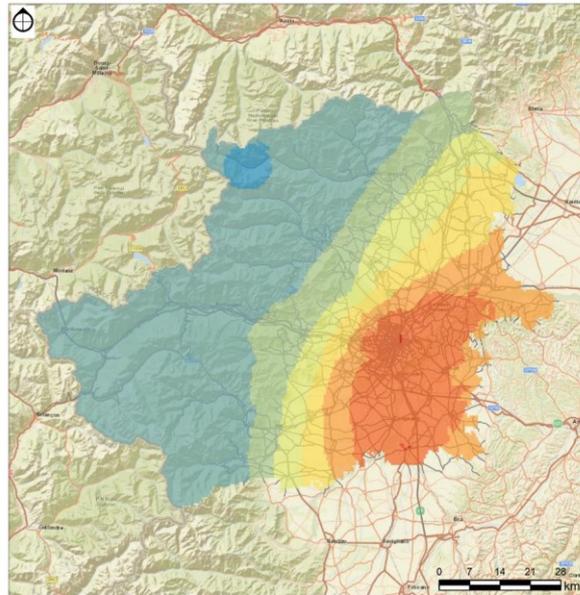


LEGENDA
Emissioni CO₂ da traffico veicolare
1500 t/giorno
1000 t/giorno
500 t/giorno

Elaborazioni META su modello i-TraM

Consumi energetici ed emissioni atmosferiche

L'interfacciamento tra modello di traffico e modelli ambientali consente di ricostruire i complessi **cammini d'impatto** che legano le **domanda** di mobilità e l'**offerta** di trasporto pubblico e privato alle **emissioni** ed alle **concentrazioni di inquinanti atmosferici**.



MENU | CERCA | NOTIFICHE | la Repubblica | ABBONATI | GEDI SMILE | R | ACCEDI

NEWS VIDEO BIODIVERSITÀ CLIMA ECONOMIA ENERGIA GIARDINAGGIO MOBILITÀ SALUTE TUTORIAL FESTIVAL G&B CHI SIAMO

L'EMERGENZA

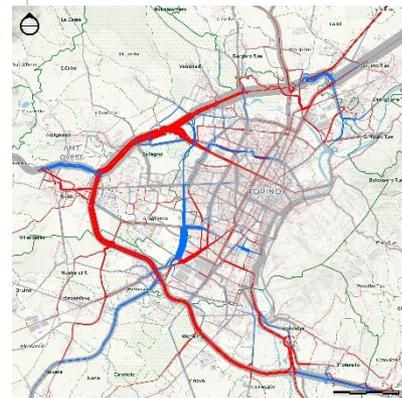
"Milano paragonata a Delhi per l'inquinamento atmosferico: la crisi del clima non aiuta a respirare"

di Giacomo Talignani

Il Fisico del Clima del Cnr Antonello Pasini spiega cosa sta accadendo in Pianura Padana.

"L'unica soluzione per limitare l'impatto dello smog? Fermare le emissioni"

19 FEBBRAIO 2024 AGGIORNATO ALLE 17:25 3 MINUTI DI LETTURA



Il modello è stato utilizzato da META e Terraria srl a supporto del PUMS della Città Metropolitana di Torino: emissioni di CO₂: - 27,1% emissioni di PM₁₀: -33,4%

Elaborazioni META/Terraria su modello i-TraM

La tariffazione a costi marginali

Riferimenti tariffari

Per quanto concerne lo scenario con tariffazione a costi marginali, i valori presi a riferimento sono quelli di utilizzo dell'infrastruttura, indicati dall'Unione Europea.

| Costi marginali di utilizzo dell'infrastruttura - Unione Europea (2010) | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------|-------------------|--------------|
| Veicoli | Categoria di riferimento | €/vkm | | | |
| | | tutte le strade | autostrade | strade principali | altre strade |
| leggeri | Cars | 0,005 | 0,002 | 0,003 | 0,008 |
| pesanti | HGV 18-26 t, 3 axles | 0,052 | 0,022 | 0,036 | 0,289 |
| | HGV 44 t, 5 axles | 0,188 | 0,079 | 0,131 | 1,050 |
| | media | 0,120 | 0,051 | 0,084 | 0,670 |

Fonte: European Union-DG MOVE *Update of the Handbook on External Costs of Transport*, 2014

Lo scenario prevede semplicemente la **tariffazione di tutte le tratte autostradali** (incluso tangenziali, raccordi e trafori) al livello di:

- **0,002 €/km** per i veicoli leggeri (-95% rispetto ai livelli medi attuali)
- **0,051 €/km** per i veicoli pesanti (-75% rispetto ai livelli medi attuali)

Effetti di diversione modale

L'effetto simulato in termini di domanda evidenzia il trasferimento dal trasporto pubblico a quello privato di **circa 115.000 spostamenti/giorno** (-0,7% della domanda su trasporto pubblico, +0,1% di quella su trasporto privato).

Il trasferimento si concentra in particolare sugli spostamenti:

- attratti dai principali centri urbani;
- generati lungo le principali direttrici di traffico interregionali.

L'effetto è più forte dove i pedaggi autostradali sono particolarmente elevati, praticamente nullo dove non vi sono autostrade a pedaggio.



Elaborazioni META su modello i-TraM

Effetti sul traffico stradale

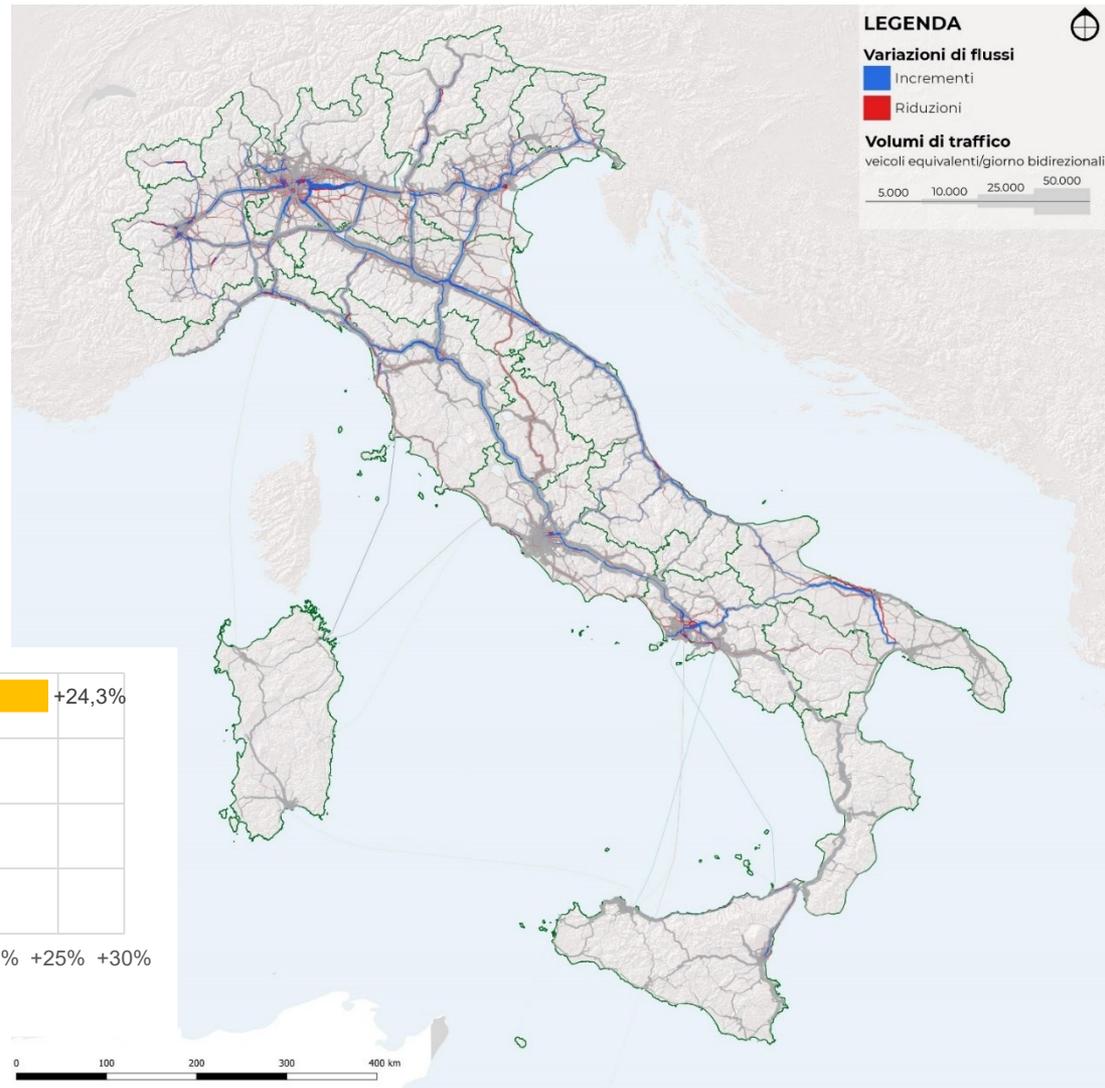
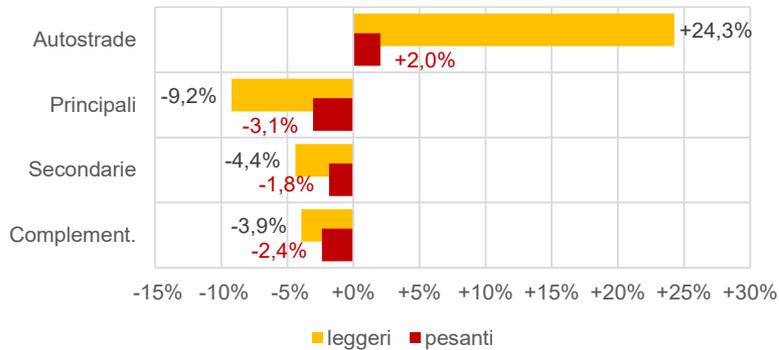
L'effetto simulato in termini di domanda determina una significativa **redistribuzione dei flussi stradali**:

TRAFFICO LEGGERO

Autostrade +24%
Strade ordinarie: -7%
- 0,8 Mvh/giorno

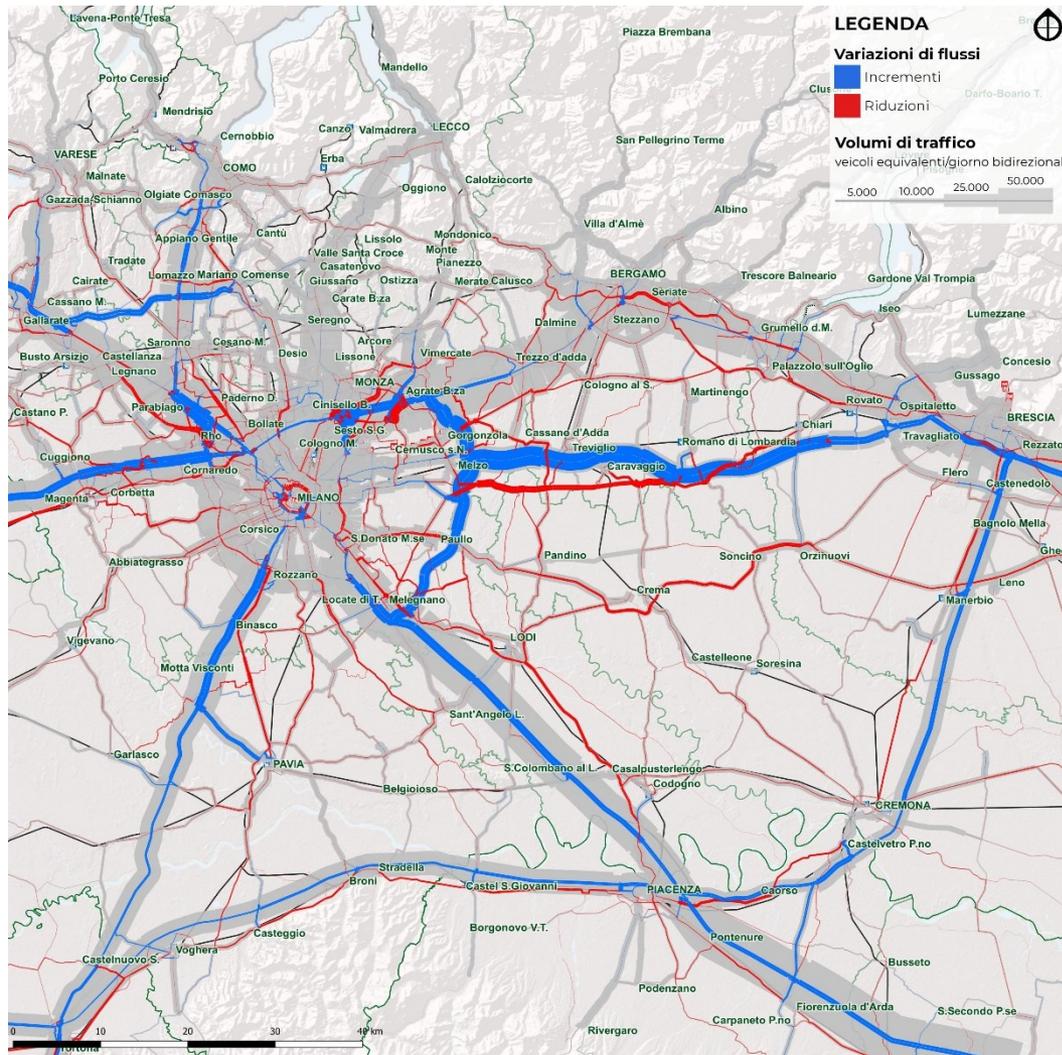
TRAFFICO PESANTE

Autostrade +2%
Strade ordinarie -3%
+ 0,1 Mvh/giorno



Elaborazioni META su modello i-TrAM

Effetti sul traffico stradale



E' importante evidenziare che la stessa tariffazione genera effetti diversi a seconda del contesto.

Ad esempio, nel caso della rete autostradale ad Est di Milano, la tariffazione a costi marginali determina:

- un incremento di traffico sulle **tratte autostradali poco congestionate** (A7, A1, A21);
- Una crescita più che proporzionale sulle **tratte autostradali** oggi caratterizzate da **pedaggi molto elevati** (BreBeMi, TEEM);
- Effetti contenuti sulle **tratte autostradali congestionate** (tangenziali) o **soggette alla competizione** delle precedenti (A4 tra Milano e Brescia)

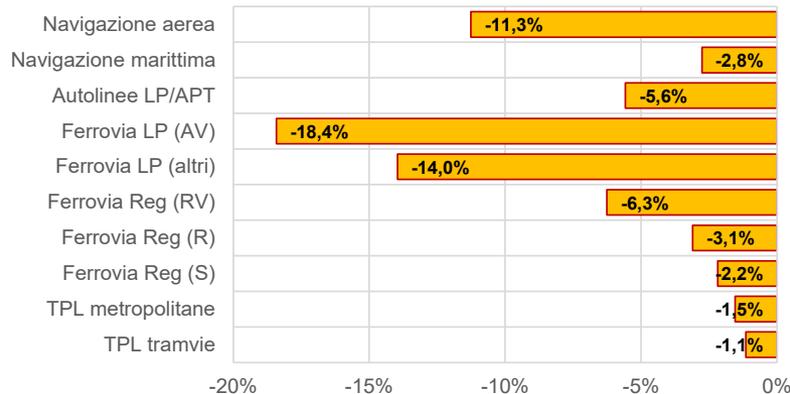
Elaborazioni META su modello i-TraM

Effetti sul trasporto pubblico

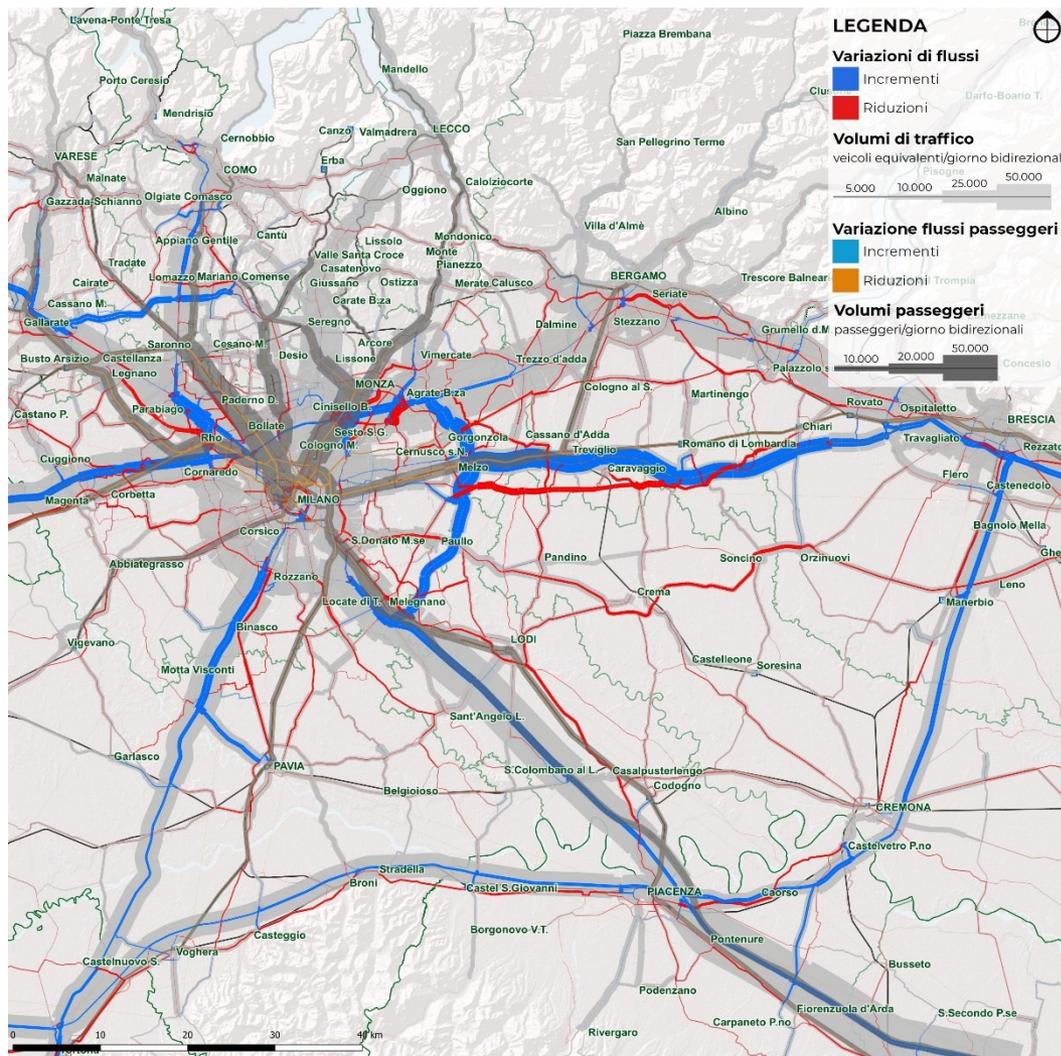
L'assegnazione del trasporto pubblico evidenzia una riduzione soprattutto sulle principali direttrici di accesso ai grandi centri urbani, paralleli ad autostrade a pedaggio.



PASSEGGERI



Effetti sul trasporto pubblico



Gli effetti di trasferimento modale rendono il quadro localmente ancora più complesso.

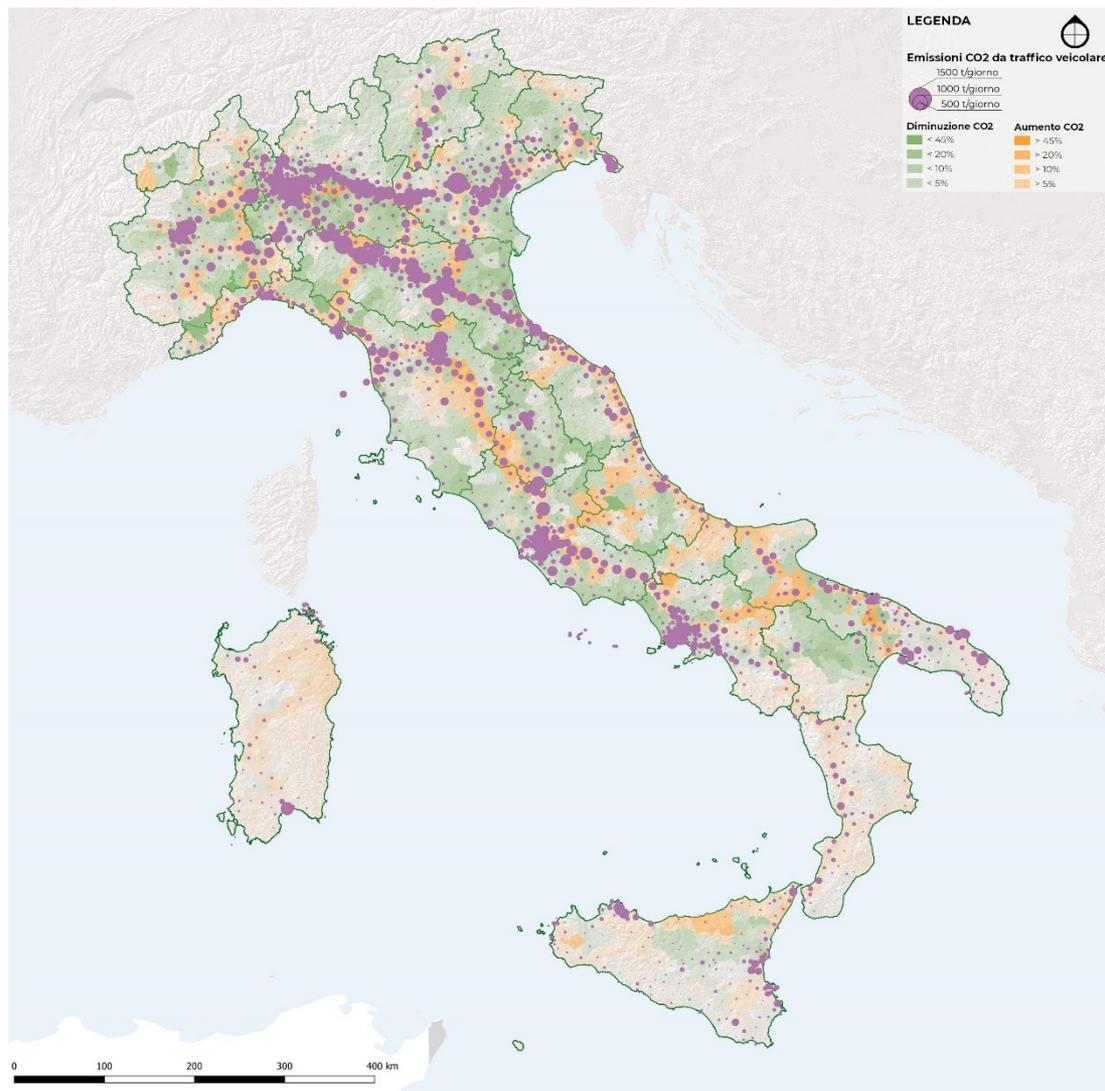
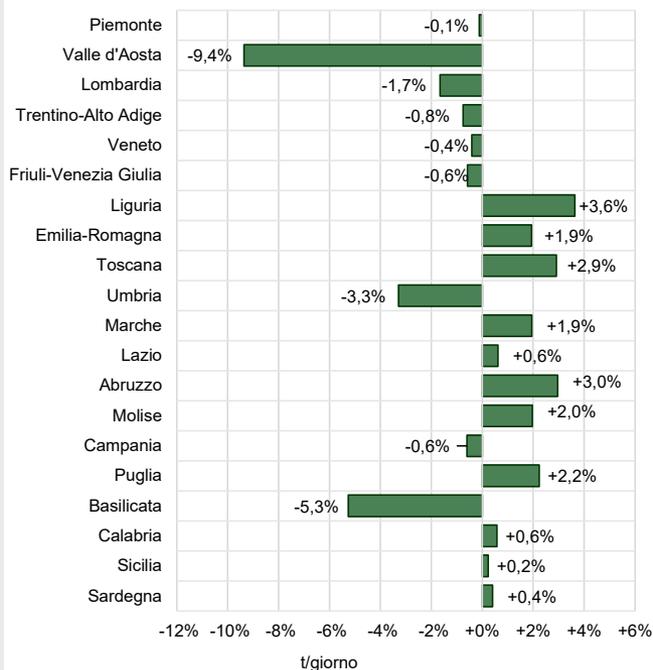
Tornando sul caso precedente, la riduzione del pedaggio sulla BreBeMi determina anche una sensibile **riduzione dell'attrattività dei servizi ferroviari di medio raggio tra Milano, Brescia, Verona, Padova e Venezia.**

Come si vedrà più avanti, **con altre modalità di tariffazione, possono generarsi anche effetti di segno opposto.**

Effetti ambientali

In termini ambientali, si stima un modesto incremento (+0,2%) sia dei consumi energetici che delle emissioni di CO₂.

Questo valore è però la media di effetti diversi in differenti porzioni di rete.



Elaborazioni META su modello i-TrAM

Elasticità, congestione, tariffe

Tariffe alla Ramsey-Boiteaux e congestione

Per esplorare uno scenario di tariffazione (più) efficiente, è necessario tenere conto anche:

- ✓ della **congestione** esistente sui singoli archi stradali;
- ✓ dell'**elasticità** dei flussi veicolari in riferimento ai livelli tariffari applicati.

L'ipotesi teorica è quella di una **tariffazione alla Ramsey-Boiteux** finalizzata non alla massimizzazione della raccolta fiscale, ma al cambio di comportamento di consumo
→ occorre dunque **tariffare di più i consumi elastici e meno quelli rigidi**.

Nello stesso tempo, l'applicazione di una **tariffa di congestione** consentirebbe di eliminare, o contenere, i consumi inefficienti

→ questa tariffa però viene applicata solo alla **domanda elastica**, cioè alle **relazioni con alternative** (di itinerario o di viaggio): infatti, le relazioni prive di alternative si limiterebbero a pagare più tariffa, ma non cambierebbero il loro consumo.

Elasticità: un concetto multidimensionale

E' sempre importante sottolineare come, in un sistema a domanda «derivata» come quello di trasporto, l'elasticità si sviluppi per così dire «a strati».

La riduzione di flusso conseguente alla tariffazione infatti può determinarsi perché gli automobilisti, alternativamente:

→ cambiano **itinerario stradale**

→ cambiano **modo di trasporto**

→ cambiano **destinazione di viaggio**

→ **dematerializzano** lo spostamento (es. *smart working*)

→ **rinunciano all'attività** che motiverebbe il viaggio

EFFETTI INCLUSI

EFFETTI ESCLUSI

Elasticità della domanda stradale

Al fine di stimare l'**elasticità della domanda ai livelli tariffari applicati a vaste porzioni di rete**, simulare la variazione dei flussi derivante dalla tariffazione di ciascun singolo arco stradale sarebbe abbastanza fuorviante (oltre che molto oneroso dal punto di vista computazionale): il problema è infatti soprattutto quello di capire **come si comportino gli archi in rapporto alla tariffazione degli archi circostanti**.

Pertanto, in prima approssimazione si è operato **applicando a tutta la rete** (autostradale ed ordinaria) **un unico livello tariffario**, e verificando quindi che cosa accade facendolo variare del +/-10% al suo intorno.

La scelta di questo livello è avvenuta in modo da pareggiare il monte delle **accise** complessivamente gravanti sui **carburanti per autotrazione** (circa 19 mld €/anno)

Calcolo dell'elasticità ottenuto tariffando **tutta la rete** (autostradale ed ordinaria) intorno ad un valore medio di 0,05 €/km per i leggeri, 0,20 €/km per i pesanti

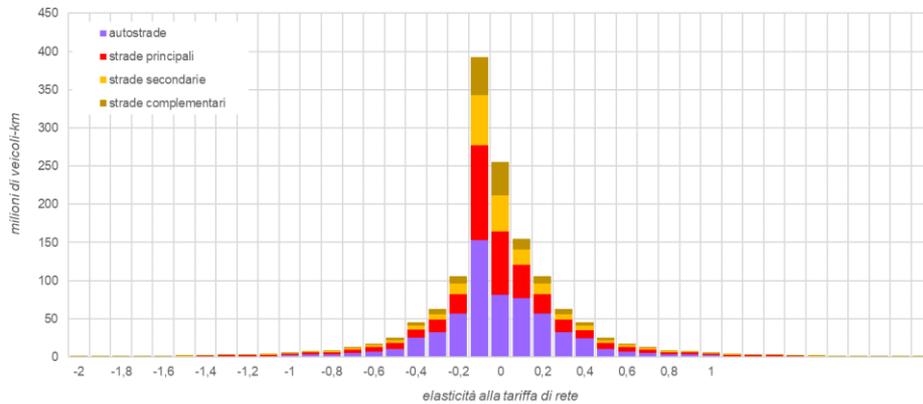
Elasticità della domanda stradale

Il calcolo dell'elasticità tariffaria del traffico leggero evidenzia fa emergere diversi **valori positivi** (cioè situazioni la tariffazione sull'intera rete fa crescere il flusso sul singolo arco):

- molte strade ordinarie favorite dalla **brevità degli itinerari**;
- alcuni itinerari autostradali favoriti dalla **tariffazione di itinerari ordinari sub-paralleli**



Volumi di traffico sulla rete stradale italiana per categoria di strada ed elasticità alla tariffa di rete (traffico leggero senza ripartizione modale)

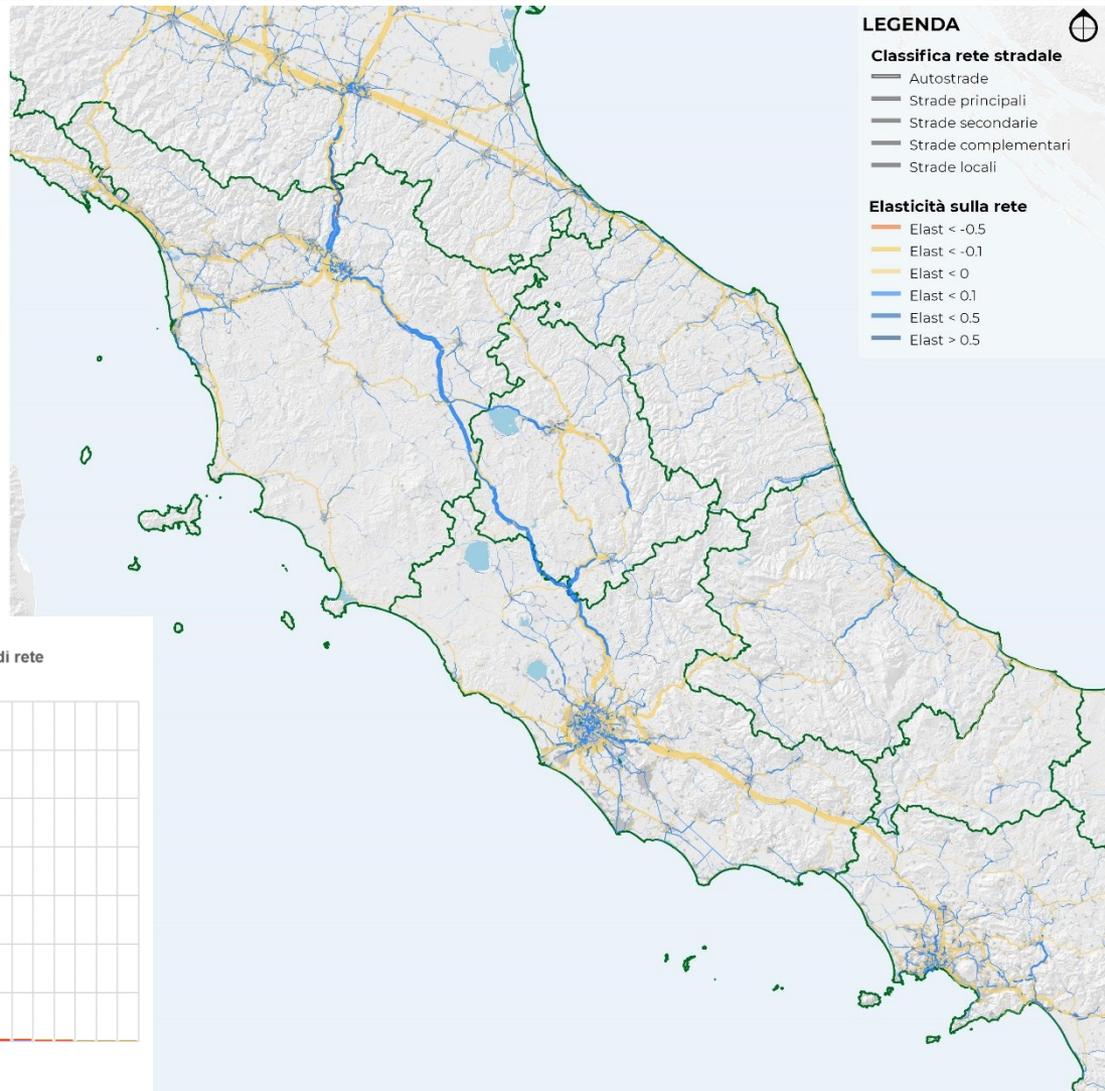


Elaborazioni META su modello i-TraM

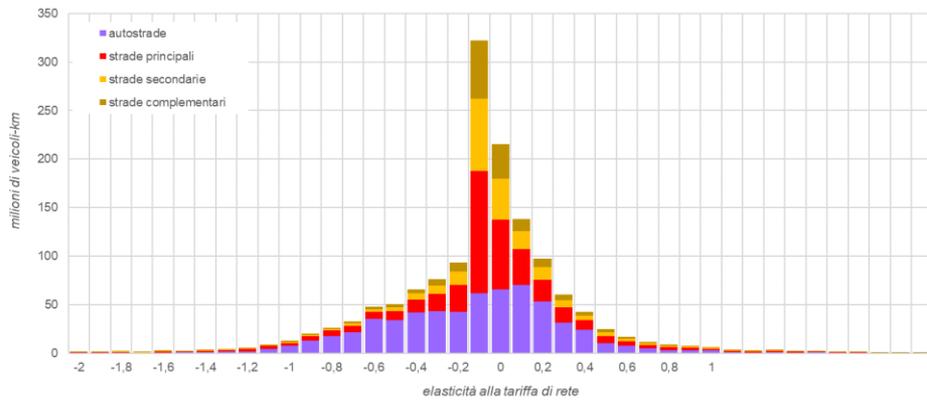
Elasticità della domanda stradale

In particolare si osserva il caso dell'**autostrada A1 Roma-Firenze**, influenzata dalla tariffazione dei due itinerari subparalleli della Tirrenica e della E45 Orte-Cesena.

Inoltre, in molti casi il **traffico pesante presenta valori in controtendenza** per l'effetto di decongestione associato alla tariffazione degli itinerari primari.



Volumi di traffico sulla rete stradale italiana per categoria di strada ed elasticità alla tariffa di rete (traffico leggero dopo ripartizione modale)



Elaborazioni META su modello i-TraM

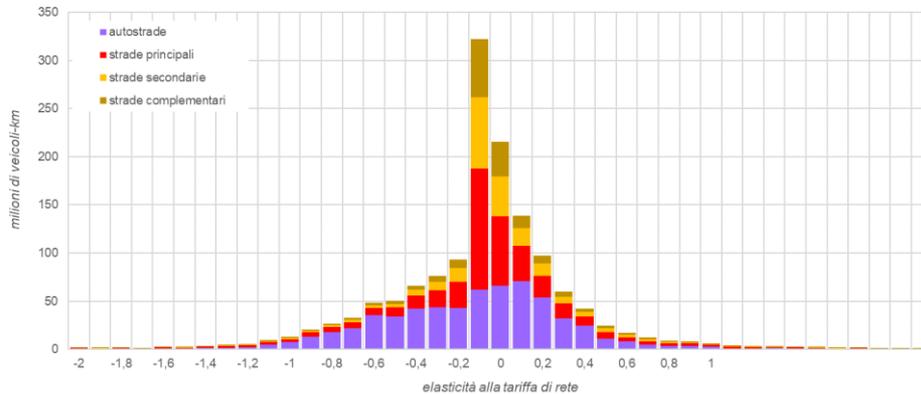
Elasticità della domanda stradale

Le cose cambiano ulteriormente se si tiene conto anche **dell'effetto di trasferimento modale**: ad esempio la A1 tra Firenze e Roma torna ad assumere valori negativi per la deviazione di domanda sulla parallela linea AV.

In altri termini, **la presenza del modo alternativo rende la domanda più elastica.**



Volumi di traffico sulla rete stradale italiana per categoria di strada ed elasticità alla tariffa di rete (traffico leggero dopo ripartizione modale)



Elaborazioni META su modello i-TraM

Verso una tariffazione efficiente

Schema tariffario

Il principio assunto alla base dello scenario è quello di **tariffare gli archi contemporaneamente:**

- congestionati ($LdS \geq D$)
- elastici ($e < 0$)

26% del traffico leggero

27% del traffico pesante

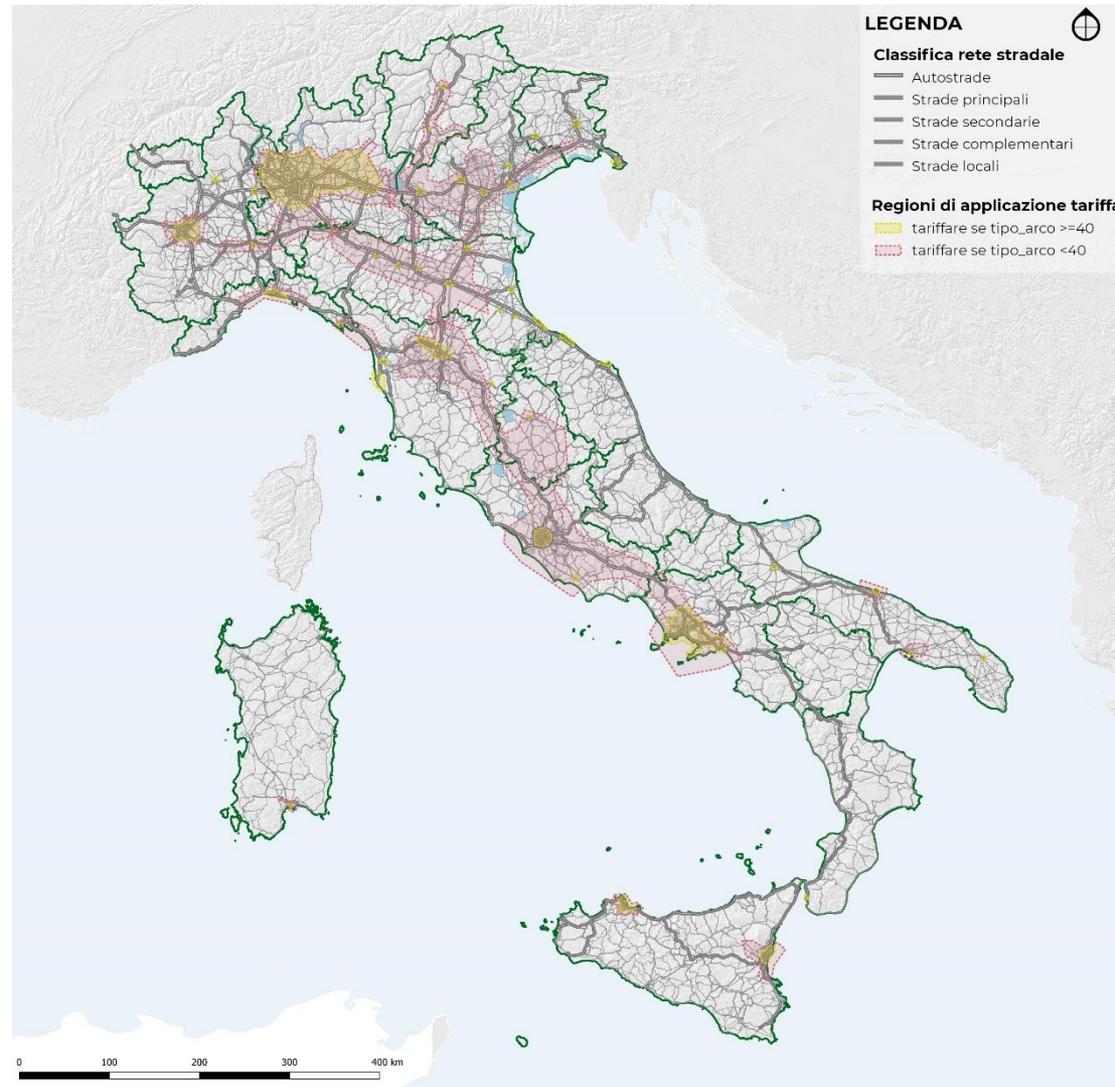
| VOLUME DI TRAFFICO PER ELASTICITA' E LIVELLO DI SERVIZIO | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|
| VEICOLI LEGGERI | | | | | | | |
| milioni di vkm/giorno | | | | | | | |
| Livello di servizio | | | | | | | |
| Elasticità | A | B | C | D | E | F | TOT |
| inferiore a -2,0 | 0,17 | 0,09 | 0,00 | | | | 0,26 |
| da -2,0 a -1,5 | 0,05 | 0,00 | | | | | 0,05 |
| da -1,5 a -1,0 | 0,13 | 0,06 | 0,02 | 0,04 | | 0,01 | 0,26 |
| da -1,0 a -0,9 | 0,10 | 0,02 | 0,02 | | | | 0,14 |
| da -0,9 a -0,8 | 0,16 | 0,00 | 0,02 | | | | 0,18 |
| da -0,8 a -0,7 | 0,16 | 0,03 | 0,01 | | | | 0,20 |
| da -0,7 a -0,6 | 0,24 | 0,03 | 0,01 | | 0,01 | | 0,28 |
| da -0,6 a -0,5 | 0,53 | 0,09 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,66 |
| da -0,5 a -0,4 | 0,76 | 0,17 | 0,11 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 1,15 |
| da -0,4 a -0,3 | 1,35 | 0,52 | 0,18 | 0,10 | 0,00 | 0,02 | 2,16 |
| da -0,3 a -0,2 | 3,97 | 1,83 | 1,00 | 0,31 | 0,11 | 0,11 | 7,33 |
| da -0,2 a -0,1 | 12,24 | 20,12 | 11,11 | 3,27 | 0,85 | 2,27 | 49,90 |
| da -0,1 a 0,0 | 109,07 | 111,60 | 165,99 | 119,57 | 38,10 | 123,77 | 668,10 |
| da 0,0 a +0,1 | 34,89 | 51,79 | 65,01 | 42,70 | 16,86 | 88,50 | 329,74 |
| da +0,1 a +0,2 | 6,79 | 4,35 | 3,96 | 1,78 | 0,56 | 1,67 | 19,11 |
| da +0,2 a +0,3 | 2,91 | 0,77 | 0,46 | 0,11 | 0,15 | 0,12 | 4,52 |
| da +0,3 a +0,4 | 1,42 | 0,28 | 0,23 | 0,06 | 0,02 | 0,05 | 2,05 |
| da +0,4 a +0,5 | 0,66 | 0,29 | 0,14 | 0,00 | | 0,00 | 1,09 |
| da +0,5 a +0,6 | 0,61 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | | | 0,66 |
| da +0,6 a + 0,7 | 0,30 | 0,02 | 0,01 | | | | 0,33 |
| da +0,7 a +0,8 | 0,36 | 0,03 | | | | | 0,38 |
| da +0,8 a +0,9 | 0,17 | 0,02 | | | | | 0,19 |
| da +0,9 a +1,0 | 0,06 | 0,01 | | | | | 0,07 |
| da +1,0 a +1,5 | 0,26 | 0,01 | 0,13 | | | | 0,40 |
| da +1,5 a +2,0 | 0,16 | 0,03 | | | | | 0,19 |
| superiore a +2,0 | 0,22 | | | | | | 0,22 |
| Totale | 207,70 | 192,18 | 248,47 | 168,00 | 56,69 | 216,58 | 1.089,63 |
| Tariffati | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 123,35 | 39,10 | 126,24 | 288,70 |
| % tariffati | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 73,4% | 69,0% | 58,3% | 26,5% |

Schema tariffario

Il principio assunto alla base dello scenario è quello di **tariffare gli archi contemporaneamente:**

- congestionati ($LdS \geq D$)
- elastici ($e < 0$)

Una volta identificati gli archi corrispondenti a questi criteri, si è operata una **omogeneizzazione a livello di rete** in modo da evitare effetti «slalom» tra archi adiacenti di caratteristiche immediatamente inferiori o superiori al limite di tariffazione.



Elaborazioni META su modello i-TraM

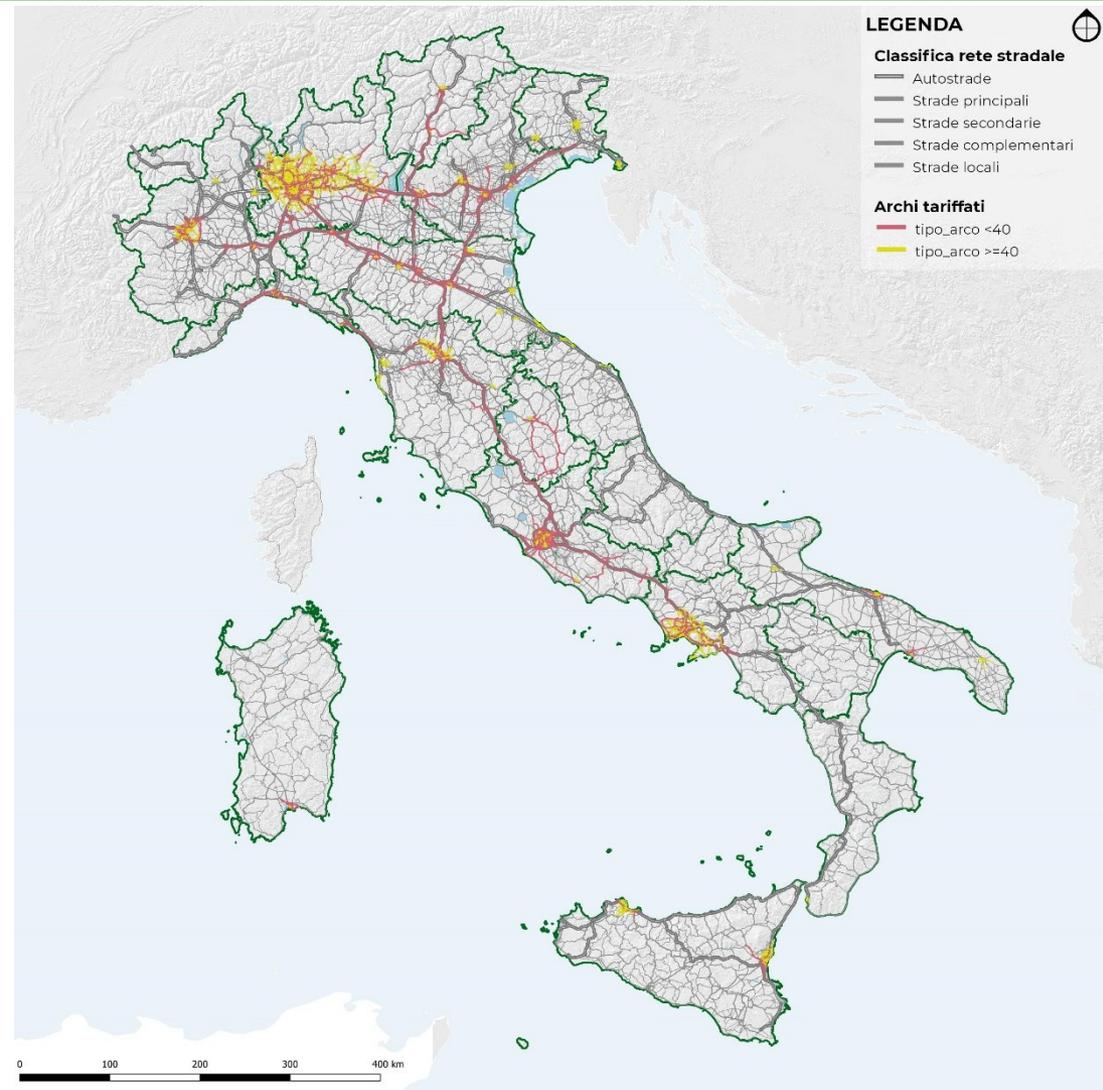
Schema tariffario

Si sono distinti **due casi**:

- rete ad accesso controllato** (autostrade e superstrade): si identificano tratte continue **ROSSO**
- rete ordinaria**: si pedaggiano intere aree **GIALLO**

Tutto il resto della rete non viene pedaggiata.

I livelli tariffari applicati, definiti in modo da eguagliare il monte pedaggi odierno, sono pari a:
0,04 €/km per i veicoli **leggeri**
0,16 €/km per i veicoli **pesanti**



Elaborazioni META su modello i-TraM

Trasferimento di domanda

Il trasferimento dal trasporto pubblico a quello privato di una quota molto inferiore si riduce a **circa 20.000 spost./giorno** (-0,1% della domanda su trasporto pubblico).

Il trasferimento continua a concentrarsi sugli spostamenti attratti dai principali centri urbani e generati lungo le principali direttrici di traffico interregionali, ma **emergono alcuni casi in controtendenza:**

- a Roma in genere
- a Nord di Milano
- a Nord di Napoli



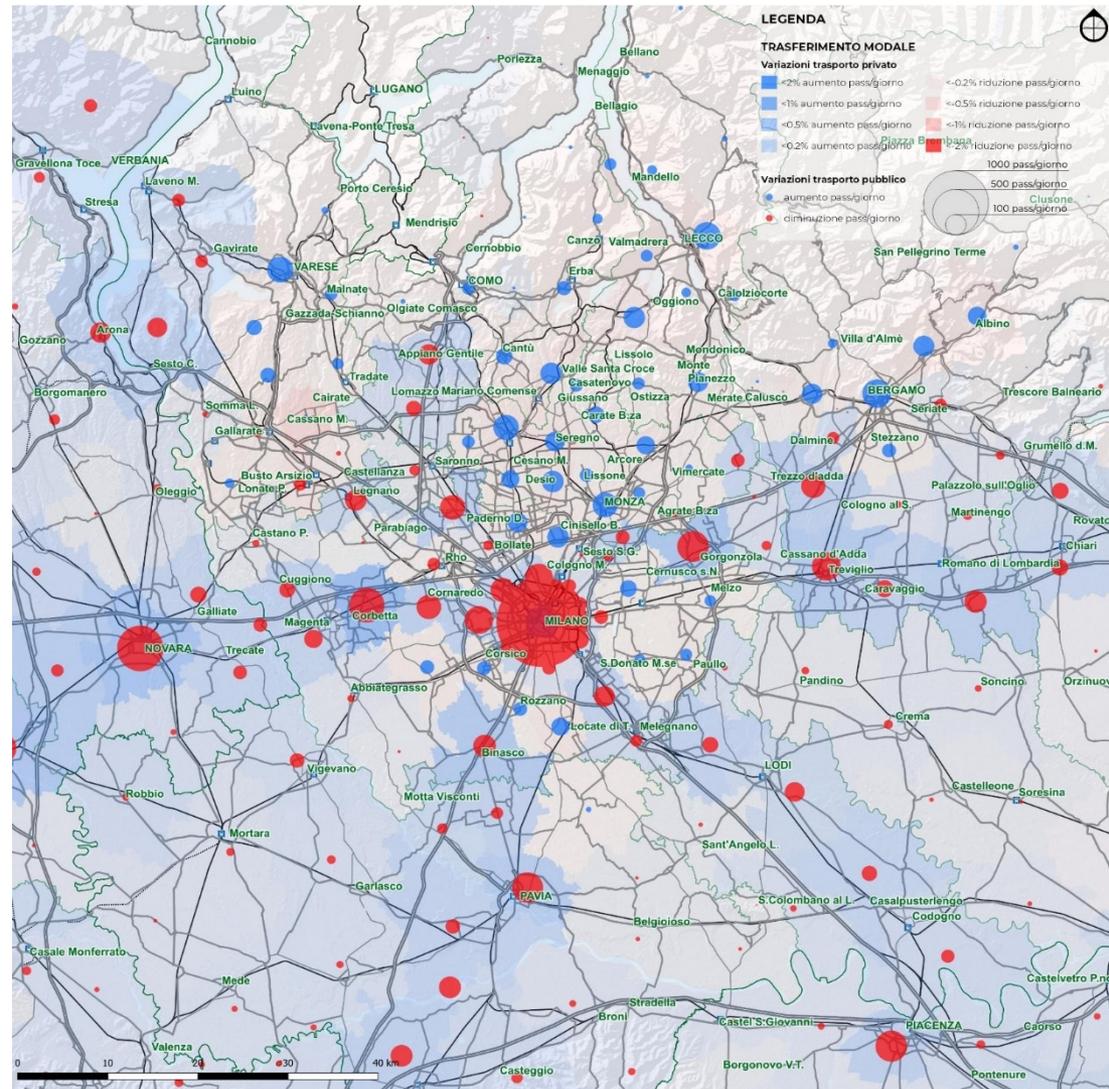
Elaborazioni META su modello i-TraM

Trasferimento di domanda

CASO DI MILANO

L'utilizzo del trasporto pubblico:

- decresce lungo i principali assi autostradali, a causa della diminuzione dei pedaggi medi
- cresce lungo le direttrici superstradali oggi non pedaggiate



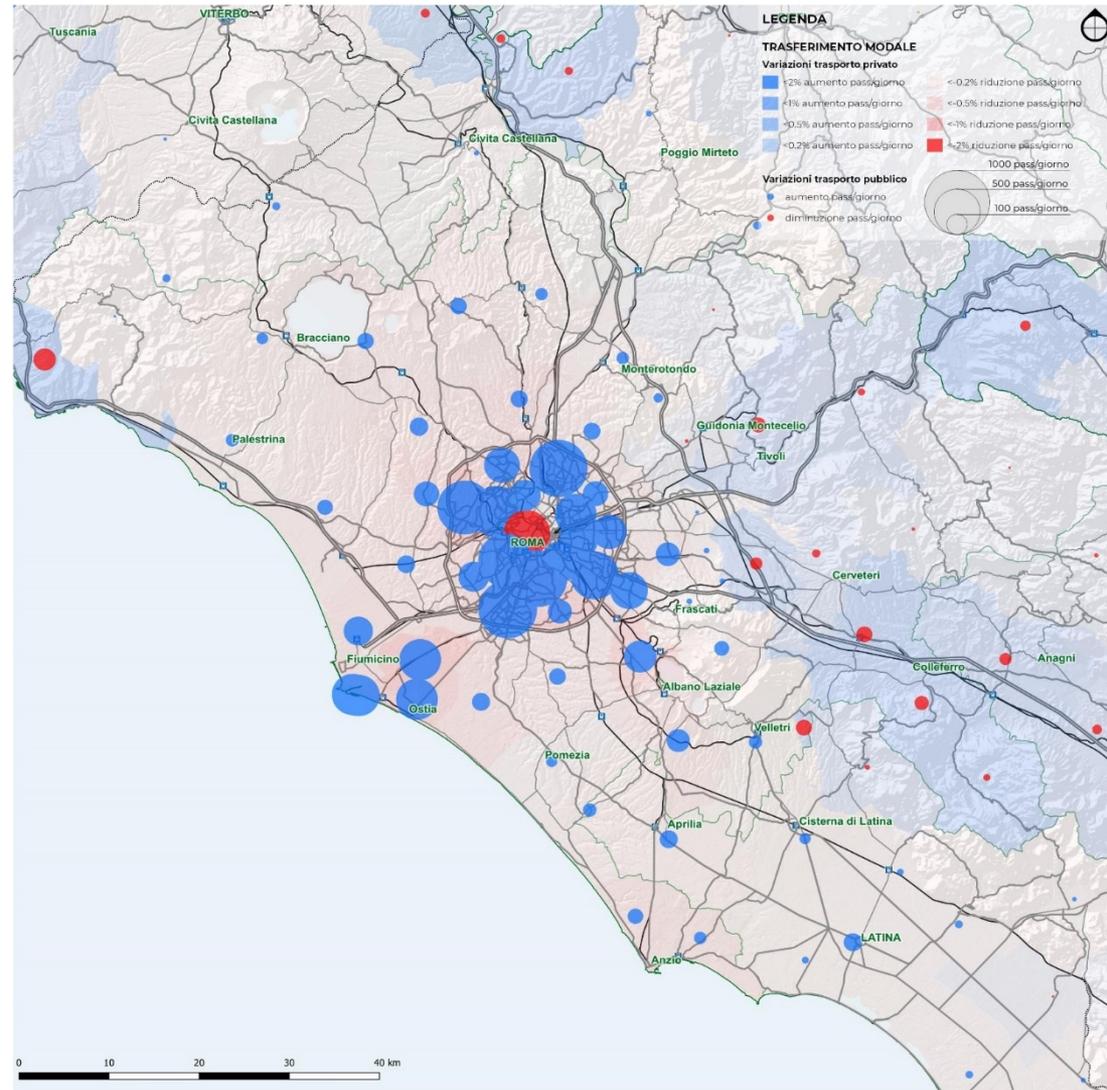
Elaborazioni META su modello i-Tram

Trasferimento di domanda

CASO DI ROMA

L'utilizzo del trasporto pubblico:

- cresce a causa del pedaggio urbano, in tutta la città...
- ... tranne che in centro, dove prevale l'effetto di decongestionamento della rete



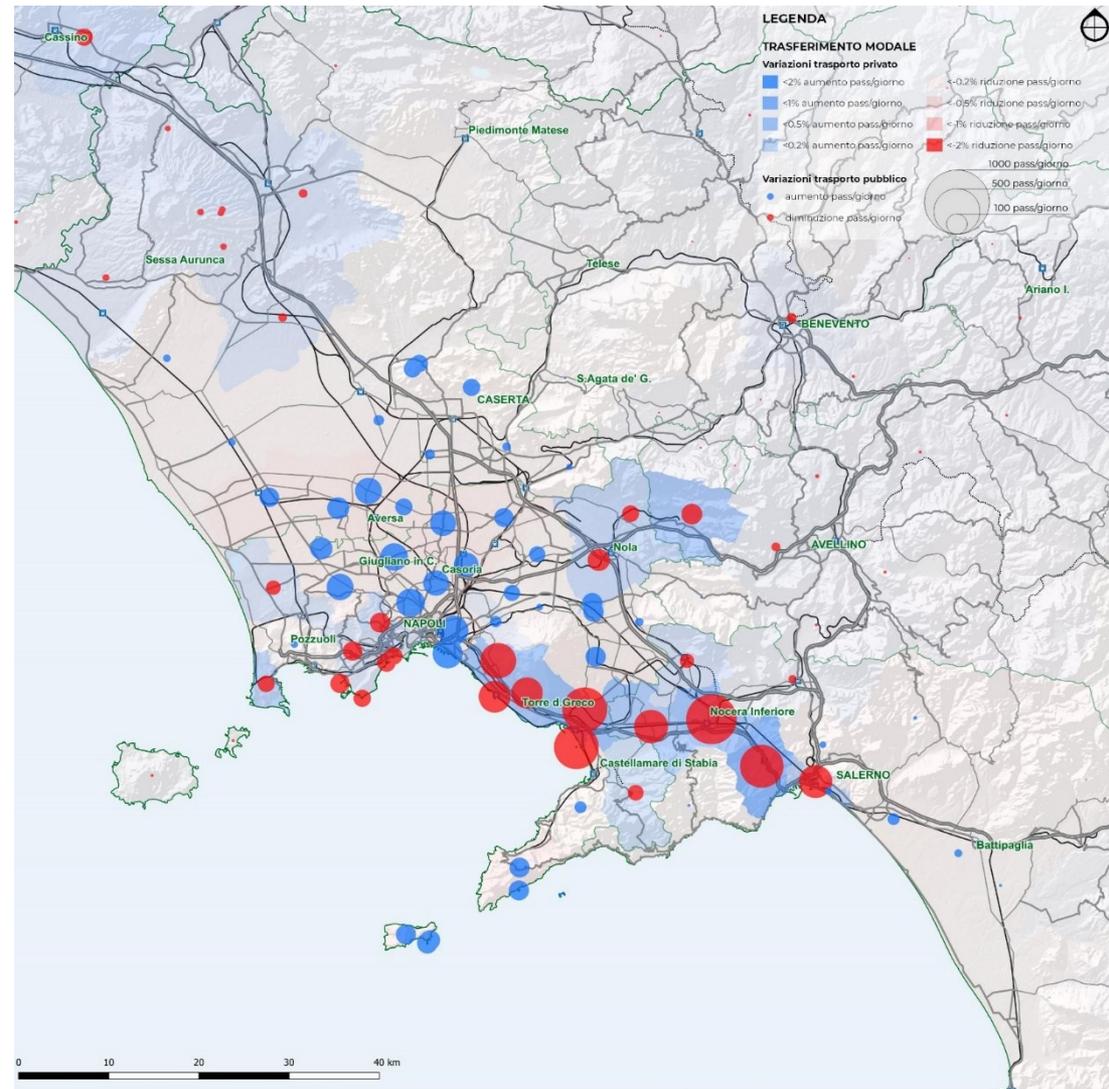
Elaborazioni META su modello i-TrAM

Trasferimento di domanda

CASO DI NAPOLI

L'utilizzo del trasporto pubblico:

- decresce sulla direttrice Est-Ovest (tangenziale ed autostrada a pagamento)
- cresce sulle direttrici Nord (pedaggiamento rete ordinaria)



Elaborazioni META su modello i-TraM

Variazione del traffico stradale

L'effetto simulato in termini di domanda evidenzia una redistribuzione ancora significativa:

TRAFFICO LEGGERO

Autostrade +20%

Strade ordinarie: -6%

- 1,1 Mvh/giorno

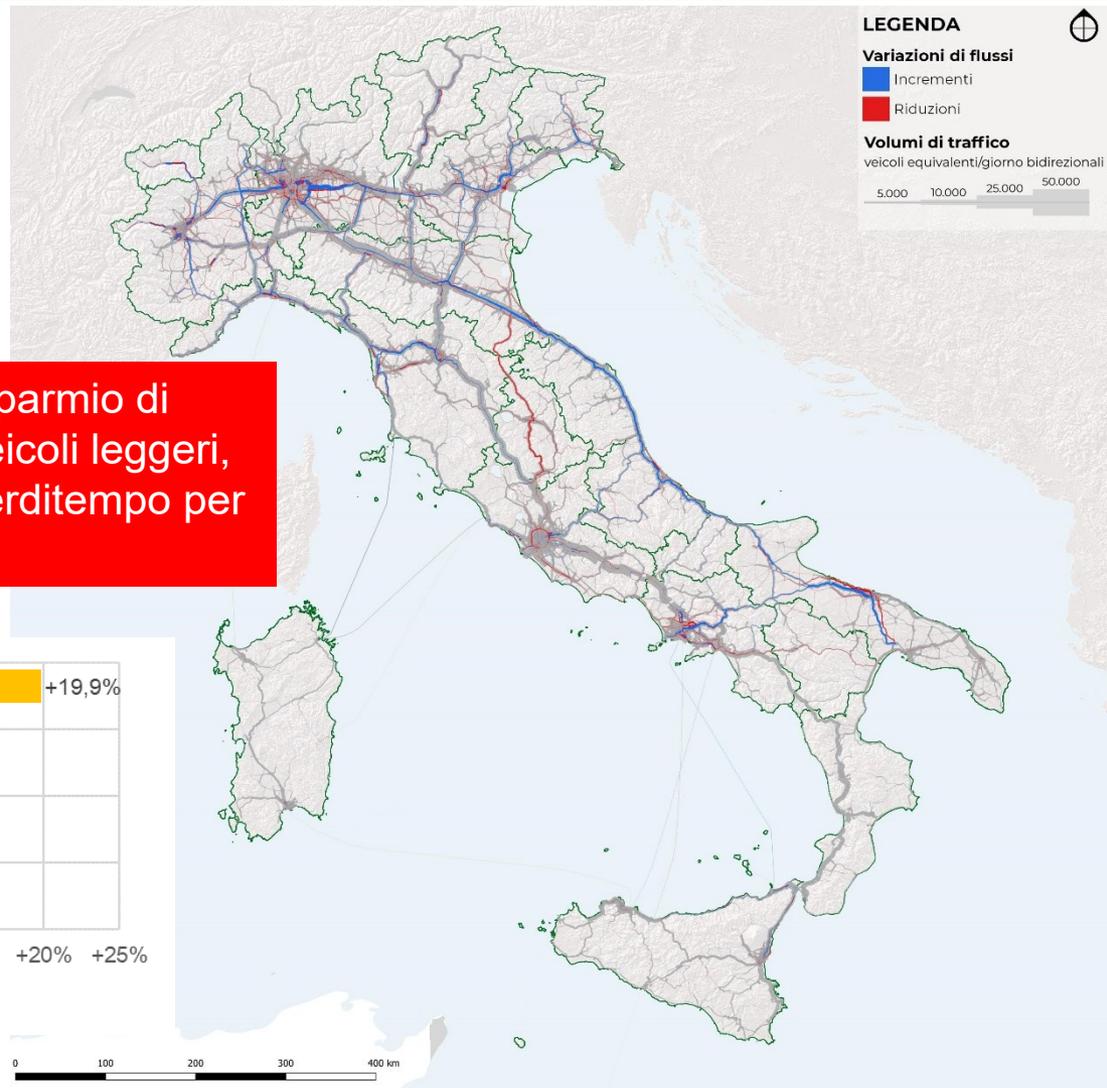
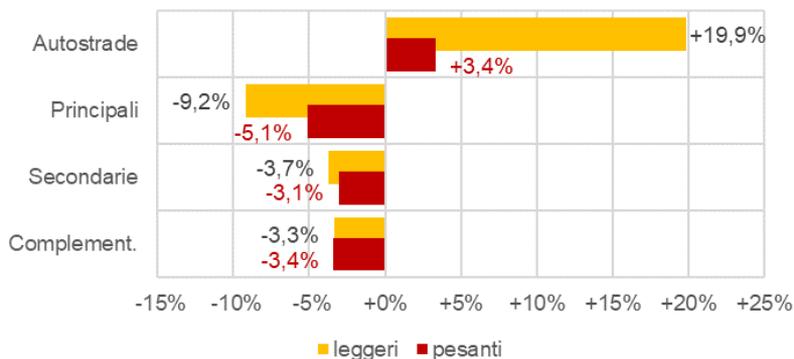
TRAFFICO PESANTE

Autostrade +2%

Strade ordinarie -3%

+ 0,0 Mvh/giorno

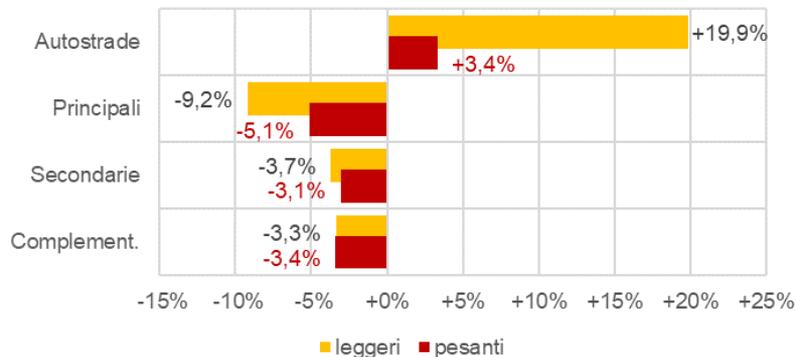
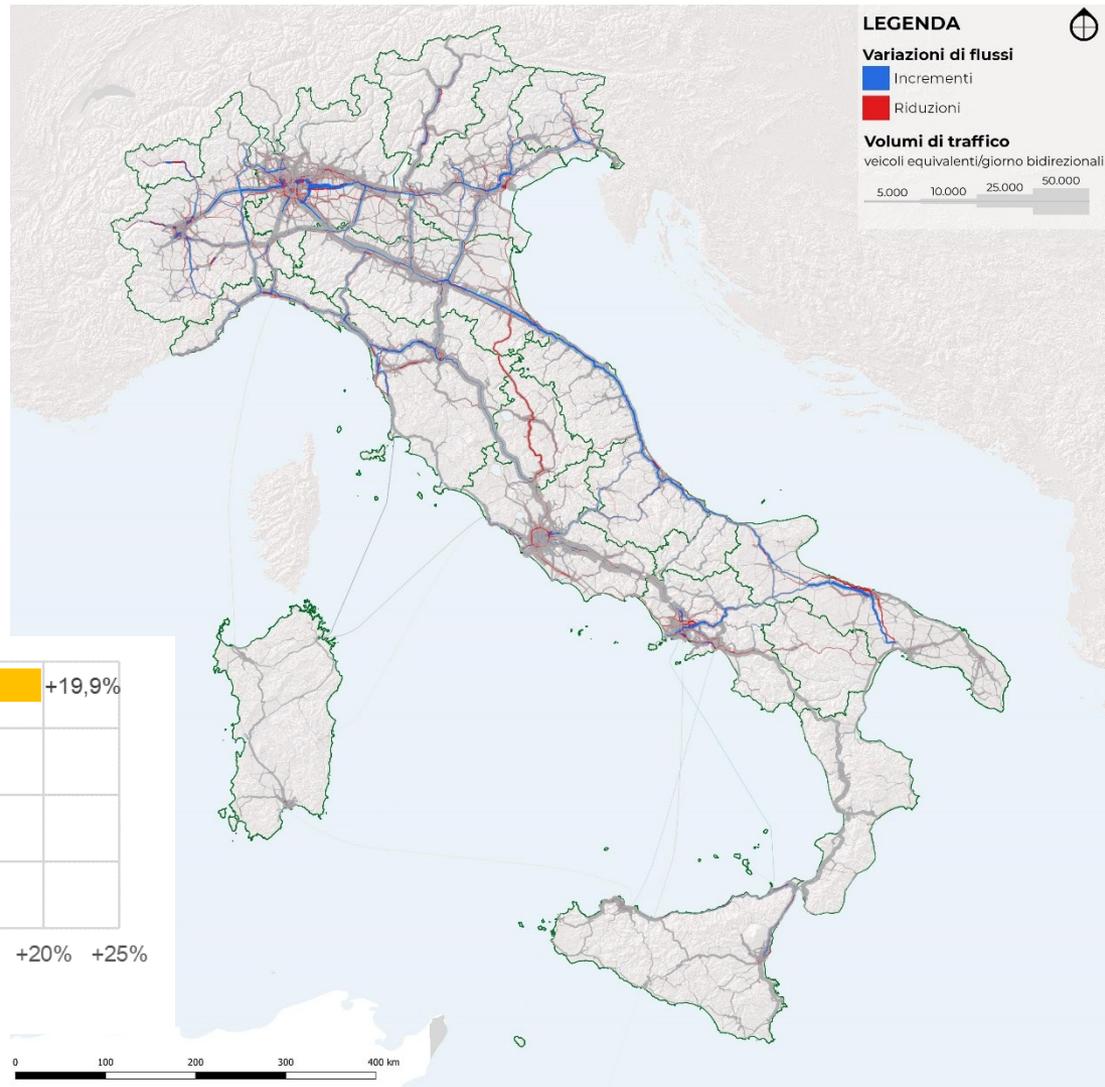
Aumenta il risparmio di tempo per i veicoli leggeri, si annulla il perditempo per quelli pesanti



Variazione del traffico stradale

Questo schema comporta la tariffazione di circa
470 Mvkm/giorno leggeri (43%)
60 Mvkm/giorno pesanti (49%)

Con ricavi tariffari pari a circa **8,9 mld €/anno**, in linea con il monte pedaggi odierno.



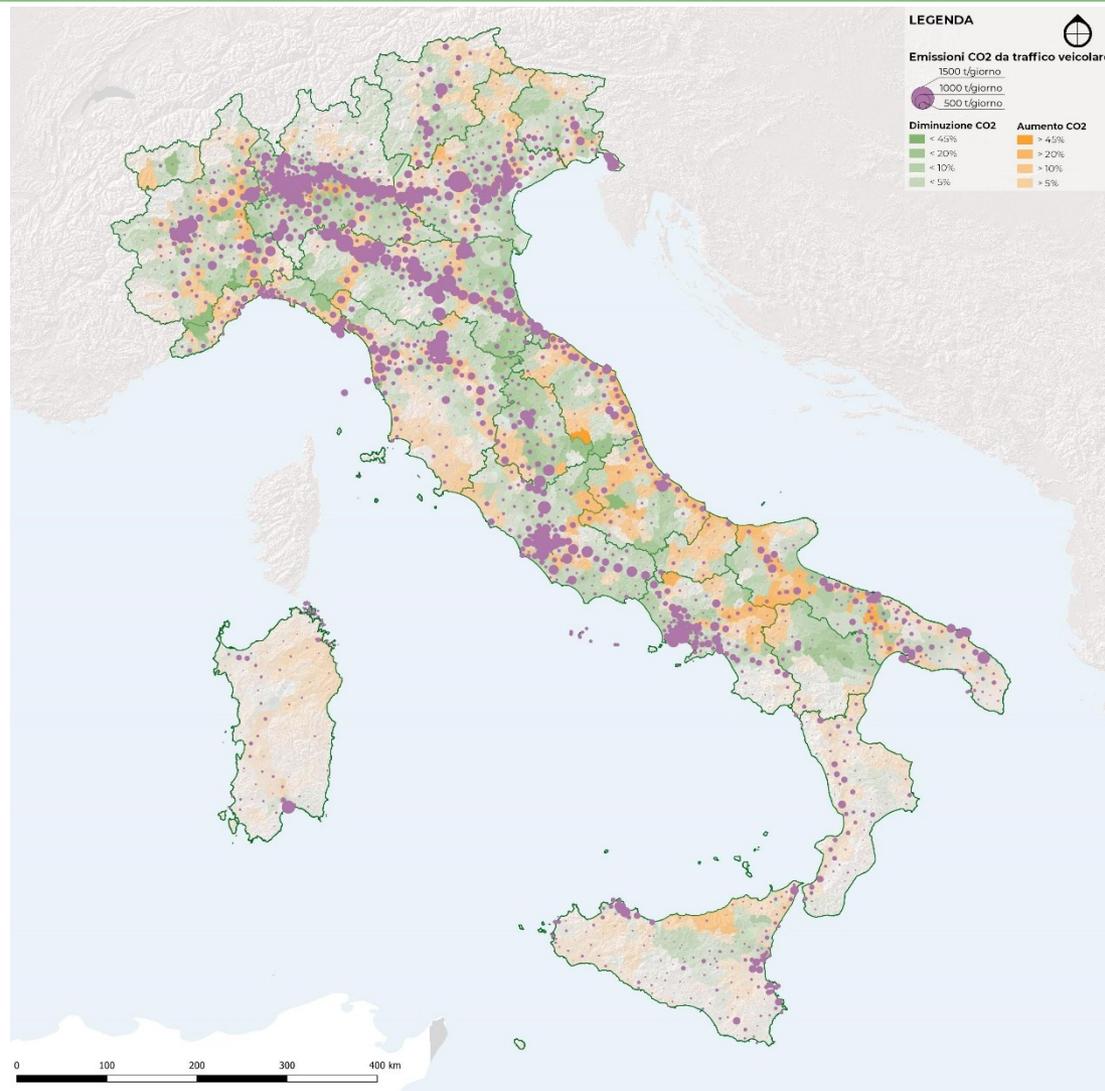
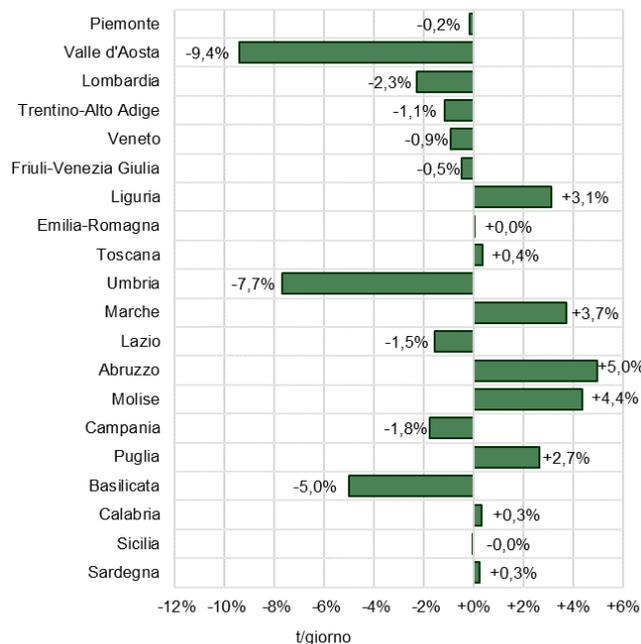
Effetti sul trasporto pubblico

L'assegnazione del trasporto pubblico evidenzia un effetto complessivamente più debole.



Impatti ambientali

In termini ambientali, si stima in questo caso una modesta **riduzione** (+0,2%) sia dei consumi energetici che delle emissioni di CO₂. Il valore è ancora la media di tendenze differenti.



Elaborazioni META su modello i-TraM

Conclusioni

Qualche osservazione finale

- Utilizzando il **modello i-TraM** è possibile di trattare il tema della tariffazione tenendo conto di **molti possibili effetti, sia mono- che multi-modali**.
- La **tariffazione a costi marginali** genera **risparmi di tempo per gli automobilisti** (ma non per i camionisti), nonché una **riduzione dell'utenza del trasporto pubblico a medio raggio**, e comporta anche un certo **incremento dell'impatto ambientale**.
- Invece, **rimodulando le tariffe in base a livelli di congestione ed elasticità**, secondo il criterio di Ramsey-Boiteux «inverso», è possibile ottenere un risultato caratterizzato da **maggiori risparmi di tempo per gli automobilisti a parità di condizioni per i camionisti e con limitata erosione dell'utenza del trasporto pubblico**, e leggeri **vantaggi in termini ambientali**.
- È chiaro comunque che **questo secondo scenario è a sua volta lungi dal raggiungere il massimo dell'efficienza in senso assoluto**; esso però sembra essere **più efficiente di quello ottenuto ipotizzando una tariffazione a costi marginali**.
- Ulteriori sviluppi sono possibili **variando i livelli tariffari per categoria di traffico e porzione di rete**, e/o studiando **l'interazione con le tariffe del trasporto pubblico**: tuttavia, la costruzione di procedure operative per la ricerca dell'ottimalità deve tener conto anche di **importanti problemi sul piano computazionale**.

Grazie per l'attenzione

andrea.debernardi@metaplanning.it

samuel.tolentino@metaplanning.it

francesca.trainamelega@metaplanning.it

