



VII EXPERT PANEL "Emissioni da trasporto su strada"

POLITECNICO DI MILANO
facoltà di ingegneria

L'analisi dell'incertezza delle emissioni da traffico: il caso dei veicoli commerciali in Lombardia

Cinzia Pastorello, Stefano Caserini, Michele Giugliano
Politecnico di Milano, DIIAR, Sez. Ambientale

Il traffico domina attualmente i problemi di inquinamento atmosferico dei grandi centri urbani.



	PM	NOx	CO
Combustioni per produzione energia	6,8%	12,4%	0,4%
Combustione non industriale	14,6%	6,5%	11,9%
Combustione nell'industria	8,1%	21,1%	5,4%
Processi produttivi	17,4%	1,3%	8,4%
Uso di solventi	1,2%	0,1%	0,0%
Trasporto su strada	41,3%	49,3%	66,1%
Altre sorgenti mobili e macchinari	5,8%	7,6%	0,6%
Trattamento e smaltimento rifiuti	0,2%	0,5%	0,0%
Agricoltura	4,6%	0,2%	1,5%
Altre sorgenti e assorbimenti	0,0%	0,8%	5,6%

Veicoli commerciali		
PM	NOx	CO
41,2%	44,5%	4,9%

Tratto dall' inventario della emissioni della Regione Lombardia

Obiettivi

- ◆ Stima delle emissioni di polveri, ossidi di azoto e monossido di carbonio da traffico commerciale in Lombardia.
- ◆ Identificazione del livello di incertezza della stima.
- ◆ Identificazione dei parametri che maggiormente influenzano l'incertezza della stima.
- ◆ Valutazione del contributo del carico dei veicoli alla stima delle emissioni.

L'approccio

Approccio deterministico →

assegna un unico valore numerico a tutti i parametri in ingresso



Risultato : valore puntuale

Approccio probabilistico →

traduce i parametri in distribuzioni di probabilità



Risultato: distribuzione di probabilità

Metodologia di stima delle emissioni da traffico

Base di dati di traffico della Regione Lombardia (1997)

- Numero di veicoli circolanti per ogni arco di strada nell'ora di punta per un totale di 20144 archi (11900 km).

Strade a scorrimento veloce:

Autostrade
Superstrade
Tangenziali

Strade extraurbane:

Statali Storiche
Statali secondarie
Provinciali

Metodologia di stima delle emissioni da traffico

◆ Base di dati di traffico della Regione Lombardia (1997)

- Distribuzioni temporali per ricavare il numero di veicoli nelle altre fasce orarie, giorni e stagioni.
- Curve di deflusso per calcolare la velocità media in relazione al numero di veicoli su ogni arco.
- Composizione parco circolante.

◆ **Metodo COPERT (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) per la stima dei fattori di emissione.**

Gli algoritmi di calcolo proposti per stimare i fattori di emissione (g/km) sono ricavati da misure sperimentali su classi di veicoli rappresentativi delle diverse tecnologie motoristiche.

I fattori di emissioni sono suddivisi per:

- inquinante,
- tipo di veicolo,
- in funzione della velocità media di un ciclo di guida.

Algoritmo di calcolo/1

$$E_{acaldo} = FE_{acaldo} * NV * L$$

Lunghezza arco (km)

Fattore di emissione (g/km/veicoli)

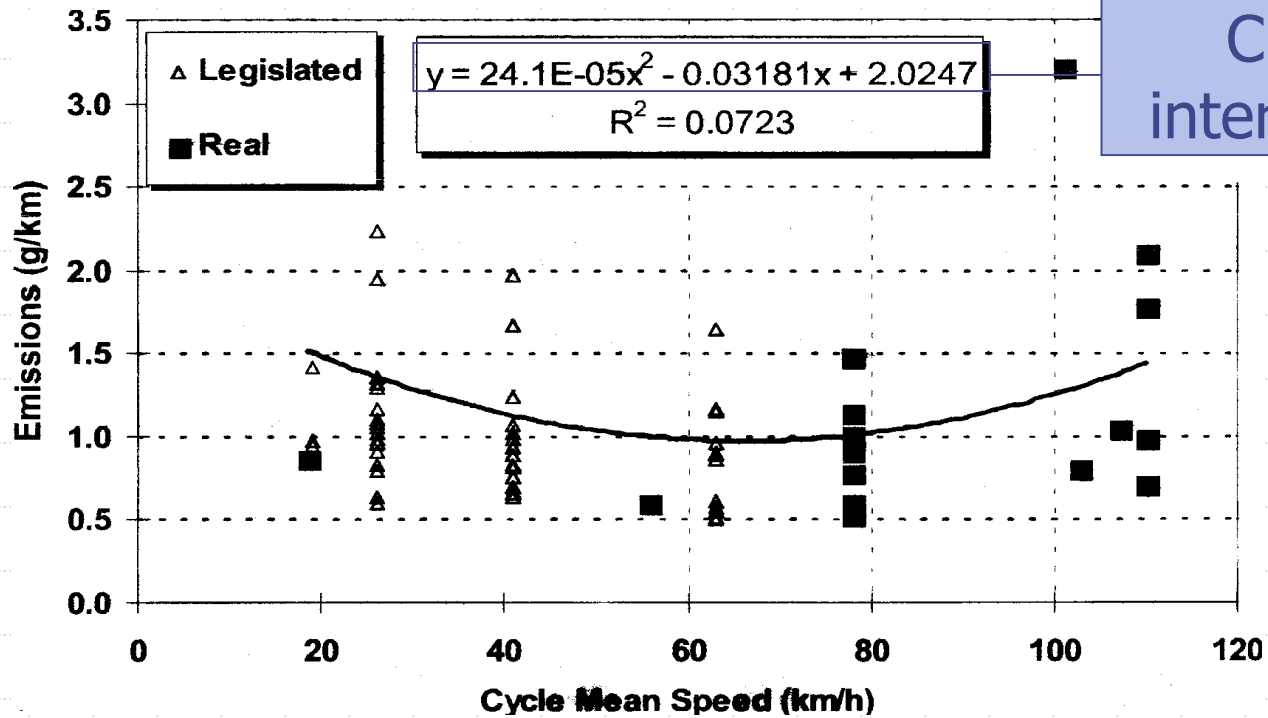
Numero veicoli(veicoli/h)

$$FE_{acaldo} = a + b * V + c * V^2 + d * V^e + f * \ln(V) + g * \exp(h * V)$$

Velocità media (km/h)

Coefficienti

Algoritmo di calcolo/2



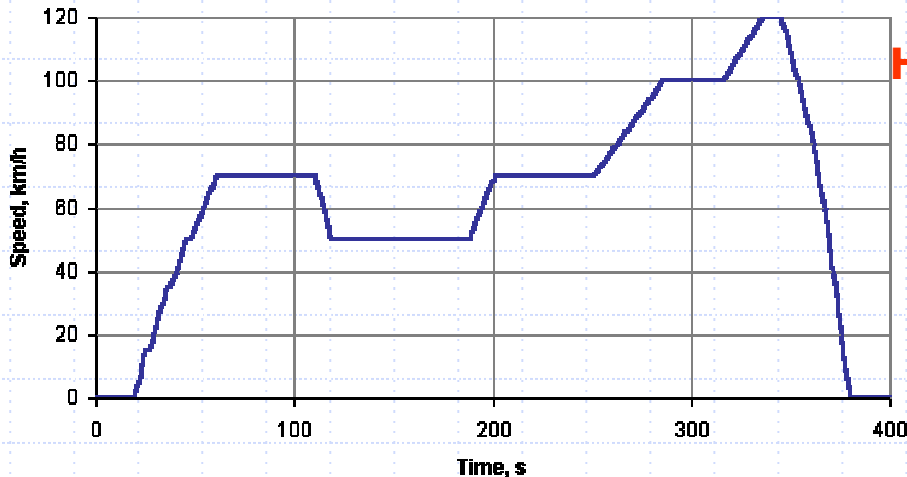
Esempio

Cicli di guida e classi di veicoli

CICLI DI GUIDA

Sono disponibili due tipologie di cicli:

- ◆ legislativi (ECE 15, EUDC e NEUDC);
- ◆ reali.



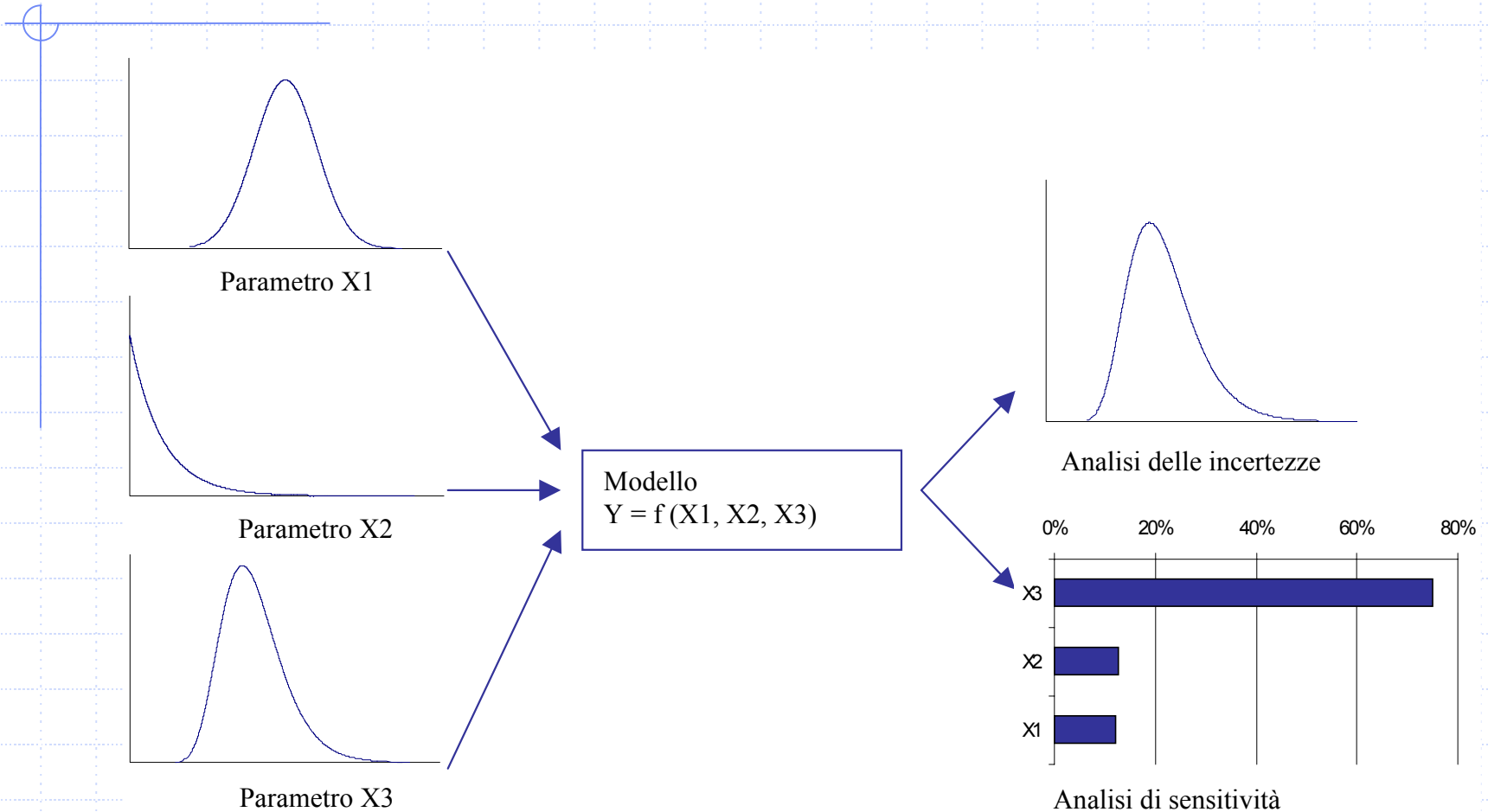
CLASSI DI VEICOLI

CODICE COPERT	CLASSIFICAZIONE	TIPO LEGISLATIVO
42	Benzina <3,5t	Conventional
43	Benzina <3,5t	93/59/EEC
45	Diesel <3,5t	Conventional
46	Diesel <3,5t	93/59/EEC
49	Diesel <7,5t	Conventional
50	Diesel <7,5t	91/542/EEC Stage I
51	Diesel <7,5t	91/542/EEC Stage II
52	Diesel 7,5 - 16t	Conventional
53	Diesel 7,5 - 16t	91/542/EEC Stage I
54	Diesel 7,5 - 16t	91/542/EEC Stage II
55	Diesel 16-32t	Conventional
56	Diesel 16-32t	91/542/EEC Stage I
57	Diesel 16-32t	91/542/EEC Stage II
58	Diesel >32t	Conventional
59	Diesel >32t	91/542/EEC Stage I

LDV

HDV

APPLICAZIONE DEL METODO PROBABILISTICO



APPLICAZIONE DEL METODO PROBABILISTICO

Sequenza delle operazioni

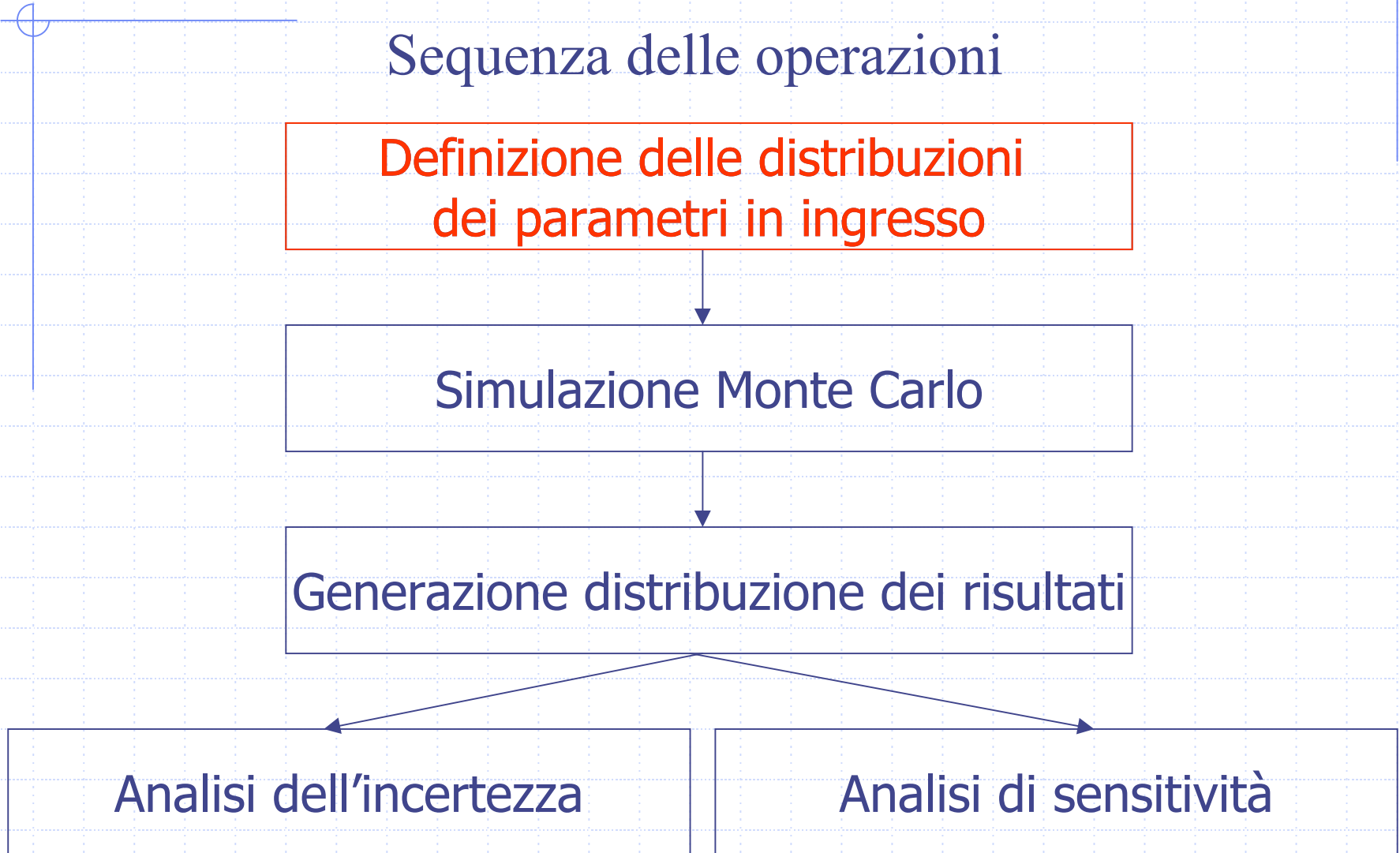
Definizione delle distribuzioni
dei parametri in ingresso

Simulazione Monte Carlo

Generazione distribuzione dei risultati

Analisi dell'incertezza

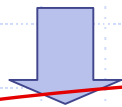
Analisi di sensitività



Le distribuzioni di probabilità sono una rappresentazione di variabilità e incertezza

Variabilità:

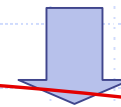
descrive l'eterogeneità spaziale o temporale di un parametro ed è una caratteristica del sistema considerato.



- ◆ Numero di veicoli
- ◆ Velocità

Incertezza:

descrive l'effetto sulla qualità del risultato della non completa informazione o conoscenza relativa ai parametri e dal grado di adeguatezza del metodo di valutazione utilizzato.



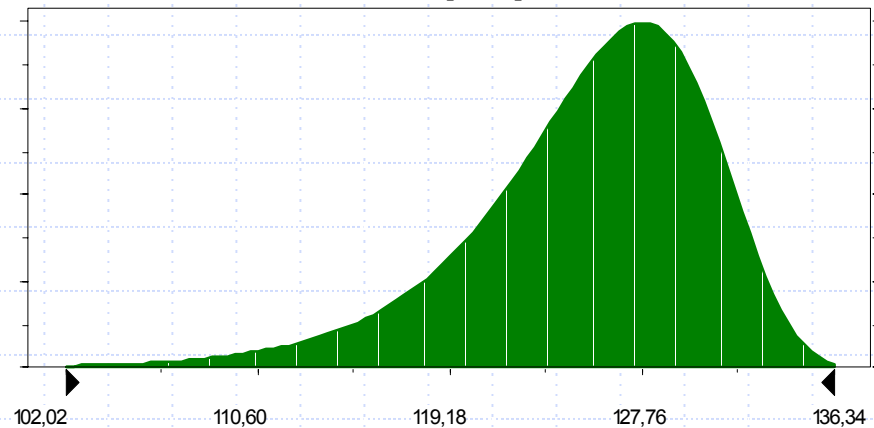
- ◆ Fattore di emissione
- ◆ Velocità
- ◆ Carico dei veicoli

Ad ogni parametro è stata associata una distribuzione di probabilità

Variabilità

Probability

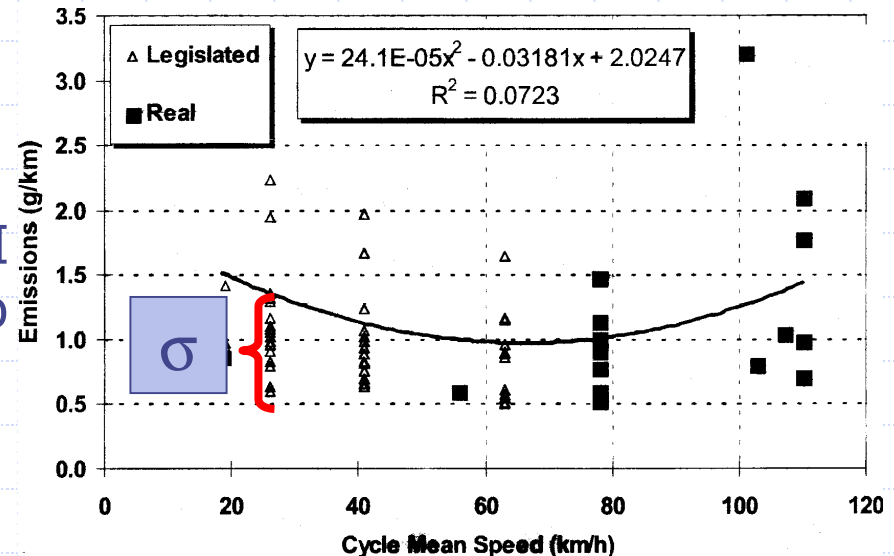
numero veicoli



Si sono applicati test statistici di adattamento per individuare la distribuzione che meglio si adatta alla serie di dati relativi al numero di veicoli e alle velocità medie per arco di strada.

Incertezza: distribuzione di probabilità fattore di emissione

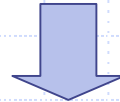
- ◆ L'equazione proposta dal COPERT per stimare i fattori di emissione è il risultato dell'interpolazione di punti ricavati da prove sperimentali. I risultati di tali prove sono molto dispersi (dev st. : 0.03 - 0.9).



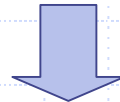
La distribuzione di probabilità del fattore di emissione è stata moltiplicata per una distribuzione con media pari a 1 e deviazione standard ricavate dalle deviazioni standard dei punti campionati.

Incertezza: distribuzione di probabilità delle velocità

I cicli di guida utilizzati dal metodo COPERT potrebbero essere diversi da quelli rappresentativi delle reali condizioni di guida.



Approccio probabilistico per quantificare l'effetto dei diversi cicli di guida sulle emissioni.



Si sono moltiplicate le velocità medie per una distribuzione di probabilità ottenuta applicando un test di adattamento alle velocità istantanee che caratterizzano un ciclo di guida standard (UDC o EUDC).

Incertezza: distribuzione di probabilità del carico

- ◆ Il COPERT calcola i fattori di emissione dei veicoli commerciali pesanti ipotizzando che siano carichi al 50%.
- ◆ Il COPERT propone la seguente formula per stimare l'effetto del carico dei veicoli, da moltiplicare per il fattore di emissione:

$$FE = FE_{(50\%)} * [1 + 2c_f * \frac{l_p - 50}{100}]$$

Coefficiente di
Correzione

Peso percentuale
effettivo del
veicolo

Per quantificare l'incertezza del carico si è attribuita a l_p una distribuzione di probabilità.

La media di l_p è crescente con il peso a pieno carico del veicolo, mentre la deviazione standard di l_p decresce con il peso.

APPLICAZIONE DEL METODO PROBABILISTICO

Sequenza delle operazioni

Definizione delle distribuzioni
dei parametri in ingresso

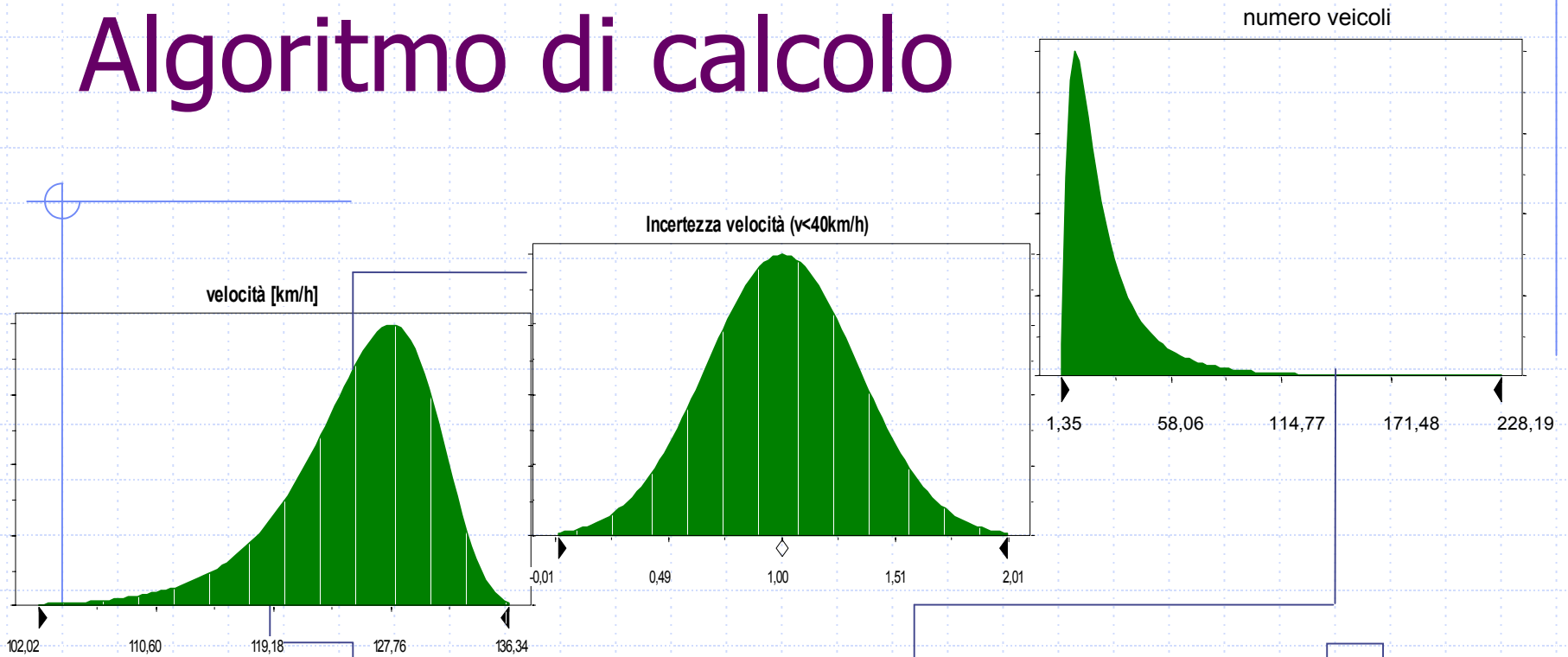
Simulazione Monte Carlo

Generazione distribuzione dei risultati

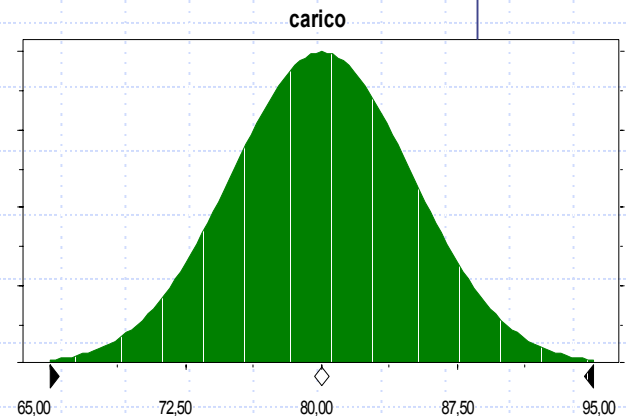
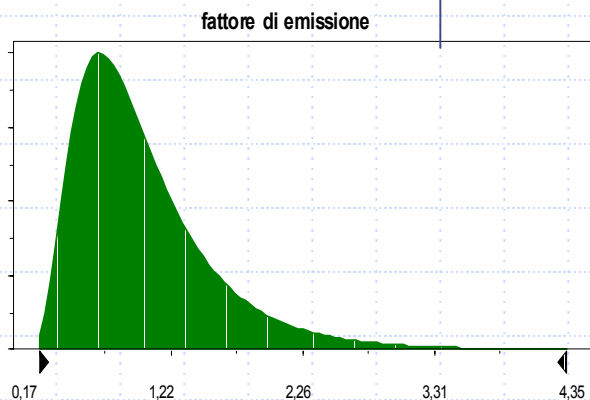
Analisi dell'incertezza

Analisi di sensitività

Algoritmo di calcolo



$$E = (a + b * V + c * V^2 + d * V^e) * NV * L * [1 + 2 * c_f * \frac{l_p - 50}{100}]$$



APPLICAZIONE DEL METODO PROBABILISTICO

Sequenza delle operazioni

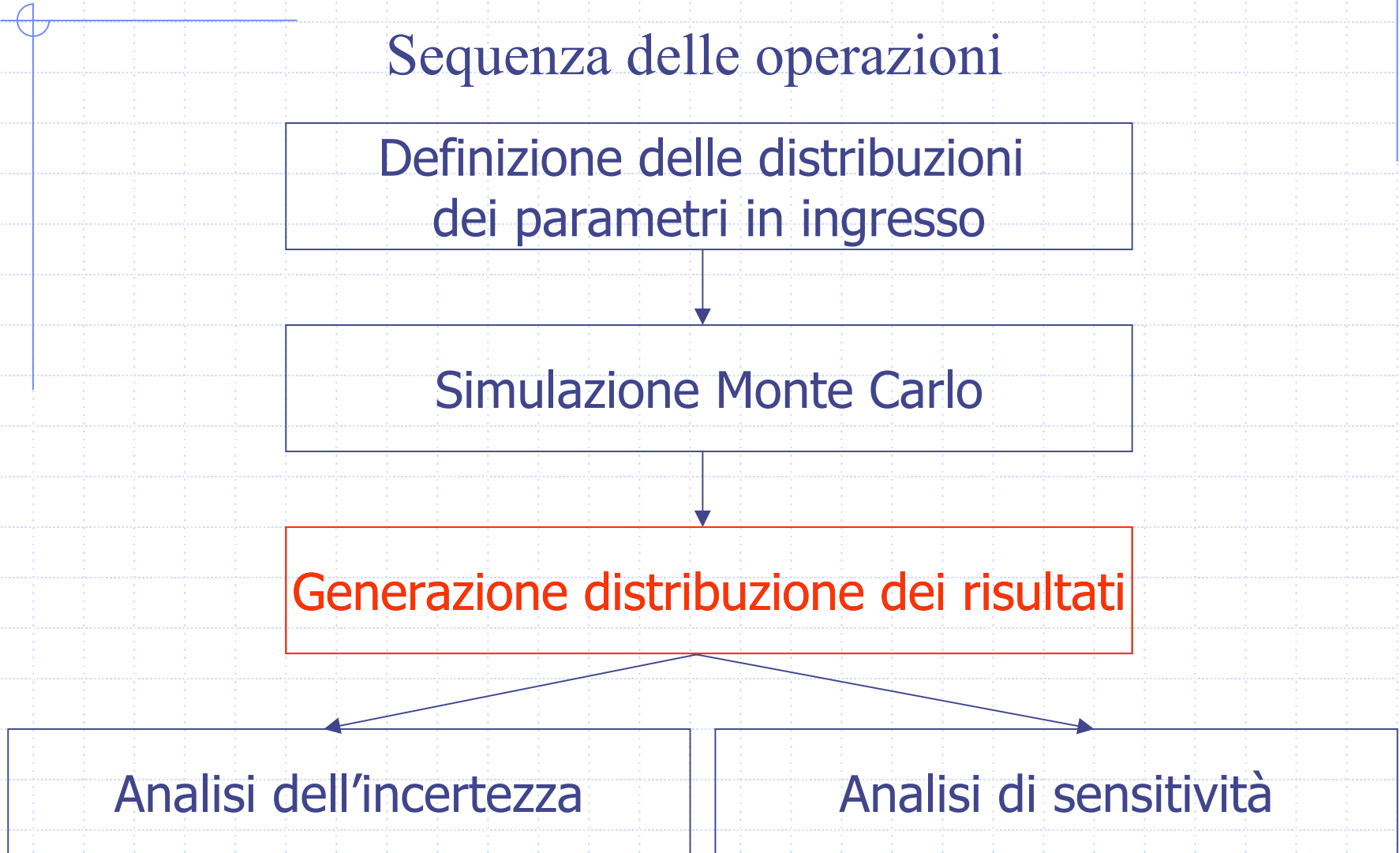
Definizione delle distribuzioni
dei parametri in ingresso

Simulazione Monte Carlo

Generazione distribuzione dei risultati

Analisi dell'incertezza

Analisi di sensitività



Il risultato finale, in quanto combinazione di distribuzioni, non è più un unico valore numerico, ma una popolazione di risultati a ciascuno dei quali è associato la probabilità di rappresentare il valore vero della valutazione.

Stima delle emissioni

Complessive
in Lombardia ($t a^{-1}$)

Non è considerata
la variabilità
del numero di veicoli

Su un generico arco
di strada ($kg km^{-1} a^{-1}$)

È considerata
la variabilità
del numero di veicoli

APPLICAZIONE DEL METODO PROBABILISTICO

Sequenza delle operazioni

Definizione delle distribuzioni
dei parametri in ingresso

Simulazione Monte Carlo

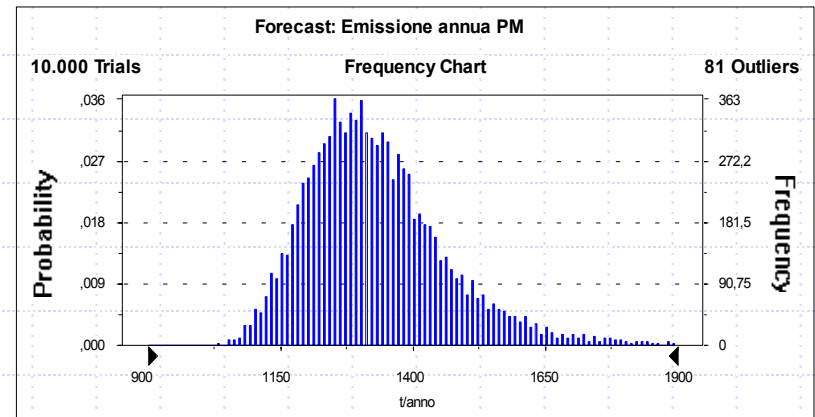
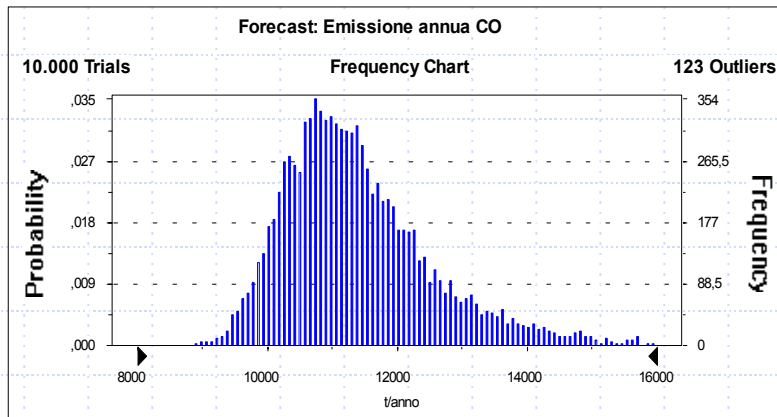
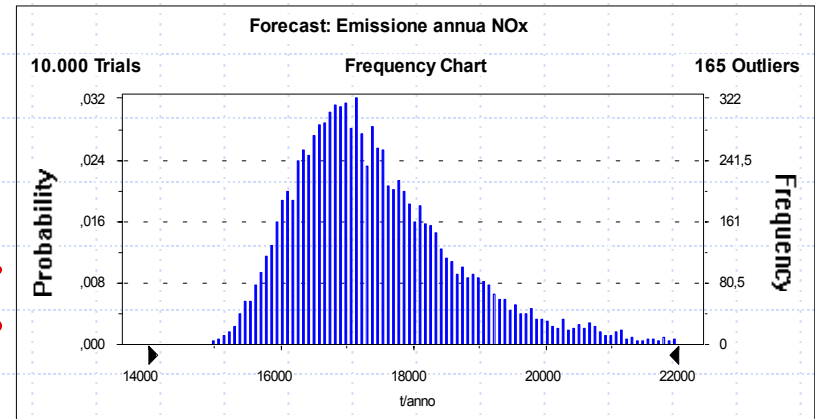
Generazione distribuzione dei risultati

Analisi dell'incertezza

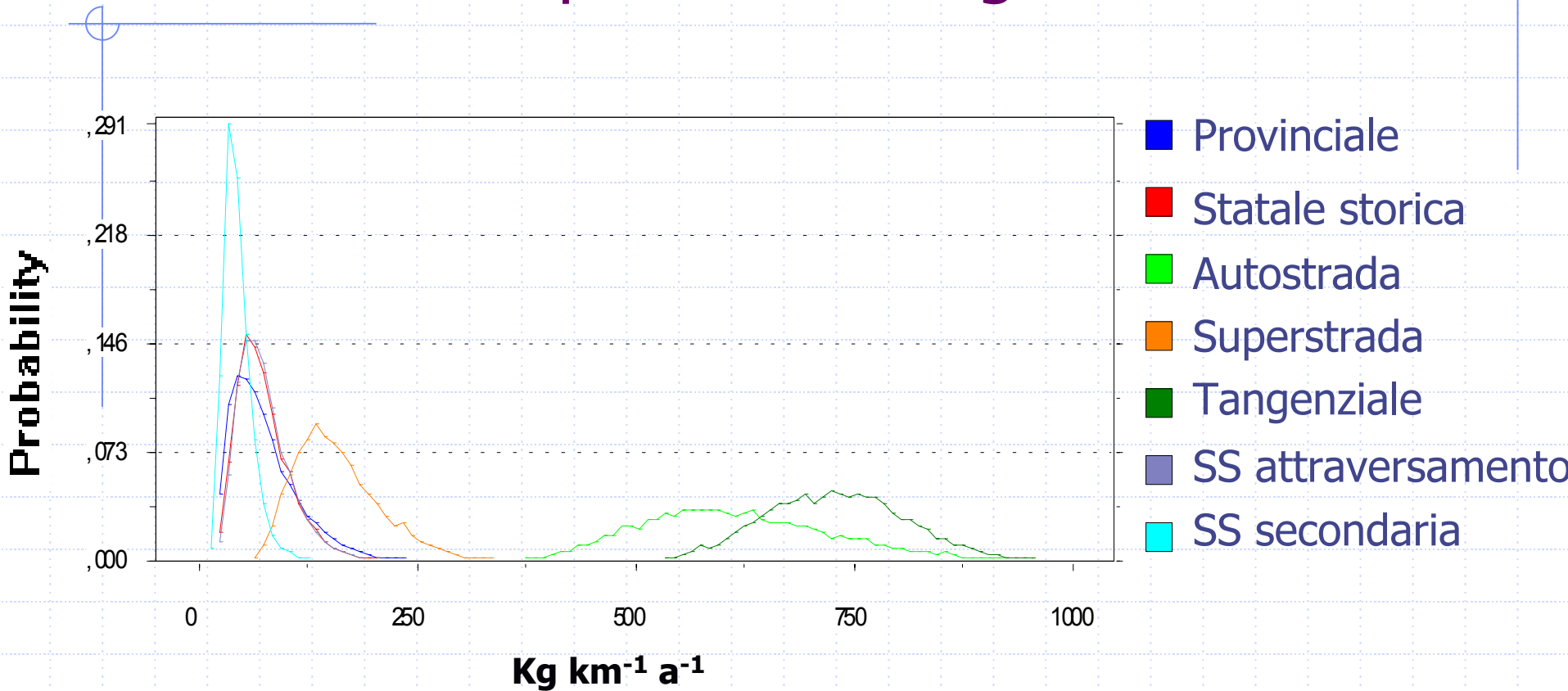
Analisi di sensitività

Distribuzioni di probabilità delle emissioni complessive

	NOx (t/a)	PM (t/a)	CO (t/a)
Mean	17560	1346	11489
Median	17247	1315	11222
Mode	---	---	---
Standard Deviation	1589	197	1440
Variance	2523686	38840	2073981
Skewness	3,66	11,34	4,33
Kurtosis	40,66	315,22	68,12
Coeff. of Variability	0,09	0,15	0,13
Range Minimum	14675	1000	8690
Range Maximum	48041	8928	48602
Range Width	33367	7928	39911
Mean Std. Error	15,89	1,97	14,4



Emissioni di polveri su un generico arco



Conclusioni dell'analisi delle incertezze

- ◆ Le emissioni di **polveri** sono le più condizionate dalle fonti di incertezza considerate.
- ◆ L'incertezza delle emissioni dei veicoli commerciali **leggeri** è maggiore di quella dei veicoli commerciali pesanti.
- ◆ L'incertezza delle emissioni sulle **strade extraurbane** è maggiore o uguale a quella delle emissioni sulle strade a scorrimento veloce.

APPLICAZIONE DEL METODO PROBABILISTICO

Sequenza delle operazioni

Definizione delle distribuzioni
dei parametri in ingresso

Simulazione Monte Carlo

Generazione distribuzione dei risultati

Analisi dell'incertezza

Analisi di sensitività

Analisi di sensitività

Scopo: valutare verso quali ingressi le uscite sono più sensibili.

Tipologia di analisi:

Curve Copert
monotone

Quantitativa, valuta il
coefficiente di
correlazione a ranghi

Curve Copert
non monotone

Qualitativa, confronta i
percentili delle
distribuzioni.

Risultati: sorta di classifica delle variabili in ingresso, in ordine decrescente rispetto all'influenza che hanno sulle uscite.

Analisi di sensitività quantitativa

Valuta i rapporti tra le variabili in ingresso e le uscite con il coefficiente di correlazione a ranghi (indice di Spearman):

$$r = 1 - 6 * \frac{\sum \Delta R^2}{n * (n^2 - 1)}$$

Coefficiente di correlazione a ranghi

Differenza di rango tra le coppie di variabili

Numero di coppie di variabili

- ◆ Il coefficiente di correlazione a ranghi varia tra -1 e 1.
- ◆ Maggiore è il valore assoluto, maggiore sarà il legame tra le variabili considerate.
- ◆ Dall'indice di Spearman si ricavano informazioni relative al contributo della variabilità e dell'incertezza di ogni parametro alla varianza del risultato, elevando al quadrato il valore di questo coefficiente e normalizzando il risultato rispetto a 100% .

Analisi di sensitività quantitativa

Valuta i rapporti tra le variabili in ingresso e le uscite con il coefficiente di correlazione a ranghi (indice di Spearman):

$$r = 1 - 6 * \frac{\sum \Delta R^2}{n * (n^2 - 1)}$$

Analisi di sensitività qualitativa

Valuta i rapporti tra ingressi e uscite confrontando i **percentili** delle distribuzioni di probabilità degli input con quelle degli output. Si fanno variare i parametri di input all'interno del loro intervallo di definizione, uno per volta, tenendo gli altri costanti al valore medio.

Vantaggio: valuta correttamente la sensitività anche in presenza di relazioni **non monotone**.

Livelli dell'analisi di sensitività

Distribuzioni di probabilità (per ciascun veicolo Copert e per tipologia di strada)

Simulazione Monte Carlo
(per veicolo e tipologia di strada)

Simulazione Monte Carlo
e somma delle emissioni
dei veicoli per tipologia
di strada

Simulazione Monte Carlo
e somma complessiva
delle emissioni

Stima delle
emissioni
per veicolo
COPERT

Analisi di
sensitività
per veicolo
COPERT

Stima delle
emissioni
per
tipologia di
strada

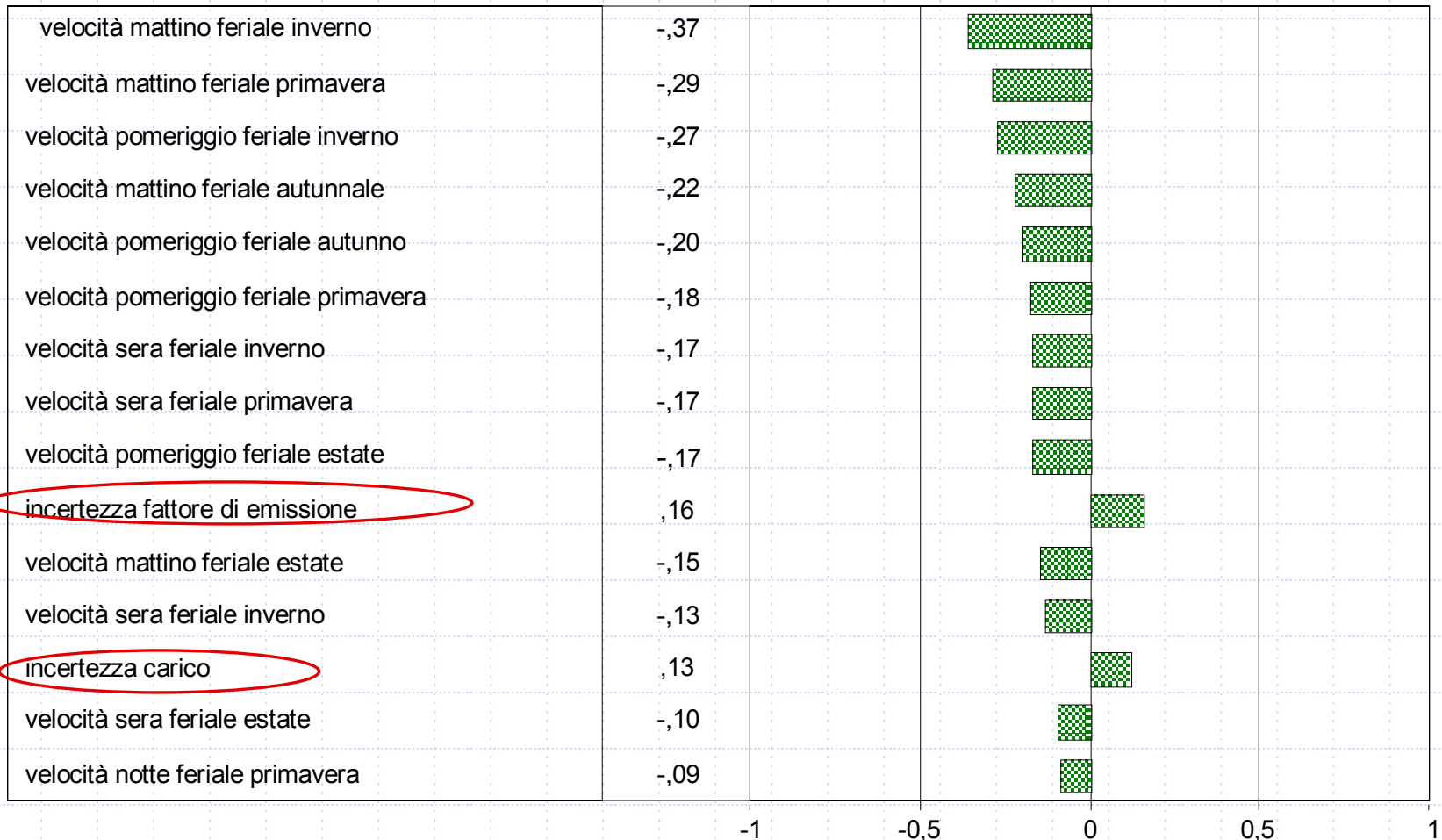
Analisi di
sensitività
per
tipologia di
strada

Stima delle
emissioni
regionali

Analisi di
sensitività
sull'intero
grafo
stradale

Analisi di sensitività delle emissioni di PM per veicolo e tipo di strada: HDV

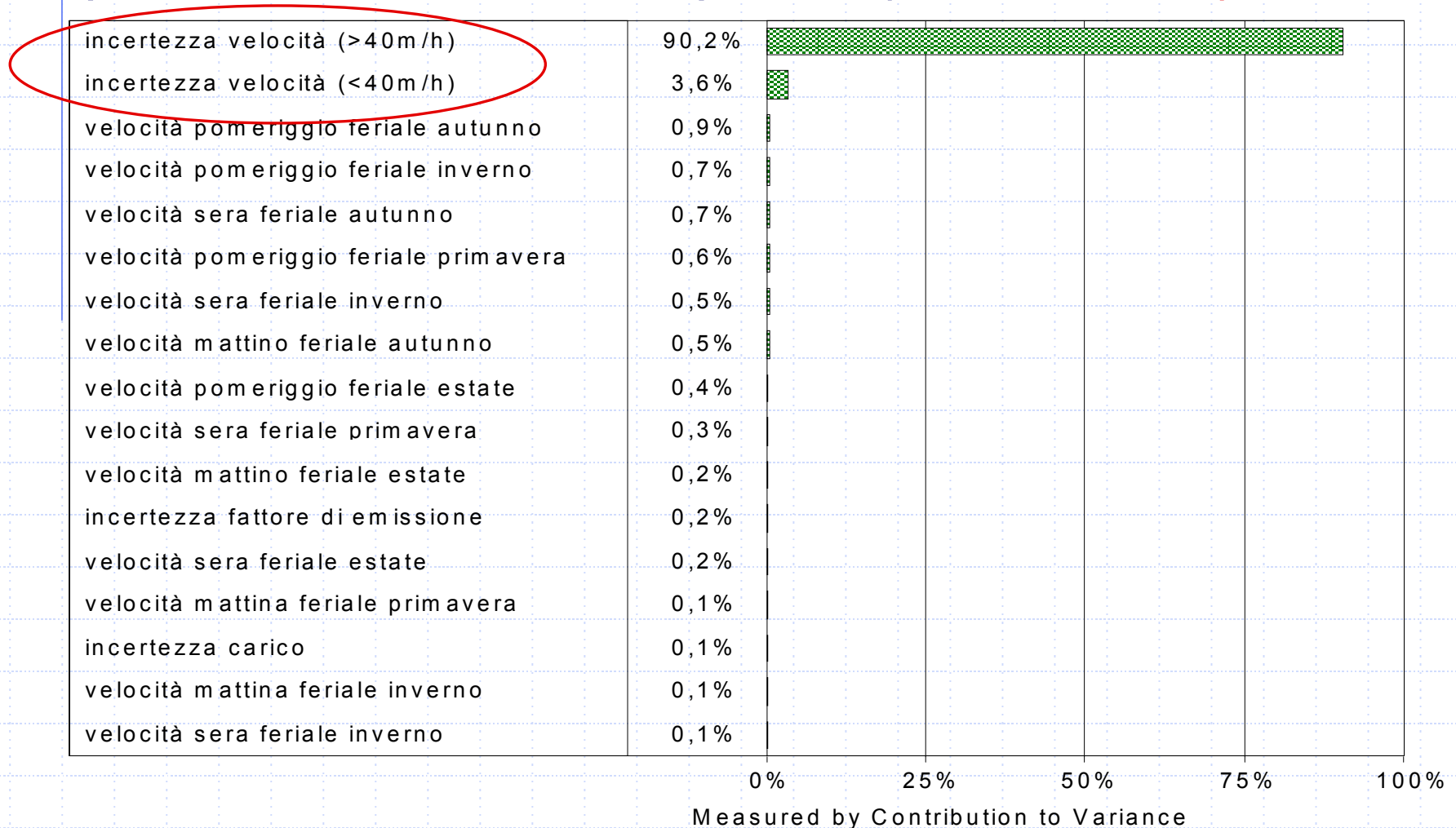
Analisi di sensitività delle emissioni di polveri per veicolo Copert 55 (conventional con peso a pieno carico 7,5-12t) sulle **superstrade** e sulle provinciali.



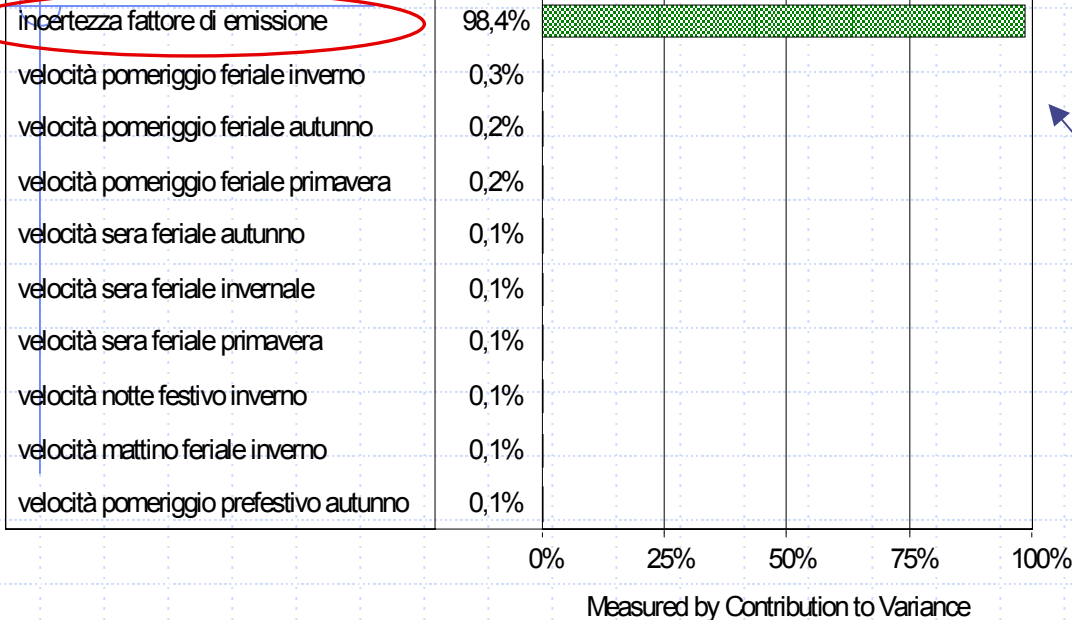
Measured by Rank Correlation

Analisi di sensitività delle emissioni di PM per veicolo e tipo di strada: HDV

Analisi di sensitività delle emissioni di polveri per veicolo Copert 55 (conventional con peso a pieno carico 7,5-12t) sulle superstrade e sulle **provinciali**.

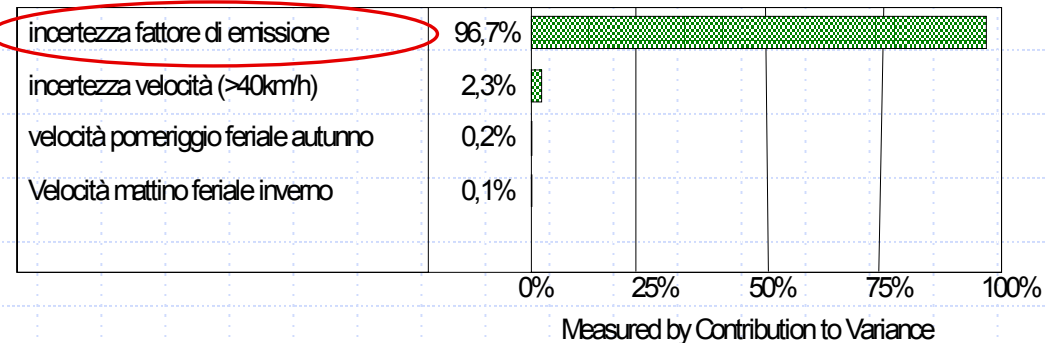


Analisi di sensitività delle emissioni di PM per veicolo e tipo di strada: LDV



Analisi di sensitività delle emissioni di polveri per veicolo Copert 45 (conventional diesel) sulle

autostrade
strade statali.



Analisi di sensitività delle emissioni di PM per tipologia di strada (in termini di contributi alla varianza)

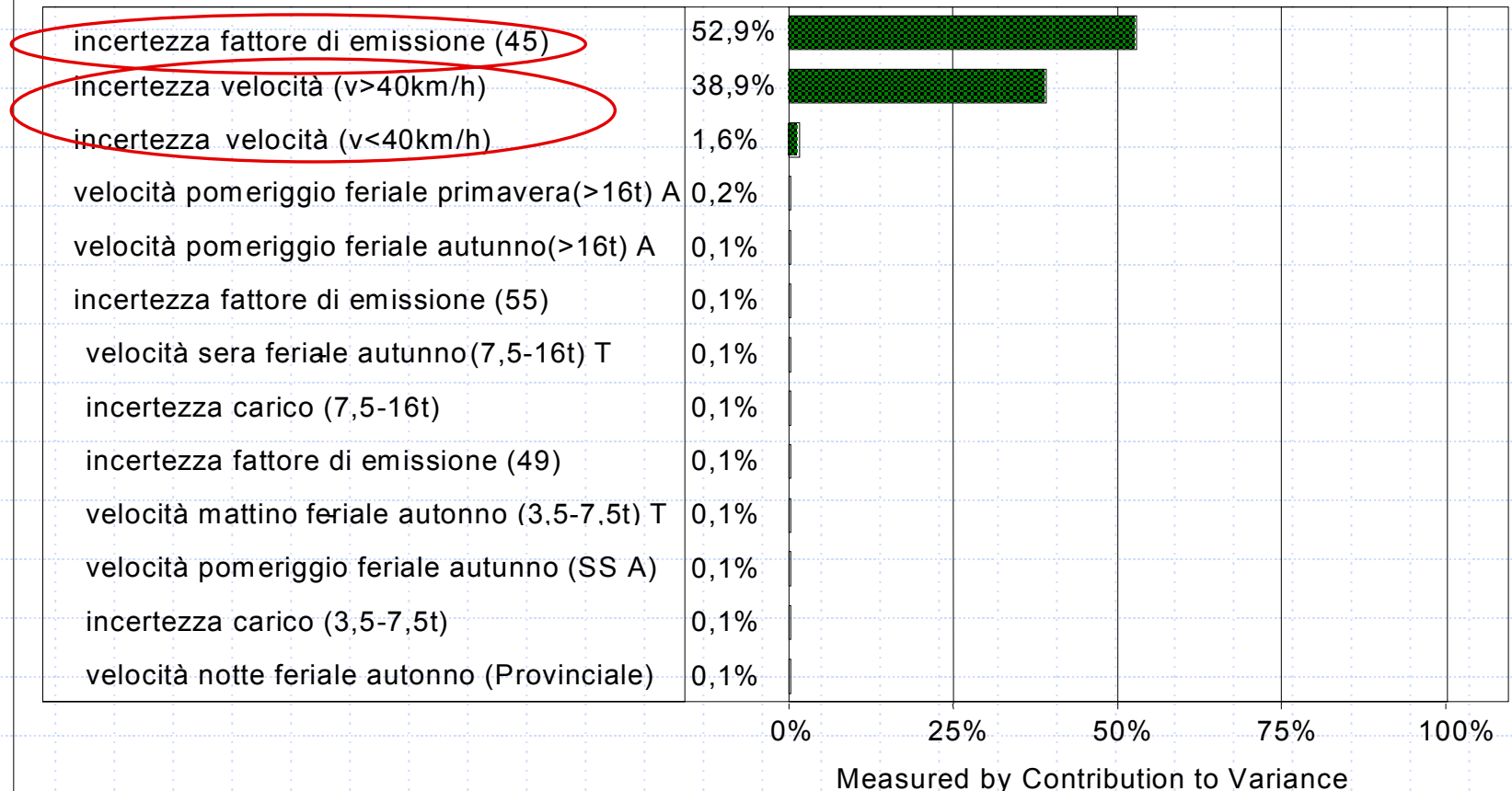
Fonti di incertezza e variabilità		Autostrada	Superstrada	Tangenziale	Statale Storica	Statale Secondaria	Provinciale	SS Attraversamento
variabilità velocità		9,70%	12,80%	24,30%	3,20%	2,30%	5,00%	7,80%
incertezza velocità		-	-	-	74,40%	92,00%	72,30%	78,80%
incertezza fattore di emissione	LDV	90,10%	86,10%	74,40%	22,10%	5,30%	22,50%	13,40%
	HDV	0,10%	0,40%	0,30%	0,20%	<0,1%	0,10%	<0,1%
	Totale	90,20%	86,50%	74,70%	22,30%	5,30%	22,60%	13,40%
incertezza carico		0,10%	0,70%	1,00%	0,10%	0,40%	0,10%	<0,1%

Sulle strade a scorrimento veloce il contributo maggiore alla varianza delle emissioni spetta all'incertezza dei fattori di emissione e, in particolare quelli dei veicoli commerciali leggeri. Segue la variabilità della velocità. Il contributo del carico è influente.

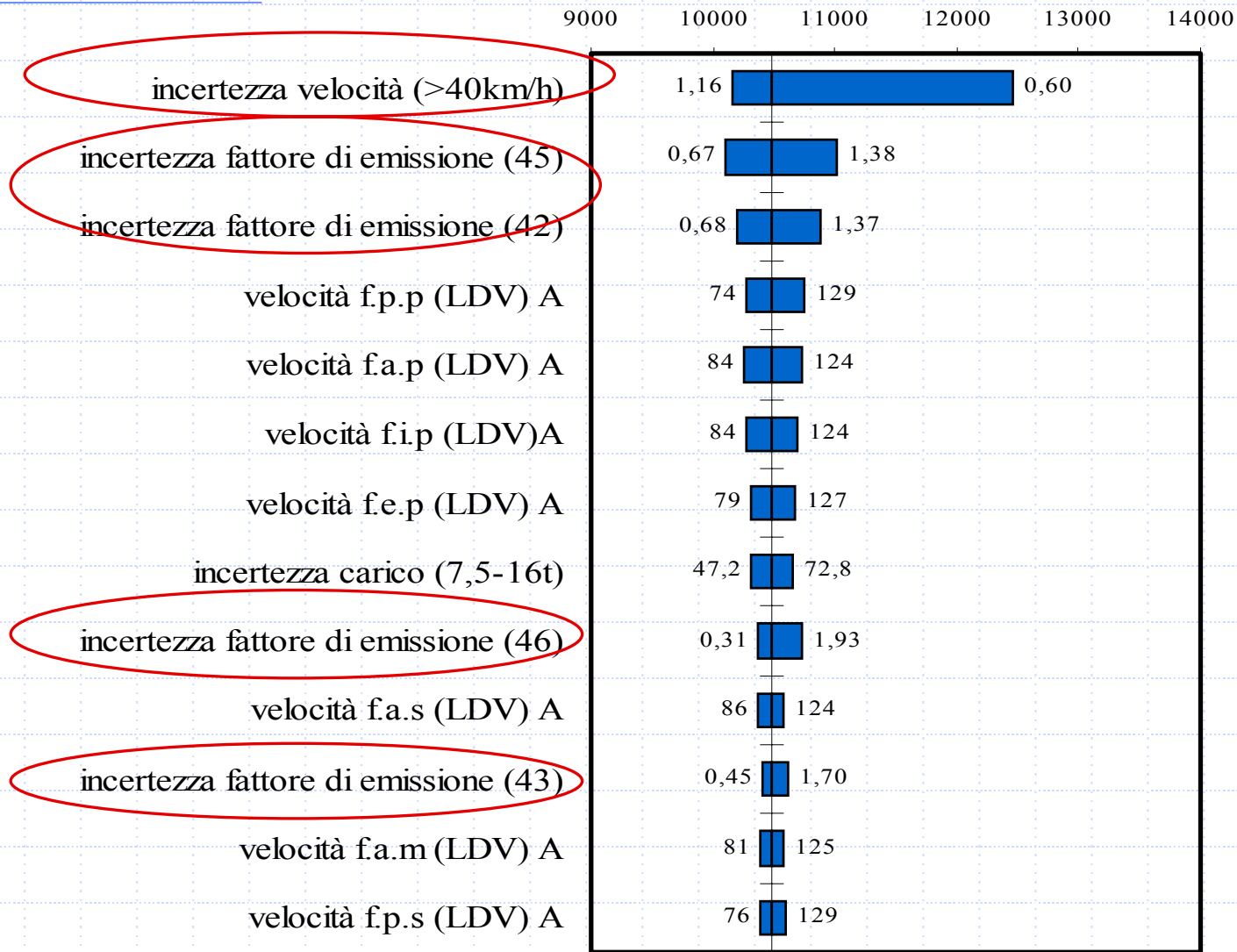
Sulle strade extraurbane il ruolo decisivo spetta alla variabilità della velocità.

Analisi di sensitività delle emissioni di polveri in Lombardia

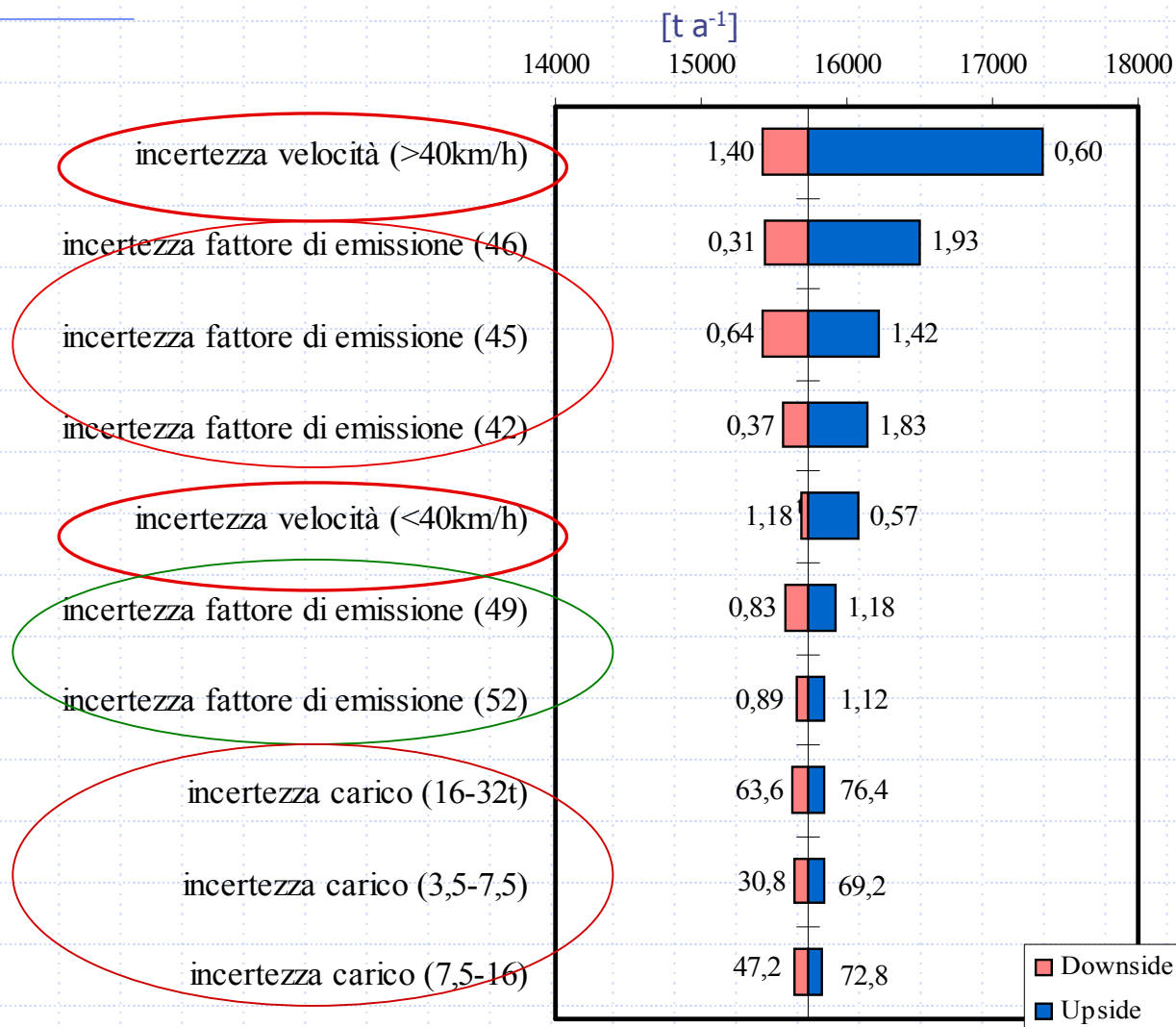
Analisi di sensitività Emissione annua PM



Analisi di sensitività delle emissioni di CO in Lombardia



Analisi di sensitività delle emissioni di NOx in Lombardia



Conclusioni sull'analisi di sensitività

Per le **emissioni complessive**:

	PM	CO	NOx
Incertezza velocità	Molto rilevante	Molto Rilevante	Molto rilevante
Incertezza fattori di emissione	Molto rilevante	Rilevante	Molto rilevante
Incertezza carico	Poco rilevante	Poco rilevante	Rilevante
Variabilità velocità	Poco rilevante	Rilevante	Poco rilevante

Per le **emissioni dei veicoli commerciali pesanti** rimane determinante l'incertezza della velocità, ma emerge la rilevanza dell'incertezza del carico dei veicoli e dei fattori di emissione per CO e NOx.

Conclusioni

- ◆ Le emissioni di **polveri** sono le più condizionate dalle fonti di incertezza considerate.
- ◆ L'incertezza delle emissioni dei veicoli commerciali **leggeri** è maggiore di quella dei veicoli commerciali pesanti.
- ◆ L'**incertezza della velocità media** e l'**incertezza dei fattori di emissione** (soprattutto dei veicoli commerciali leggeri) sono determinanti nella stima dell'incertezza delle emissioni.
- ◆ Il contributo del carico dei veicoli incide sulle emissioni dei veicoli commerciali pesanti, ma con variazioni percentuali inferiori al 6%.