



**Legambiente  
Carrara**

Viale XX Settembre 46 - 54033 Carrara  
legambiente.carrara@infinito.it



**Carrara: marmo e polveri sottili (PM10)  
ANALISI STATISTICA**

**Giuseppe Sansoni**

**dicembre 2009**

# SOMMARIO

<b>Parte 1<sup>a</sup></b>	<b>3</b>
<b>SINTESI NON TECNICA</b>	<b>3</b>
<b>Parte 2<sup>a</sup></b>	<b>11</b>
<b>ANALISI STATISTICA</b>	<b>11</b>
<b>1. Premessa</b>	<b>12</b>
<b>2. Primo sguardo ai dati</b>	<b>12</b>
<b>3. Analisi statistica di base</b>	<b>17</b>
3.1 Preparazione dei dati (sintesi)	17
3.2 Introduzione: il significato della regressione	18
3.3 Quanto i camion (e le variabili meteo) influenzano il PM10?	19
3.3.1 Regressione tra LnPM10 e tutte le altre variabili	19
3.3.2 Regressione tra LnPM10 e camion + variabili meteorologiche (CO e NO <sub>2</sub> esclusi)	22
3.3.3 Più aumentano i camion e più sono sporchi? Svelato il mistero	25
<b>4. Destagionalizzazione</b>	<b>29</b>
4.1 Destagionalizzazione mediante sinusoidi	30
4.2 Destagionalizzazione mediante lisciamiento esponenziale centrato	30
4.3 Destagionalizzazione mediante differenziazione	31
<b>5. Regressione: confronto tra serie destagionalizzate e no</b>	<b>31</b>
5.1 Regressione: risultati a confronto	31
5.2 Regressione: il caso illuminante della temperatura	33
<b>6. Conclusioni e indicazioni pratiche</b>	<b>34</b>
<b>Parte 3<sup>a</sup></b>	<b>37</b>
<b>APPENDICE</b>	<b>37</b>
<b>a1. Preparazione dei dati (dettaglio)</b>	<b>38</b>
a1.0 Ubicazione delle centraline	38
a1.1 Ricostruzione dei dati mancanti o inattendibili	38
a1.2 Trasformazione dei dati (normalizzazione)	42
<b>a2. Destagionalizzazione</b>	<b>45</b>
a2.1 Comprendere la stagionalità: un esperimento di “stagionalità artificiale”	45
a2.2 Destagionalizzazione mediante sinusoidi	48
a2.3 Destagionalizzazione mediante lisciamiento esponenziale centrato	50
a2.4 Destagionalizzazione mediante differenziazione	52
<b>a.3 Regressioni lineari multiple sperimentali</b>	<b>53</b>
<b>a.4 Verifica di validità della regressione</b>	<b>58</b>

# Parte 1<sup>a</sup>

## Sintesi non tecnica

Come ogni disciplina scientifica, la statistica ha un proprio “gergo”, un linguaggio poco accessibile al largo pubblico. Per quanto in questo lavoro si sia cercato di utilizzare un linguaggio semplice e comprensibile, alcune sue parti possono risultare di lettura piuttosto impegnativa. Il lavoro è stato perciò suddiviso in tre parti.

### **1<sup>a</sup> parte: Sintesi non tecnica (6 pagine)**

Presenta il “succo” dell’analisi e dei risultati in forma riassuntiva e con un linguaggio semplificato, accessibile a tutti. È scritta in caratteri neri.

### **2<sup>a</sup> parte: Analisi statistica (25 pagine)**

Descrive in forma abbastanza estesa il filo logico dell’analisi svolta e i suoi risultati. È destinata ad un pubblico con una formazione tecnica di base, che voglia meglio seguire e comprendere la procedura seguita, come sono state affrontate le difficoltà incontrate e acquisire una migliore conoscenza dei dati e dei risultati. È scritta in caratteri blu.

### **3<sup>a</sup> parte: Appendice (25 pagine)**

È la parte specialistica, di approfondimento dell’analisi svolta e di verifica della sua attendibilità. È destinata ai soli cultori della materia. È scritta in caratteri verdi.

---

**Al largo pubblico si consiglia la lettura della sola *Sintesi non tecnica*.**

# Sintesi non tecnica

È stata condotta un'analisi statistica sui dati giornalieri del triennio 2006-2008 della centralina di rilevamento della qualità dell'aria di Carrara (da traffico, via Carriona, situata in loc. Lugnola) e sui dati meteorologici delle due stazioni meteo disponibili (stazione LaMMA e stazione Protezione Civile, gestita da Alfa Victor)<sup>(1)</sup>, con l'obiettivo principale di verificare l'influenza quantitativa del traffico pesante dei camion del marmo sulle concentrazioni atmosferiche del PM10 ("polveri sottili")<sup>(2)</sup>, distinguendola da quella dei fattori meteorologici. I parametri esaminati sono stati i dati giornalieri<sup>(3)</sup> di: numero di camion, PM10, CO (ossido di carbonio), NO<sub>2</sub> (biossido d'azoto), temperatura, intensità di pioggia, velocità del vento, pressione atmosferica.

Si è scelto di indagare principalmente l'influenza dei camion perché a Carrara, rispetto ad altre aree urbane, essi costituiscono una duplice anomalia. A Carrara, infatti, i camion rappresentano una frazione del traffico complessivo ben più rilevante che altrove<sup>(4)</sup>; inoltre precedenti indagini analitiche sulla composizione chimica del PM10 avevano mostrato che a Carrara una fonte rilevante del PM10 era rappresentata dalle polveri di carbonato di calcio disperse dai camion del marmo<sup>(5)</sup>.

Era inoltre un dato acquisito ed evidente l'andamento ciclico del PM10, più elevato nei mesi freddi e più basso in quelli caldi: nell'arco del triennio sono stati registrati ben 220 superamenti del limite di legge per il PM10 (50 µg/m<sup>3</sup>) nei mesi freddi (ottobre-marzo) e solo 27 nei mesi caldi (aprile-settembre) (Fig. 1); anche le concentrazioni medie dei tre inquinanti sono sensibilmente più elevate nei mesi freddi (Fig. 2-4).

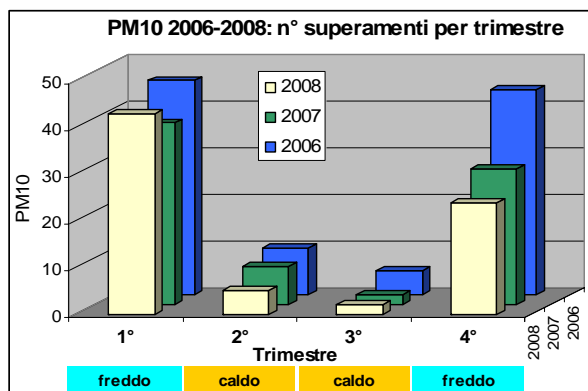


Fig. 1. Numero di superamenti del limite di legge per il PM10 per trimestre negli anni 2006-2008.

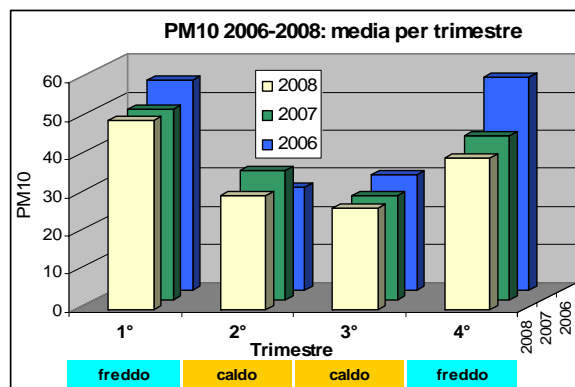


Fig. 2. Concentrazione media di PM10 per trimestre negli anni 2006-2008.

<sup>1</sup> Per la loro ubicazione si veda l'Appendice, a pag. 38.

<sup>2</sup> Il PM10 è il materiale particolato sospeso nell'aria di diametro inferiore a 10 µ (micron, cioè millesimi di millimetro). Queste polveri (dette "sottili" o "inalabili") penetrano nel tratto superiore delle vie aeree (cavità nasali, faringe e laringe). Una parte del PM10 (il PM2,5 o polveri "respirabili", con diametro inferiore a 2,5 micron), essendo ancora più fine, può raggiungere le parti inferiori dell'apparato respiratorio (tratto tracheobronchiale: trachea, bronchi, bronchioli e alveoli polmonari) ed è, perciò, la frazione più dannosa alla salute.

<sup>3</sup> Tre anni di dati giornalieri, quindi 1.096 dati per ciascun parametro (i pochi dati mancanti sono stati ricostruiti come media tra giorni precedenti e successivi).

<sup>4</sup> Fino a 1.000 camion il giorno che salgono verso le cave ed altrettanti che ne discendono.

<sup>5</sup> Concentrazioni atmosferiche di carbonato di calcio (nel PM10) circa 20 volte superiori a quelle delle altre aree urbane e agricole.

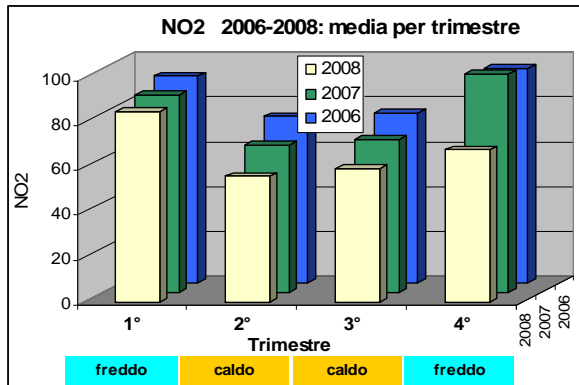


Fig. 3. Concentrazione media di NO<sub>2</sub> per trimestre negli anni 2006-2008.

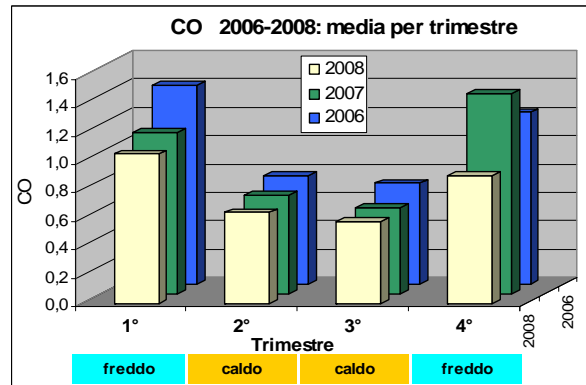


Fig. 4. Concentrazione media di CO per trimestre negli anni 2006-2008.

La forte dipendenza del PM10 dalla stagionalità, mentre il numero giornaliero di camion resta relativamente costante, potrebbe indurre ad escludere i camion come una fonte rilevante del PM10 atmosferico.

Tuttavia il ricorso all'analisi statistica per quantificare l'apporto dei camion al PM10 è più che giustificato da alcune semplici osservazioni: *il PM10 (e l'NO<sub>2</sub>) sono nettamente più elevati nei giorni con camion (Fig. 5) e diminuiscono il sabato e la domenica (Fig. 6).* Le modeste differenze di CO tra giorni con e senza camion e tra giorni feriali e festivi fanno invece ritenere che *il CO risenta principalmente dell'influenza degli impianti di riscaldamento.*

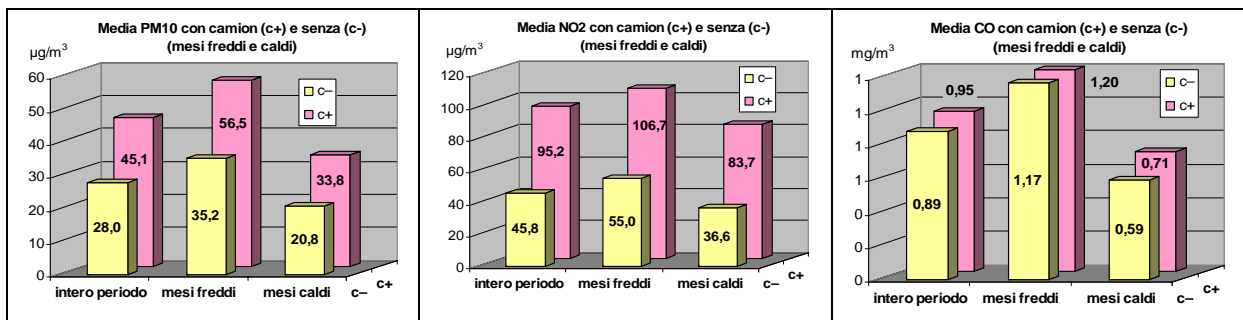


Fig. 5. Confronto della concentrazione media degli inquinanti atmosferici tra giorni con camion (c+, in rosa) e senza (c-, in giallo), negli anni 2006-2008 (intero periodo) e nei sottoperiodi "mesi freddi" e "mesi caldi". Mentre per il CO si registrano solo lievi differenze, è evidente il netto incremento dei livelli di PM10 e NO<sub>2</sub> nei giorni con camion, sia nell'intero periodo che nei sottoperiodi.

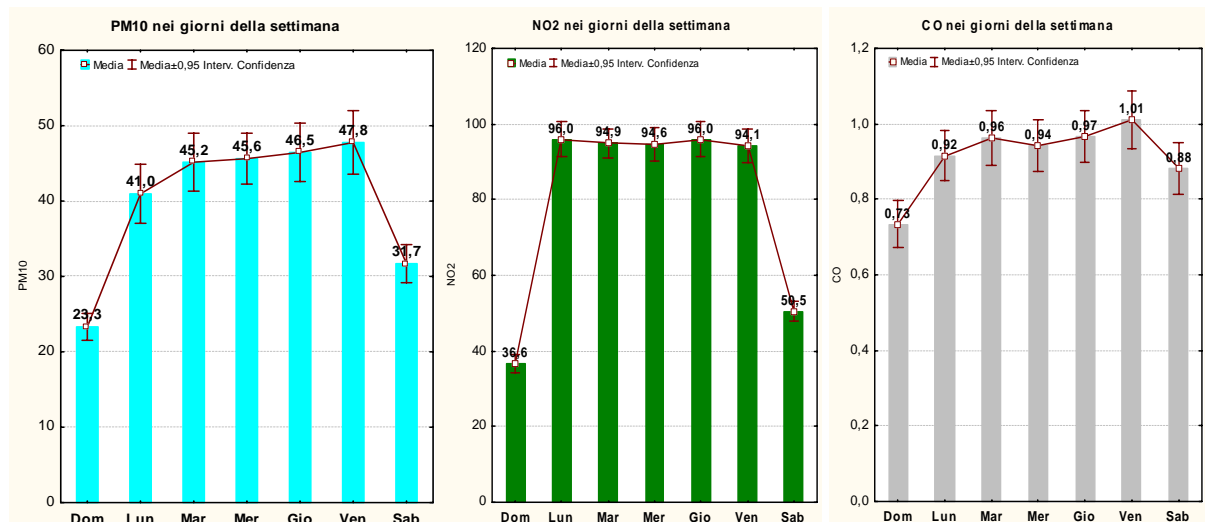
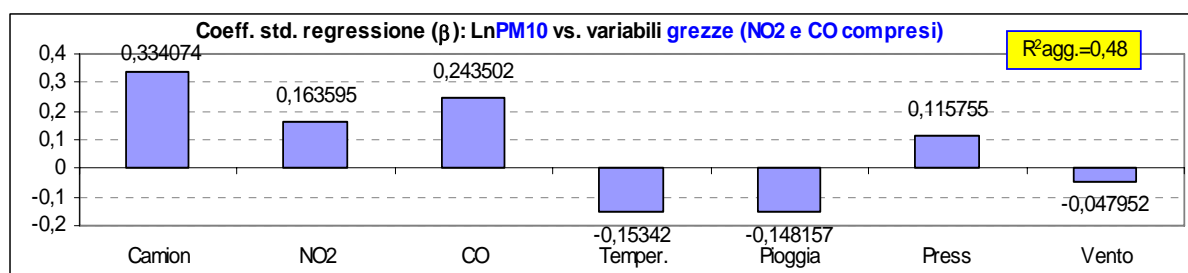


Fig. 6. Concentrazione media degli inquinanti atmosferici secondo il giorno della settimana (esclusi periodi di ferie, festività natalizie, pasquali, ecc.). Per il PM10 e l'NO<sub>2</sub> l'evidente aumento delle concentrazioni nei giorni feriali e la diminuzione il sabato e la domenica depongono per un robusto legame col traffico pesante (e leggero). Per il CO, il legame col traffico è molto più debole.

L'analisi statistica (avvalendosi di diverse regressioni lineari multiple) ha mostrato che:

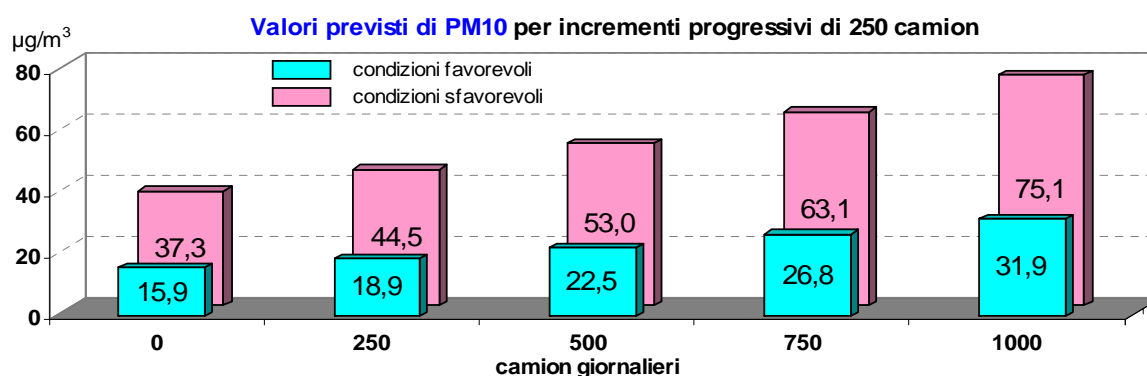
1. *il numero giornaliero di camion del marmo è la variabile che, più di ogni altra, influenza i livelli di PM10*, come si può cogliere a colpo d'occhio nella Fig. 7, dal fatto che la colonna dei camion è quella più alta di tutte le altre. Ciò dovrebbe porre fine una volta per tutte ai tendenziosi dubbi sulla responsabilità dei camion nella diffusione di polveri inalabili, periodicamente sollevati sulla base di osservazioni episodiche<sup>(6)</sup>.

Un'altra informazione ricavabile dalla figura è il fatto che le colonne che rappresentano i camion, l'NO<sub>2</sub>, il CO e la pressione atmosferica sono tutte rivolte verso l'alto; ciò significa che queste variabili sono correlate *positivamente* al PM10 (cioè un loro aumento è accompagnato da un aumento del PM10). Le colonne di temperatura, pioggia e vento sono invece rivolte verso il basso, indicando che sono correlate *negativamente* al PM10 (cioè il loro aumento è accompagnato da una riduzione del PM10).



**Fig. 7.** L'altezza di ciascuna colonna è un indice dell'importanza relativa di ciascuna variabile. La variabile che più influenza il PM10 è il numero di camion, seguita da CO, NO<sub>2</sub>, temperatura, pioggia, pressione, vento. Le colonne rivolte verso l'alto indicano che un aumento di queste variabili è accompagnato da un aumento del PM10; quelle verso il basso indicano le variabili il cui aumento è accompagnato da una diminuzione del PM10. Per una spiegazione più rigorosa di questo grafico si vedano la Fig. 23 (pag. 21) e il relativo testo.

2. *passando da zero a 1000 camion giornalieri, il valore del PM10 raddoppia* (Fig. 8): in condizioni atmosferiche *favorevoli*<sup>(7)</sup> passa da 15,9 a 31,9 µg/m<sup>3</sup> (microgrammi per metro cubo) con un incremento medio di 16,1 µg/m<sup>3</sup>; in condizioni *sfavorevoli* passa da 37,3 a 75,1 µg/m<sup>3</sup>, con un incremento di ben 37,8 µg/m<sup>3</sup>. Si tratta di incrementi rilevanti, se rapportati al limite di legge (50 µg/m<sup>3</sup>).



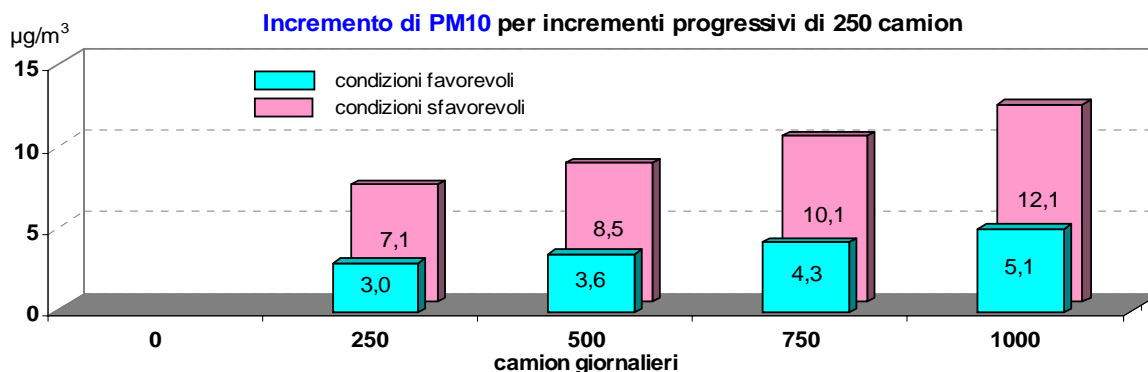
**Fig. 8.** Valori di PM10 previsti per incrementi progressivi di 250 camion giornalieri, nelle condizioni *favorevoli* (in azzurro) e *sfavorevoli* (in rosa).

3. *ad incrementi costanti del numero di camion corrispondono incrementi crescenti del PM10* (come se i camion fossero più puliti quando il loro numero è basso e sempre più sporchi quanto più il loro numero giornaliero aumenta) (Fig. 9);

<sup>6</sup> Ad es. episodi di superamenti dei limiti di legge del PM10 in giornate festive o, comunque, senza transito di camion, sono stati ripetutamente adottati come prova della mancata responsabilità dei camion, confondendo l'eccezione con la regola.

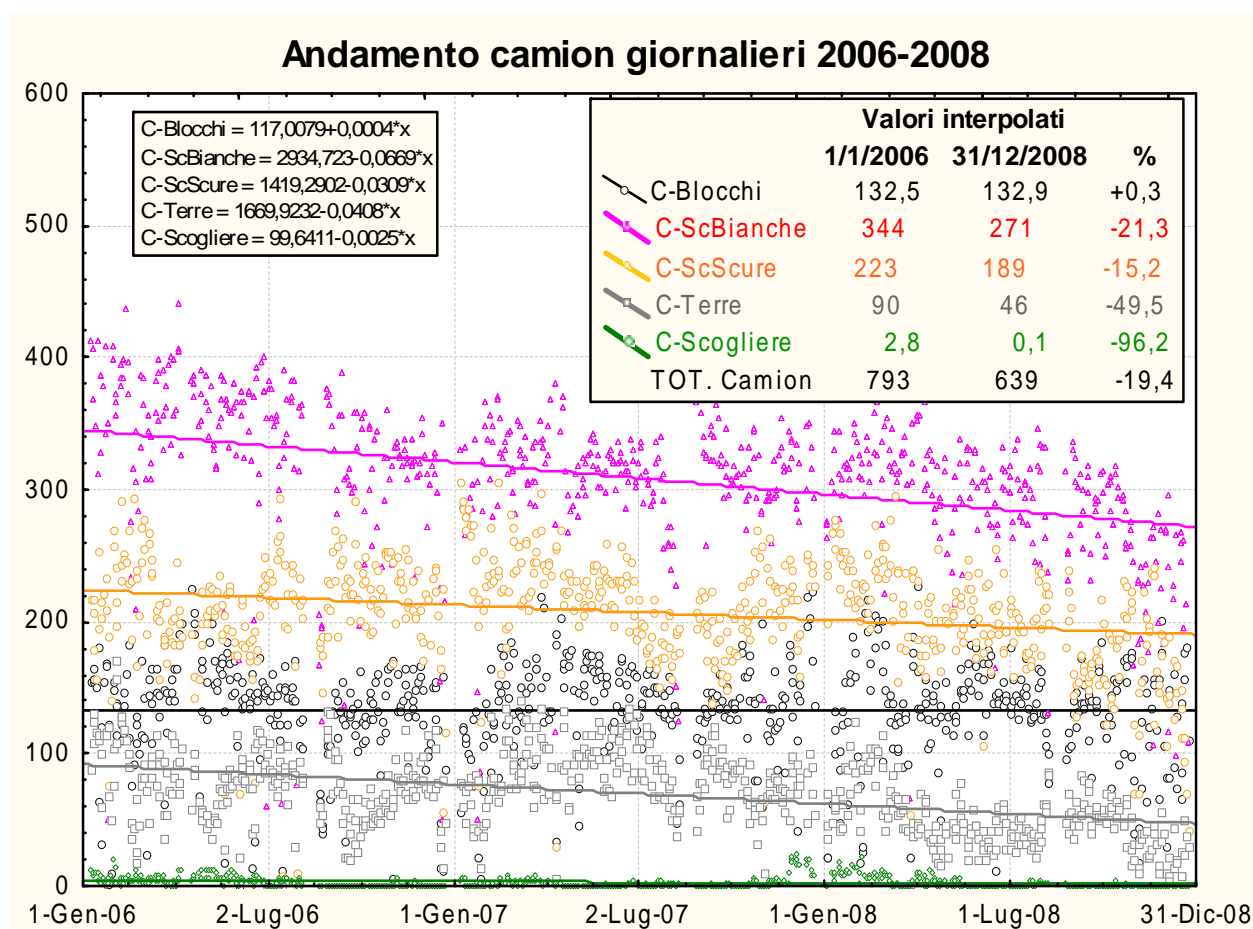
<sup>7</sup> Condizioni favorevoli sono quelle con bassi livelli degli inquinanti atmosferici, bassa pressione, elevata temperatura, pioggia, velocità del vento elevata (si veda la Tab. 4 a pag. 22).





**Fig. 9.** Incremento di PM10 previsto per ogni incremento successivo di 250 camion giornalieri, nelle condizioni favorevoli (in azzurro) e sfavorevoli (in rosa). In condizioni favorevoli i primi 250 camion incrementano il PM10 di 3 µg/m<sup>3</sup>, mentre gli ultimi 250 camion lo incrementano di 5,1 µg/m<sup>3</sup>; in condizioni sfavorevoli, i primi 250 camion lo incrementano di 7,1 µg/m<sup>3</sup> e gli ultimi 250 camion di 12,1 µg/m<sup>3</sup>.


Il “mistero” di quest'ultimo punto non è di natura statistica, ma trova spiegazione nel crescente smaltimento abusivo degli scarti dell'escavazione (Fig. 10). Nel triennio, infatti, i camion giornalieri sono diminuiti del 20%, ma la riduzione non riguarda i camion dei blocchi (rimasti invariati), bensì quelli delle scaglie scure (-15%) e bianche (-21%) e, soprattutto, i più polverosi (quelli delle terre: -50%). Perciò, quando i camion sono pochi (come nel 2008), venendo a ridursi soprattutto il numero dei camion più sporchi, l'analisi statistica registra che ciascun camion è mediamente più pulito.



**Fig. 10.** Il numero giornaliero di camion di blocchi è rimasto sostanzialmente invariato nel triennio (aumento dello 0,3%); la riduzione dei camion ha interessato soprattutto quelli di terre (che si sono dimezzati: -49,5%), seguiti da quelli di scaglie bianche e scure (-21% e -15%); i camion di scogliere possono essere ignorati, dato il loro numero trascurabile. Nota: il grafico comprende i soli giorni feriali con circolazione di camion.

Tale interpretazione è confermata dall'analisi statistica che (mediante una serie di regressioni lineari semplici) ha permesso di valutare il grado di polverosità di ciascun tipo di camion: *dal punto di vista del PM10 rilasciato nell'aria, un camion di scaglie inquina come 2,9 camion di granulati, uno di blocchi come 4,3 camion di granulati ed uno di terre come 8,3 camion di granulati* (il concetto è visualizzato in maniera efficace ed intuitiva nella **figura 11**). Può così trovare spiegazione la riduzione del 30% del PM10, verificatasi nel triennio, a fronte della riduzione del 20% del numero complessivo di camion.

Questa evidenza, nel confermare ulteriormente il ruolo determinante dei camion come sorgente di PM10, rivela un'altra amara realtà: *il miglioramento della qualità dell'aria verificatosi nel triennio è principalmente il risultato dello smaltimento abusivo delle terre di cava nei bacini marmiferi*, che sta trasformando le nostre montagne in un'immensa discarica (aggravando peraltro anche il rischio di inquinamento delle sorgenti).

CAMION EQUIVALENTI (per la quantità di PM10 rilasciato nell'aria)	
1 camion di:	= n° camion di granulati
 Granulati	1 
 Scaglie	2,9 
 Blocchi	4,3 
 Terre	8,3 

**Fig. 11.** Non tutti i camion producono la stessa quantità di PM10: i meno polverosi sono i camion di granulati. Per la quantità di PM10 prodotto, ogni camion di scaglie (bianche o scure) equivale a 2,9 di granulati. I maggiori produttori di PM10 sono i camion di blocchi e di terre, ciascuno dei quali equivale rispettivamente a 4,3 e 8,3 camion di granulati.

Per cercare di separare l'influenza delle fonti inquinanti giornaliere sul PM10 da quella delle variazioni stagionali (legate soprattutto alle condizioni meteorologiche), sono stati sperimentati vari tipi di "destagionalizzazione dei dati". La considerazione più interessante emersa da questa analisi riguarda la temperatura il cui aumento, a breve termine, favorisce l'aumento del PM10 (per il disseccamento dei fanghi sulle strade, poi risollevati dal traffico sotto forma di polveri), mentre a lungo termine è la sua diminuzione a favorire l'aumento del PM10 (inducendo l'accensione invernale degli impianti di riscaldamento).

Il legame tra PM10 e le variabili meteorologiche si è, invece, rivelato debole a causa della mancanza di dati meteo attendibili.

Contrariamente alle aspettative, ad esempio, la velocità del vento risulta favorire solo una debole riduzione del PM10. Tuttavia, come accennato, questa conclusione è affetta da seri dubbi: la centralina della Lugnola, infatti, è sprovvista di stazione meteo; buona parte dei dati della stazione più vicina (Alfa Victor, situata a San Ceccardo) non è stata utilizzata a causa della sua incompletezza e scarsa attendibilità; si è perciò ripiegato in parte sui dati della stazione LaMMA (ancora più distante, collocata al liceo scientifico). I dati meteorologici utilizzati sono rappresentativi della situazione della Lugnola solo per la temperatura (per la quale, in effetti, è stata rilevata una relazione con il PM10), un parametro che varia gradualmente durante la giornata (non in maniera brusca e imprevedibile); sono invece assolutamente non rappresentativi della situazione della Lugnola i dati della velocità del vento



(che cambia sensibilmente anche a brevi distanze e risente della configurazione orografica e della presenza e collocazione degli edifici) e di altri parametri.

L'analisi statistica, confermando che la fonte principale di PM10 non sono tanto i gas di scarico dei camion, quanto la loro polverosità, fornisce alcune indicazioni concrete per la riduzione delle polveri sottili:

- puntare prioritariamente al radicale adeguamento dell'impianto di lavaggio camion di Torano e alla sollecita realizzazione del nuovo impianto (prescritti peraltro dall'ordinanza del tribunale);
- sottoporre a lavaggio anche i camion che trasportano blocchi (attualmente esonerati dal lavaggio sebbene siano i più polverosi, dopo quelli delle terre);
- sottoporre a lavaggio anche i fuoristrada e le auto che provengono dalle cave;
- prevenire l'apporto di fanghi sulle strade montane (trasportati poi in città dai pneumatici dei camion e, dopo il disseccamento, risollevari come polveri sottili). A tal fine occorre:
  - asfaltare per un buon tratto le vie d'arroccamento e, soprattutto, pulirle regolarmente con spazzatrici aspiranti;
  - dotarle di un efficace sistema di convogliamento delle acque meteoriche;
  - vietare nelle cave l'accumulo di terre all'aperto e reprimere con decisione il loro smaltimento indiscriminato sulle scarpate delle vie d'arroccamento (sempre più diffusamente praticato) e, più in generale, nell'ambiente.

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio, inoltre, l'analisi statistica ha messo in evidenza la non rappresentatività e l'inattendibilità delle stazioni meteo situate a San Ceccardo e al liceo scientifico. Ne deriva la necessità, per valutare in maniera attendibile l'influenza delle variabili meteorologiche sul PM10, di *dotare di una stazione meteo ogni centralina di rilevamento della qualità dell'aria.*

