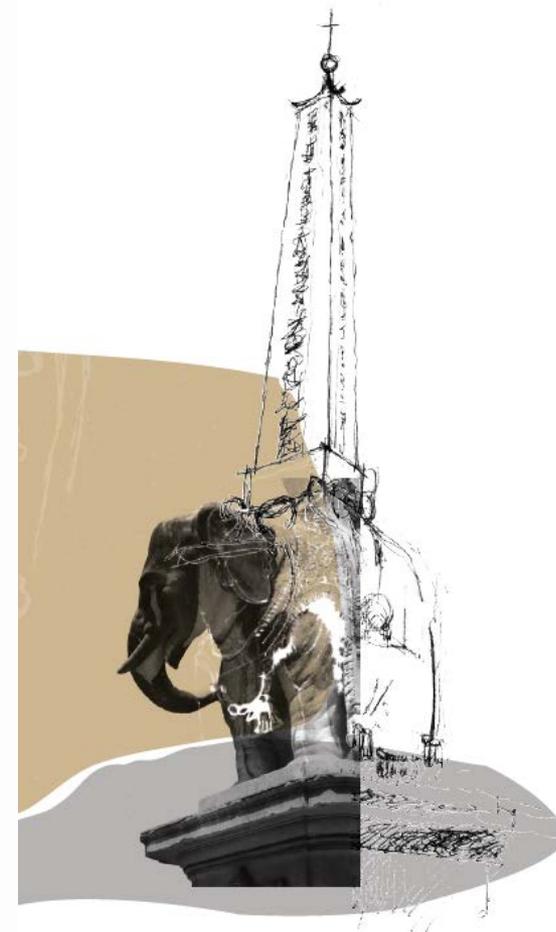


# Degrado dei monumenti e inquinamento atmosferico: studio dei processi di annerimento, erosione e corrosione sui materiali costituenti i beni culturali di Roma

R. Gaddi, M. Cusano, P. Bonanni, C. Cacace, A. Giovagnoli



# Ambiente, Materiali, Effetti

## Fattori climatici e ambientali

- ✓ Temperatura
- ✓ Umidità relativa
- ✓ Vento
- ✓ Precipitazioni
- ✓ Sale Marino
- ✓ Gas ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ )
- ✓ Particolato atmosferico

## Materiali

- ✓ Materiali lapidei
- ✓ Metalli
- ✓ Vetro
- ✓ Legno

## Principali forme di degrado

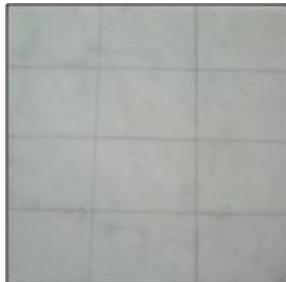
- ✓ Annerimento
- ✓ Perdita di materiale (Erosione, Corrosione)
- ✓ Polverizzazione, Decoesione
- ✓ Contaminazione biologica



# Campagna di monitoraggio

- ✓ **Siti:** sette siti in corrispondenza di sette centraline di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma
- ✓ **Durata:** 2 anni (Marzo 2013-Marzo 2015)
- ✓ **Materiali:** marmo, vetro e rame

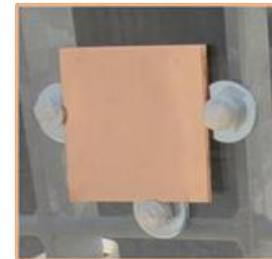
Marmo



Vetro



Rame



# I siti

## Stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria

Arenula (**fondo urbano**)

Cinecittà (**fondo urbano**)

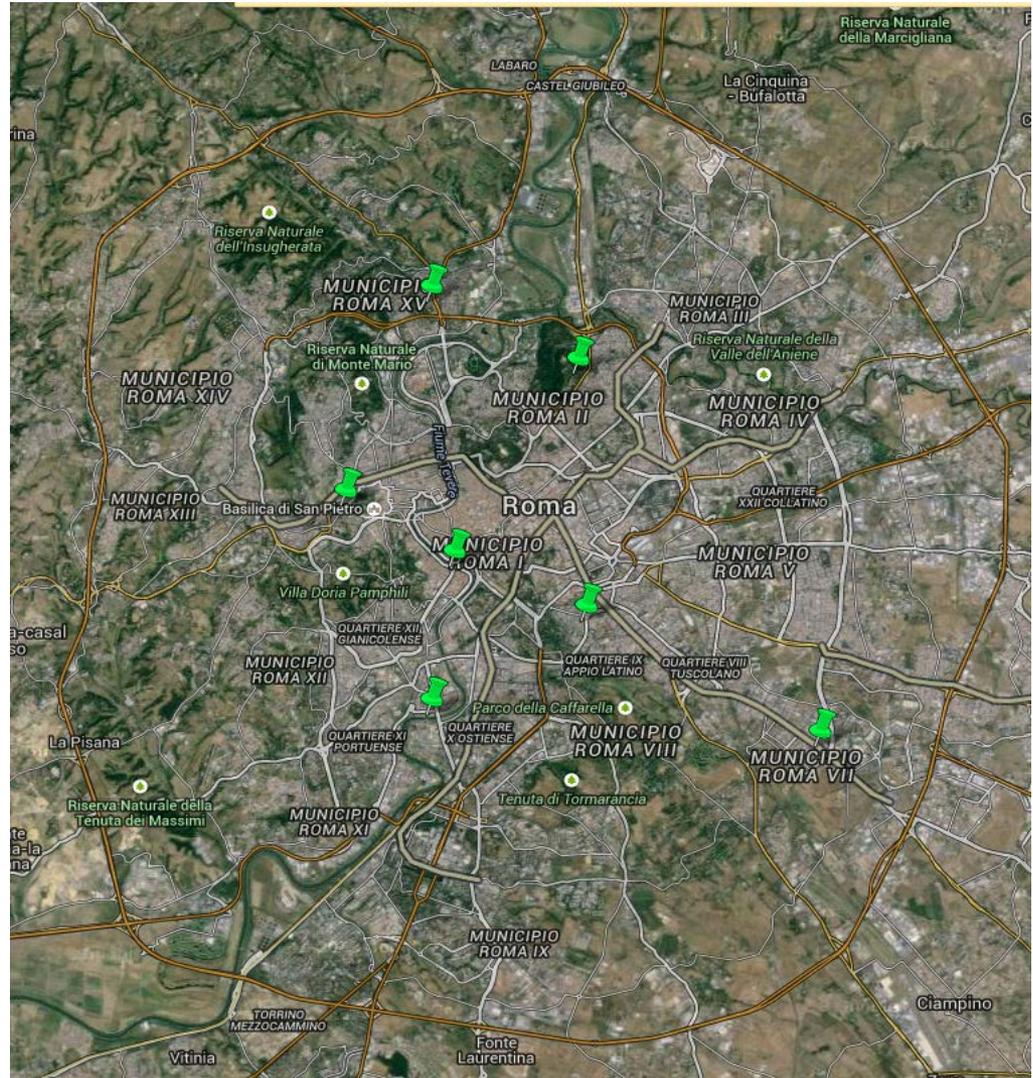
Cipro (**fondo urbano**)

Francia (**traffico urbano**)

Fermi (**traffico urbano**)

Magna Grecia (**traffico urbano**)

Villa Ada (**fondo urbano**)



# Caratterizzazione dei siti

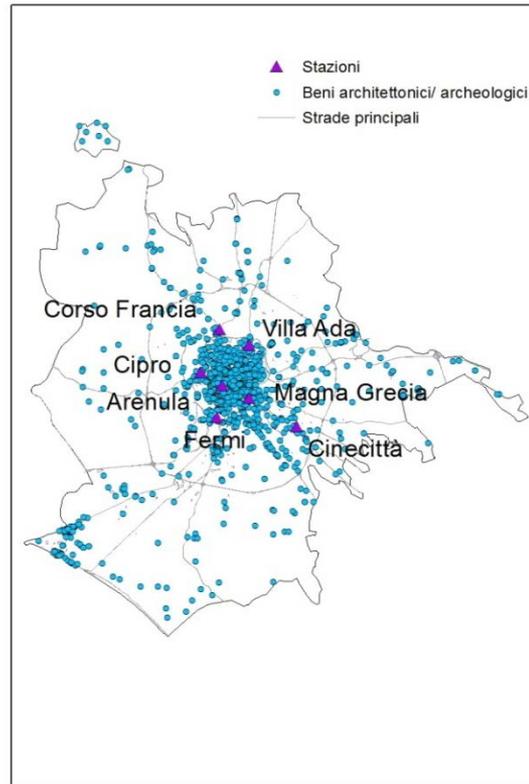
Francia



Cipro



Arenula



Villa Ada



Magna Grecia



Fermi



Cinecittà

# Espositori e materiali

- 1 espositore con tettoia, per ciascun sito, contenente:
  - 1 provino di marmo 13 x 13 cm
  - 1 provino di marmo 2 x 2 cm
  - 8 vetrini da microscopio 7.5 x 2.5 cm
- A Magna Grecia e Francia sono stati aggiunti provini di rame 2 x 2 cm e **1 espositore senza tettoia**, per ciascun sito, contenente:
  - 1 provino di marmo 13 x 13 cm
  - 7 provini di marmo 2 x 2 cm
  - 8 vetrini da microscopio 7.5 x 2.5 cm
  - 3 provini di rame 2 x 2 cm

Cinecittà: espositore con tettoia



Francia: espositore con tettoia



Francia: espositore senza tettoia



# Analisi ed elaborazioni

## Annerimento (vetro e marmo)

- Misure dei parametri colorimetrici ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) a tempo=0 e ogni due mesi per il marmo e ogni 4 mesi per il vetro
- Elaborazioni dei dati di particolato atmosferico ( $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$ )
- Valutazioni andamento di  $L^*$  (luminosità) in funzione del tempo e delle concentrazioni di particolato atmosferico

## Erosione (Marmo)

- Variazione in peso dopo un anno e **dopo due anni** di esposizione
- Elaborazioni dei fattori meteoroclimatici (Temperatura, Umidità Relativa, Precipitazioni) e di inquinanti atmosferici ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$ )

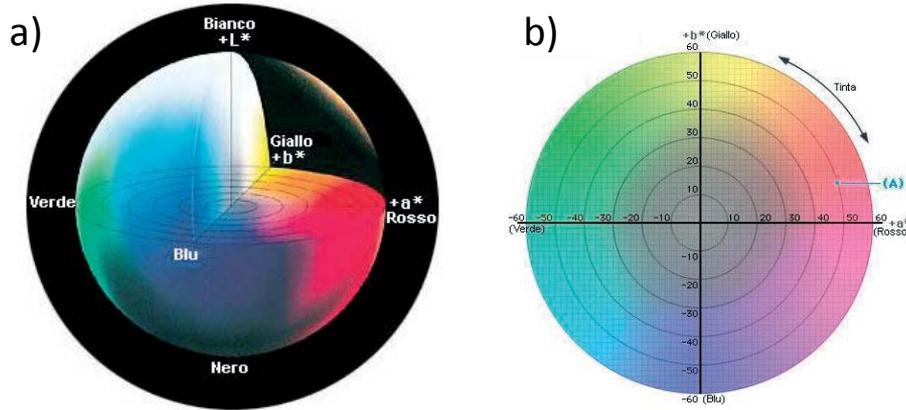
## Corrosione (Rame)

- Misure colorimetriche a tempo=0 e ogni due mesi
- Variazione in peso **dopo due anni** di esposizione

- **Descrizione dei parametri colorimetrici utilizzati per valutare l'annerimento**
- **Caratterizzazione dei materiali prima dell'esposizione**
- **Presentazione dei dati di concentrazione del particolato atmosferico (ARPA Lazio)**

# Parametri colorimetrici

## Spazio di colore L\*a\*b\* (CIELAB)



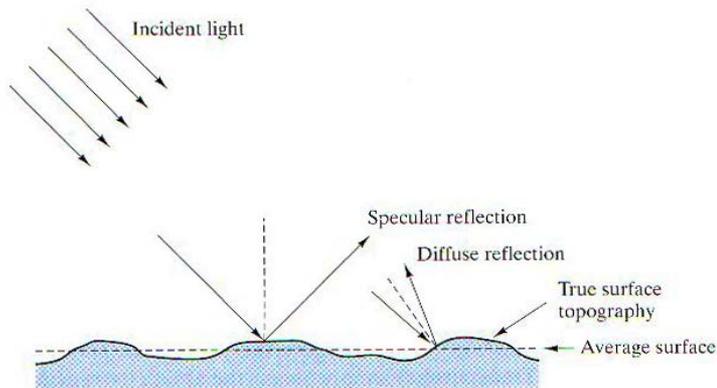
**L\*** (luminosità): da 0 (nero) a 100 (bianco)  
**a\*** (cromaticità): + a\* → rosso, - a\* → verde  
**b\*** (cromaticità): + b\* → giallo, - b\* → blu

$$\Delta E_{ab}^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

$\Delta E_{ab}^* > 2$  Differenza leggera, ma chiaramente percepibile all'occhio umano \*

\* UNI EN ISO3668:2002

## Colore e lucidità (metodi SCI e SCE)



**Metodo SCI (Specular Component Included):**

riflessione speculare + riflessione diffusa

**Metodo SCE (Specular Component Excluded):**

riflessione diffusa

Metodo SCI → marmo

Metodo SCI e SCE → vetro, rame

# Caratterizzazione dei provini primi dell'esposizione

## MARMO

- Misure dei parametri colorimetrici  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (con [spettrofotometro Konica Minolta CM- 700d](#) con [Illuminante D65](#))
- Misura del peso dei provini prima dell'esposizione (Bilancia Sartorius: Modello ME 414 S15109496) .  
I provini sono stati:
  - lavati con acqua distillata
  - asciugati in stufa per 2 ore
  - raffreddati
  - pesati fino al raggiungimento del peso costante

## VETRO

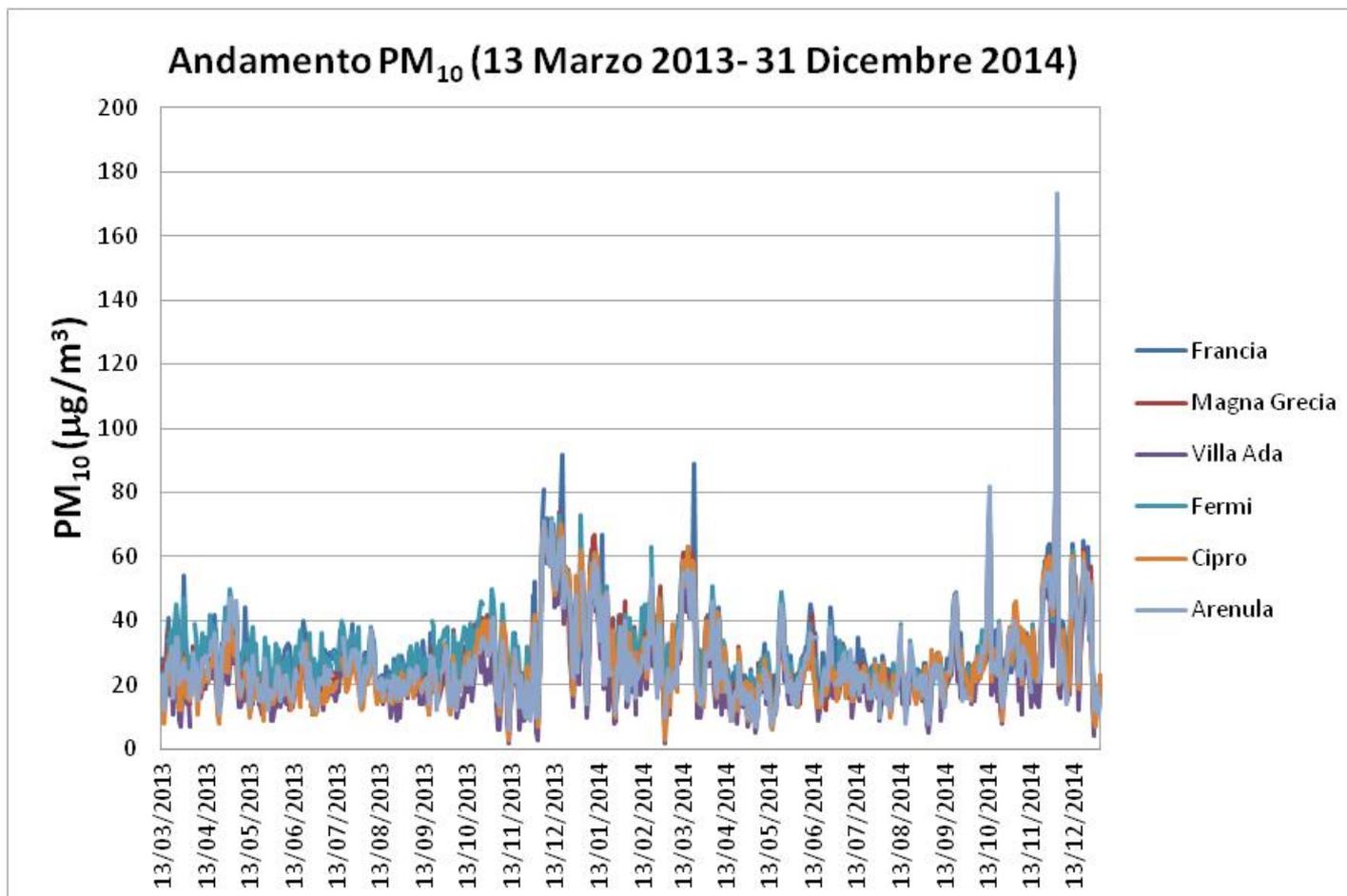
- Misure dei parametri colorimetrici ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) con cartoncino bianco

## RAME

- Lucidatura
- Misura del peso dei provini prima dell'esposizione fino al raggiungimento del peso costante
- Misure dei parametri colorimetrici ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ )

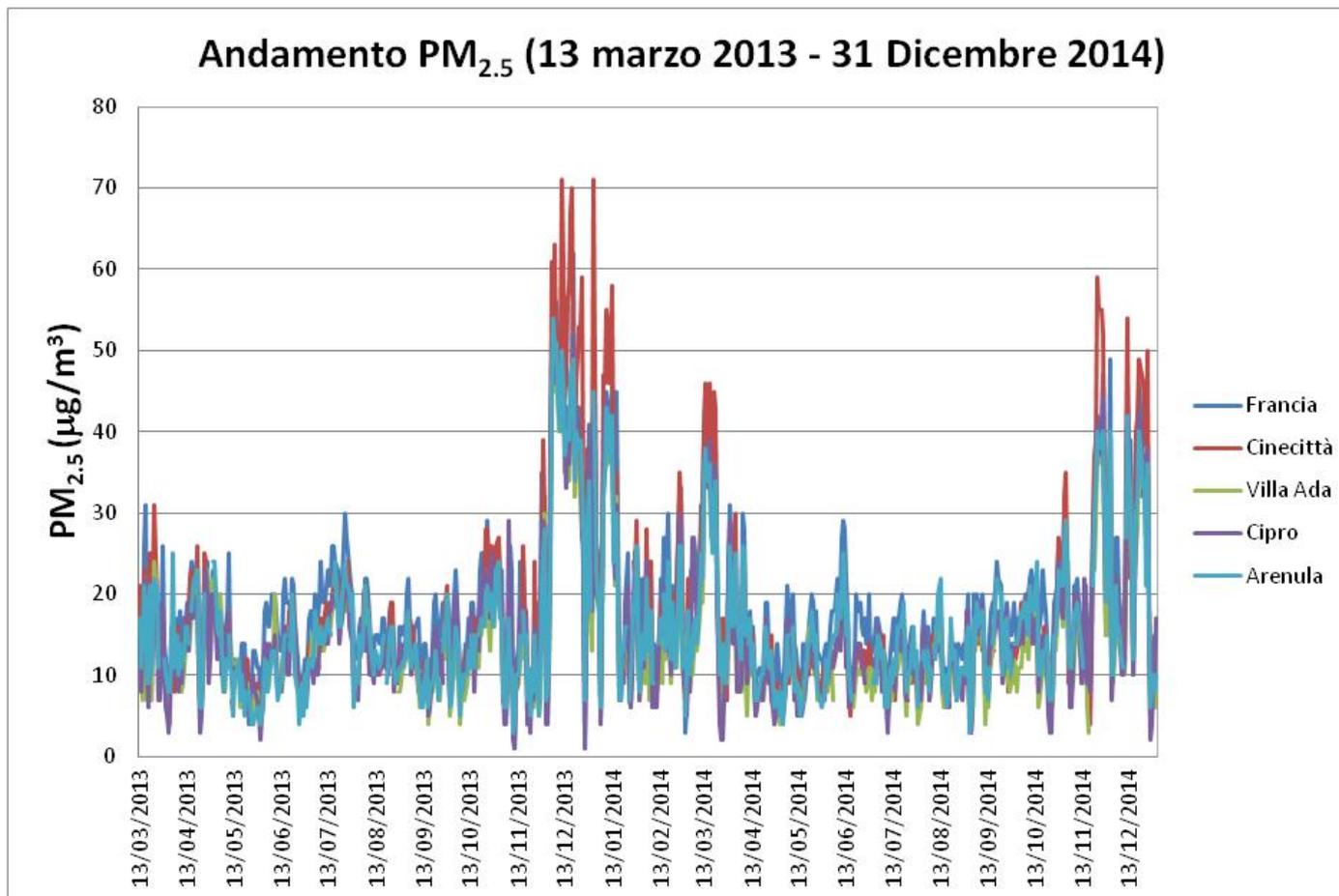


# Elaborazioni delle concentrazioni di PM<sub>10</sub> a Roma



	Francia	Magna Grecia	Cinecittà	Villa Ada	Fermi	Cipro	Arenula
PM <sub>10</sub> medio (µg/m <sup>3</sup> )	31	28	29	23	31	26	27

# Elaborazioni delle concentrazioni di PM<sub>2.5</sub> a Roma



	Francia	Cinecittà	Villa Ada	Cipro	Arenula
PM <sub>2.5</sub> medio (µg/m <sup>3</sup> )	19	17	14	15	16

# Periodi di misura e concentrazioni medie di PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>

## PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)

Periodo di misurazione	Arenula	Cinecittà	Cipro	Francia	Fermi	Magna Grecia	Villa Ada
13/03/2013_15/04/2013	25	27	21	28	32	30	19
13/03/2013_13/05/2013	27	27	22	30	34	28	20
13/03/2013_10/07/2013	24	24	20	28	30	25	18
13/03/2013_26/11/2013	24	25	21	28	30	25	19
13/03/2013_23/01/2014	27	30	26	32	33	28	23
13/03/2013_28/03/2014	27	31		32	33	29	24
13/03/2013_19/05/2014	27	30		31	32	28	23
13/03/2013_31/07/2014	26	29		31	31	28	22
13/03/2013_13/10/2014	26	28		30	30	27	22
13/03/2013_10/12/2014	27	29		31	31	28	23

## PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)

Periodo di misurazione	Arenula	Cinecittà	Cipro	Francia	Villa Ada
13/03/2013_15/04/2013	14	15	12	16	12
13/03/2013_13/05/2013	14	15	13	16	13
13/03/2013_10/07/2013	12	13	12	15	12
13/03/2013_26/11/2013	13	14	13	16	12
13/03/2013_23/01/2014	16	19	16	19	15
13/03/2013_28/03/2014	16	19		20	15
13/03/2013_19/05/2014	16	18		19	15
13/03/2013_31/07/2014	15	17		18	14
13/03/2013_13/10/2014	15	16		18	14
13/03/2013_10/12/2014	16	17		19	14

# MARMO



Fontana dei quattro fiumi-Piazza Navona

## Risultati preliminari: annerimento marmo

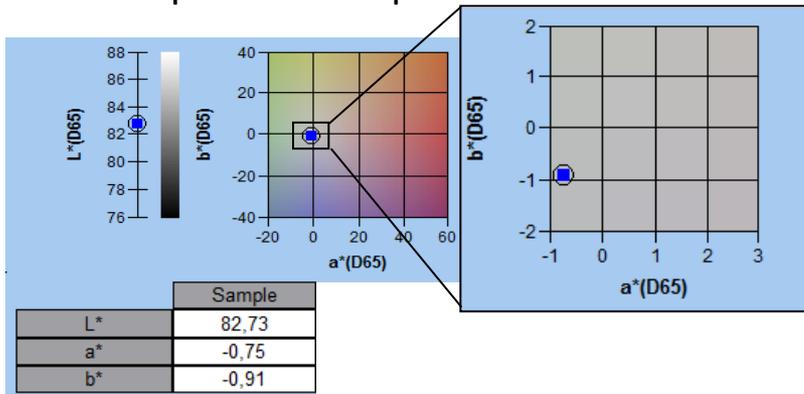
	$L^*_i$	$a^*_i$	$b^*_i$	$L^*_f$	$a^*_f$	$b^*_f$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E_{ab}^*$	t (giorni)
Arenula	84,5	-0,7	-0,5	83,8	-0,6	-0,1	-0,8	0,1	0,4	1	636
Cinecittà	81,8	-0,80	-0,6	80,0	-0,6	-0,6	-1,8	0,2	0,0	2	646
Cipro *	84,9	-0,6	-0,2	82,5	-0,6	0,3	-2,5	0,1	0,5	3	314
Francia (Coperto)	82,7	-0,8	-0,6	80,2	-0,6	-0,2	-2,4	0,2	0,4	3	644
Francia (Scoperto)	82,8	-0,8	-0,8	85,2	-0,6	-0,5	2,4	0,3	0,3	3	644
Fermi	81,1	-0,8	-0,8	78,2	-0,6	-0,3	-2,9	0,2	0,6	3	635
Magna Grecia (Coperto)	78,1	-0,7	-0,6	77,1	-0,6	-0,5	-1,0	0,1	0,1	1	637
Magna Grecia (Scoperto)	77,7	-0,6	-1,0	79,1	-0,7	-1,1	1,4	0,01	-0,1	1	637
Villa Ada**	80,1	-0,8	-0,8	78,5	-0,6	-0,8	-1,6	0,2	0,01	2	644

\* Cipro: Misure dal 13 marzo 2013 al 20 gennaio 2014

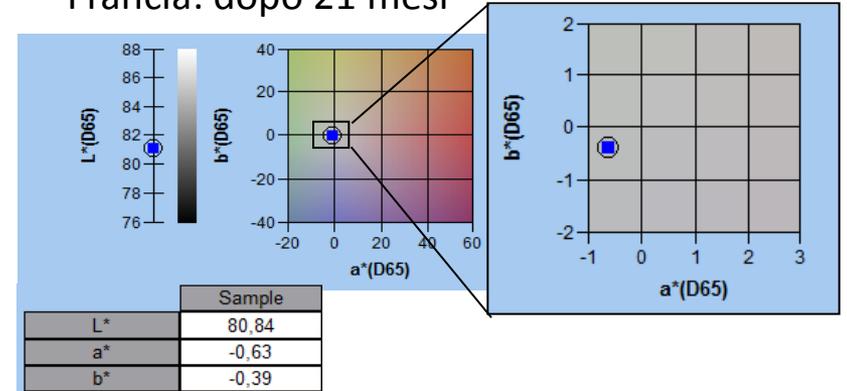
\*\*Villa Ada: Misure dal 13 marzo 2013 al 10 ottobre 2014

# Confronto dei parametri colorimetrici: prima dell'esposizione e dopo 21 mesi

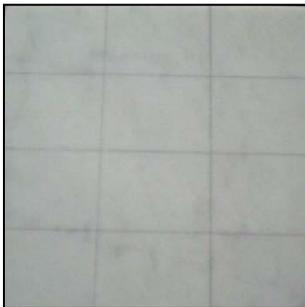
Francia: prima dell'esposizione



Francia: dopo 21 mesi



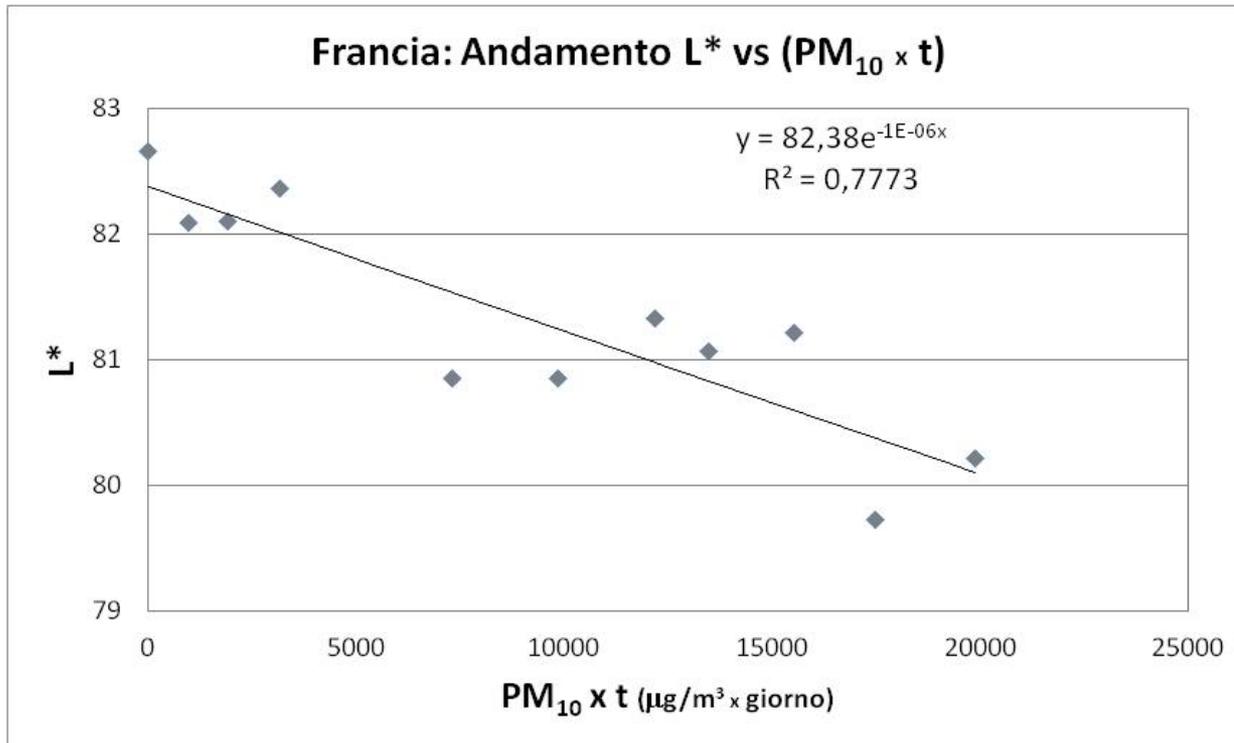
Prima dell'esposizione



Dopo 21 mesi



# Marmo: andamento L\* in funzione di PM<sub>10</sub> e t



	R <sup>2</sup> (PM <sub>2,5</sub> )	R <sup>2</sup> (PM <sub>10</sub> )
Arenula	0,55	0,55
Cinecittà	0,62	0,63
Cipro *	0,95	0,95
Francia	0,77	0,78
Fermi		0,79
Magna Grecia		0,37
Villa Ada	0,15	0,15

$$R = R_0 \exp(- kt)$$

# Risultati preliminari: erosione marmo

## Recessione “sperimentale”

Campione	Peso iniziale (g)	Peso finale (g)	$\Delta W (W_1 - W_0)$	Recessione ( $\mu\text{m}/\text{anno}$ )
Francia	13,3587	13,3434	-0,0153	4,0
Magna Grecia	13,2099	13,1981	-0,0118	3,1

$$R(\mu\text{m}) = \Delta W / A * \rho \quad (1)$$

$R(\mu\text{m})$ = recessione superficiale

$\Delta W$  (g)= variazione in peso

$A(\text{cm}^2)$ = Area totale superficie esposta

$\rho(\text{g}/\text{dm}^3)$ = densità



## Recessione “teorica”

*Confronto con Formula Kucera et al.*

$$R = 4 + 0,059 [\text{SO}_2] \text{Rh}_{60} + 0,054 \text{Rain}[\text{H}^+] + 0,078 \text{HNO}_3 \text{Rh}_{60} + 0,0258 \text{PM}_{10} \quad (2)$$

	Recessione ( $\mu\text{m}/\text{anno}$ )
Francia	5,6
Magna Grecia	5,5

**$R < 8 \mu\text{m}/\text{anno}$  (soglia di tolleranza)**

\*\*

1) C. Tzanis, C. Varotsos, J. Christodoulakis, J. Tidblad, M. Ferm, A. Ionescu, R.-A. Lefevre, K. Theodorakopoulou<sup>1</sup>, and K. Kreislova – ACP11-2011

2) Kucera et al. MULTI-ASSESS- Publishable Final Report, 2007

\*\* MULTI-ASSESS- Publishable Final Report, 2007

## VETRO



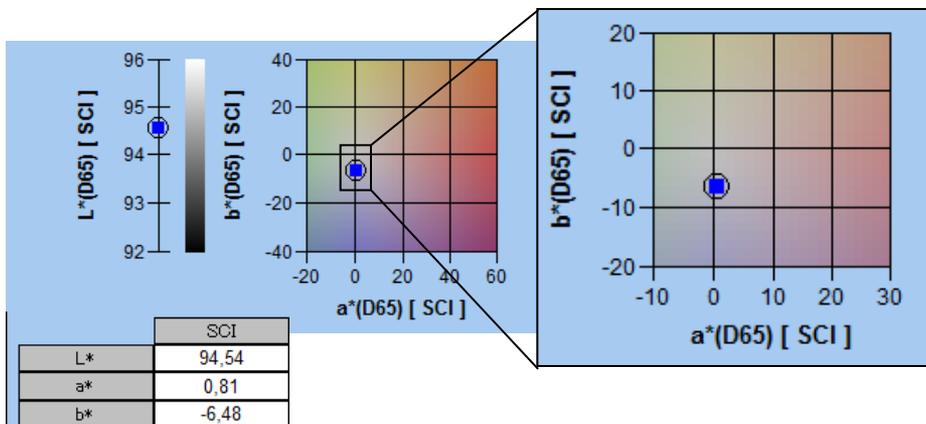
Chiesa di Dio Padre Misericordioso, *Dives in misericordia*

## Risultati preliminari: annerimento vetro

Modalità SCI	$L^*_i$	$a^*_i$	$b^*_i$	$L^*_f$	$a^*_f$	$b^*_f$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E_{ab}^*$	t
Arenula	94,5	0,8	-6,6	91,1	1,0	-4,9	-3,4	0,2	1,7	4	636
Cinecittà	94,5	0,8	-6,6	90,1	1,0	-4,5	-4,4	0,2	2,1	5	646
Cipro	94,5	0,8	-6,6	90,1	1,0	-4,2	-4,4	0,2	2,4	5	638
Francia (Coperto)	94,5	0,8	-6,6	84,3	1,0	-2,4	-10,1	0,2	4,3	11	644
Francia (Scoperto)	94,5	0,8	-6,6	91,8	0,9	-4,8	-2,7	0,1	1,9	3	644
Fermi	94,5	0,8	-6,6	81,7	1,1	-2,1	-12,7	0,3	4,5	14	635
Magna Grecia (Coperto)	94,5	0,8	-6,6	88,0	1,1	-3,8	-6,5	0,3	2,8	7	637
Magna Grecia (Scoperto)	94,5	0,8	-6,6	91,8	1,0	-4,7	-2,7	0,2	1,9	3	637
Villa Ada	94,5	0,8	-6,6	88,1	1,0	-3,5	-6,4	0,2	3,2	7	644

# Confronto dei parametri colorimetrici: prima dell'esposizione e dopo 21 mesi

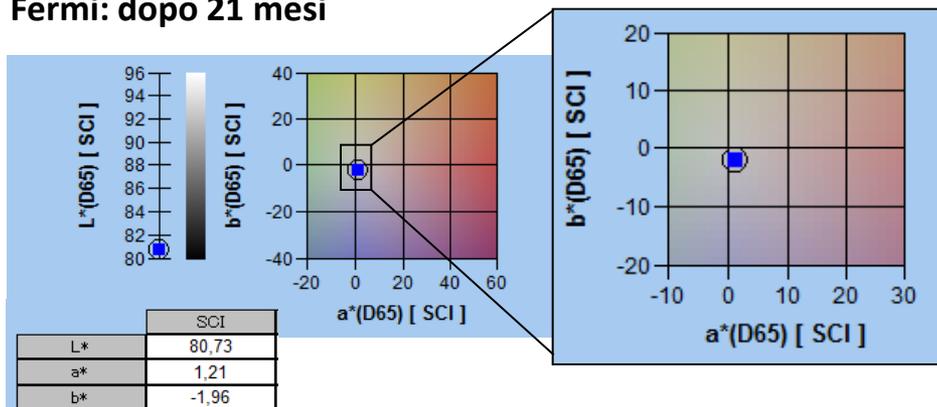
Fermi: prima dell'esposizione



Provino prima dell'esposizione



Fermi: dopo 21 mesi

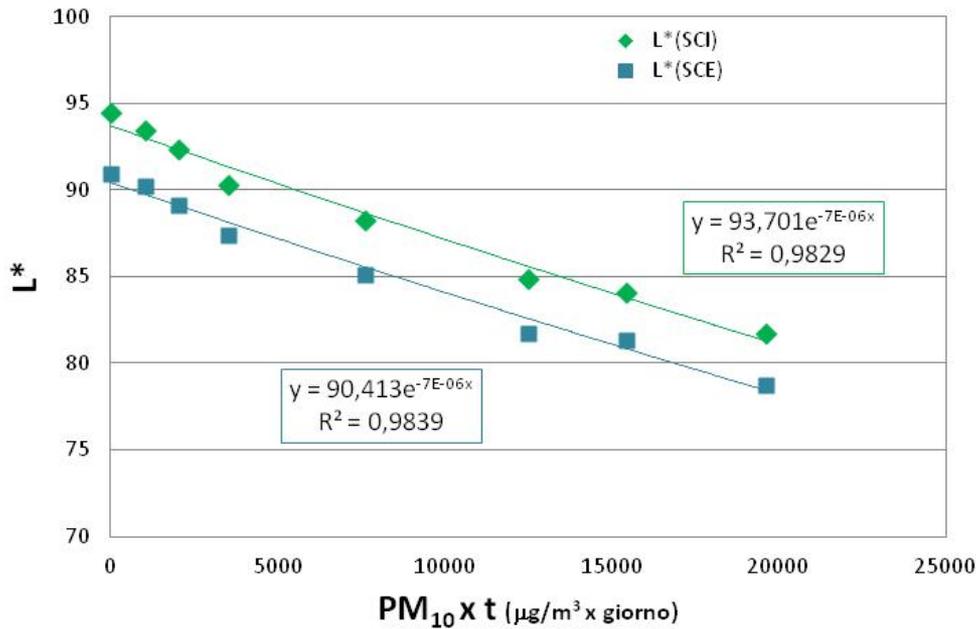


Provino dopo 21 mesi



# Vetro: andamento L\* in funzione di PM<sub>10</sub> e t

Fermi: Andamento L\* vs (PM<sub>10</sub> x t)



	R <sup>2</sup> _ SCI PM <sub>2.5</sub>	R <sup>2</sup> _ SCE PM <sub>2.5</sub>	R <sup>2</sup> _ SCI PM <sub>10</sub>	R <sup>2</sup> _ SCE PM <sub>10</sub>
<b>Arenula</b>	0,86	0,88	0,87	0,89
<b>Cinecittà</b>	0,86	0,88	0,88	0,89
<b>Cipro</b>	0,71	0,69	0,69	0,67
<b>Francia</b>	0,97	0,97	0,98	0,97
<b>Fermi</b>			0,98	0,98
<b>Magna Grecia</b>			0,95	0,95
<b>Villa Ada</b>	0,90	0,89	0,89	0,89

RAME



Chiesa di San Francesco di Sales

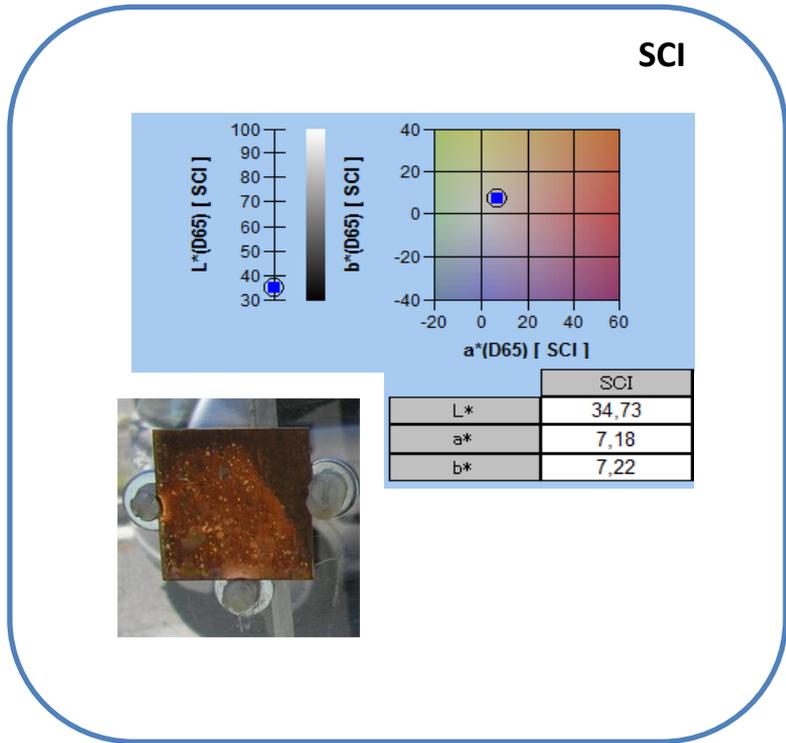
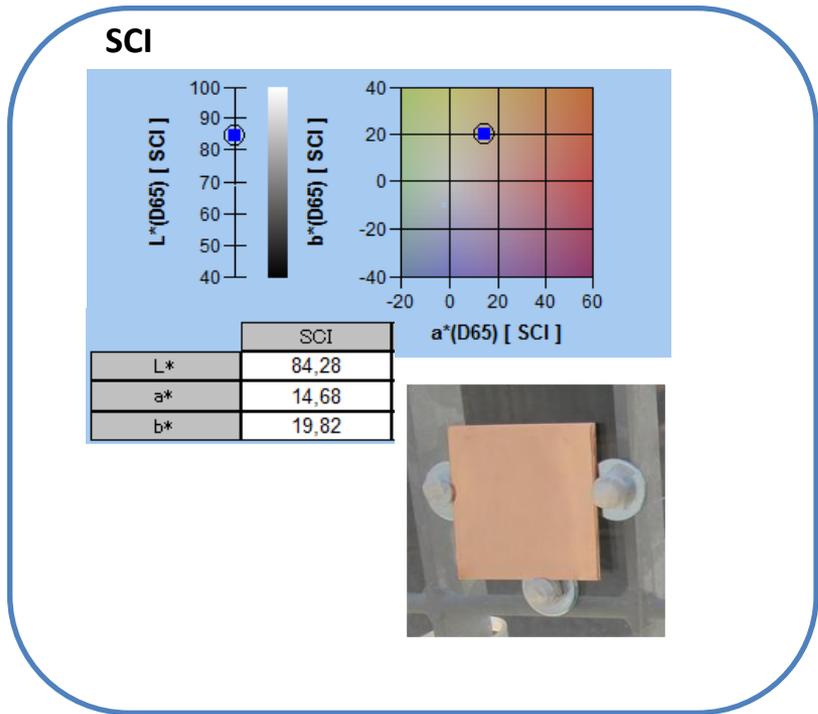
## Risultati preliminari: rame

Modalità SCI	$L^*_i$	$a^*_i$	$b^*_i$	$L^*_f$	$a^*_f$	$b^*_f$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E_{ab}^*$	t
Francia _ coperto	84,4	14,7	19,7	45,6	13,5	21,2	-38,8	-1,2	1,5	<b>39</b>	533
Francia _ scoperto	84,5	14,7	19,8	35,9	7,4	6,7	-48,6	-7,3	-13,1	<b>51</b>	533
Magna Grecia _ coperto	84,4	15,0	20,5	46,9	13,7	23,0	-37,4	-1,3	2,5	<b>38</b>	525
Magna Grecia _ scoperto	84,5	14,7	19,7	44,0	14,4	16,8	-40,5	-0,3	-2,9	<b>41</b>	525

# Confronto rame: Francia prima dell'esposizione e dopo 17 mesi

Francia scoperto: prima dell'esposizione

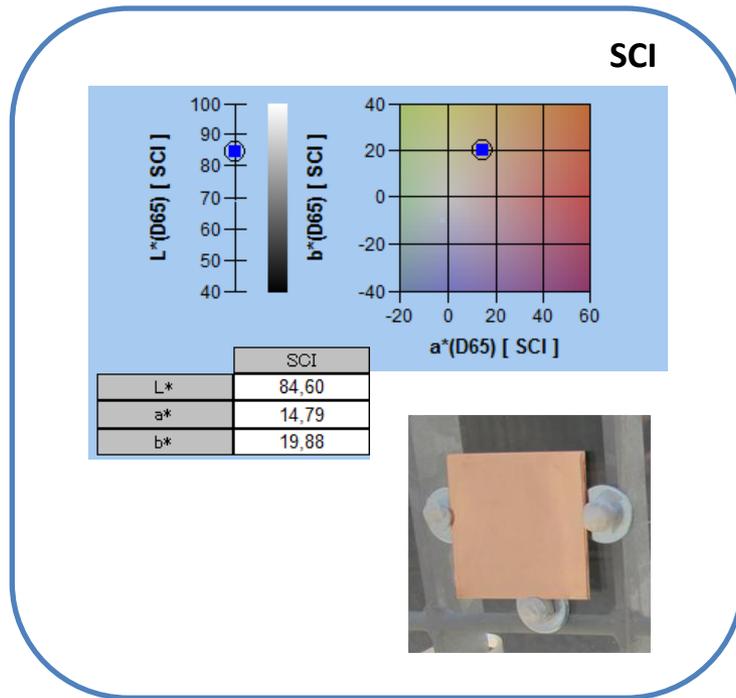
Francia scoperto : dopo 17 mesi



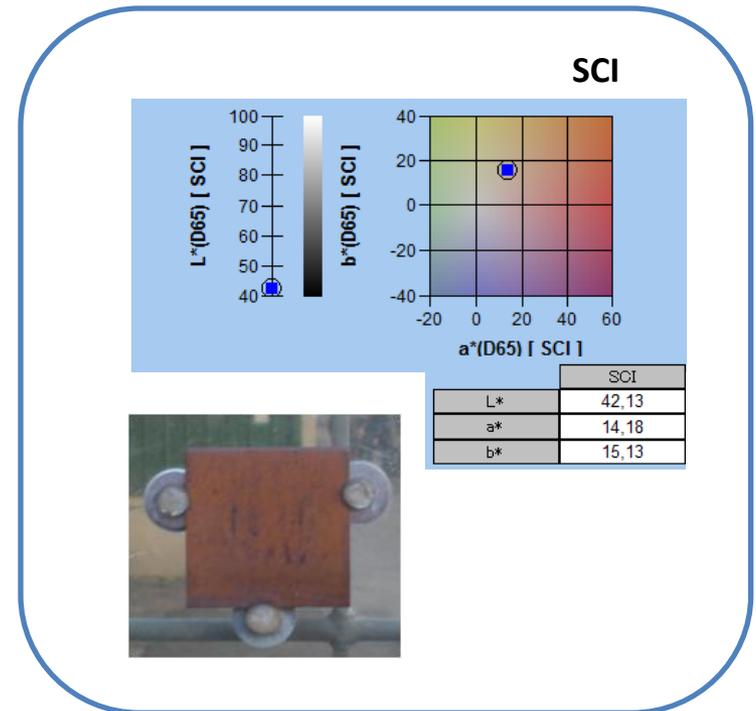
L\*  
a\*  
b\*

# Confronto rame: Magna Grecia prima dell'esposizione e dopo 17 mesi

Magna Grecia scoperto: prima dell'esposizione

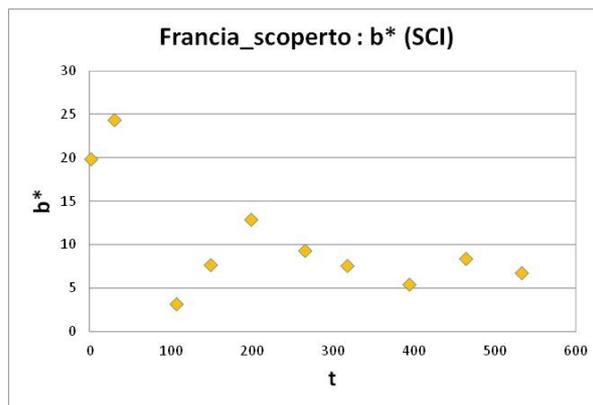
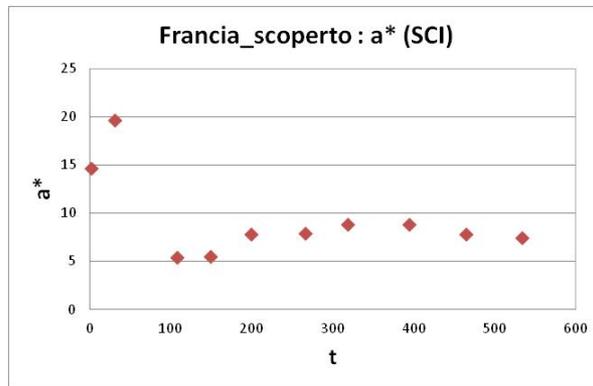
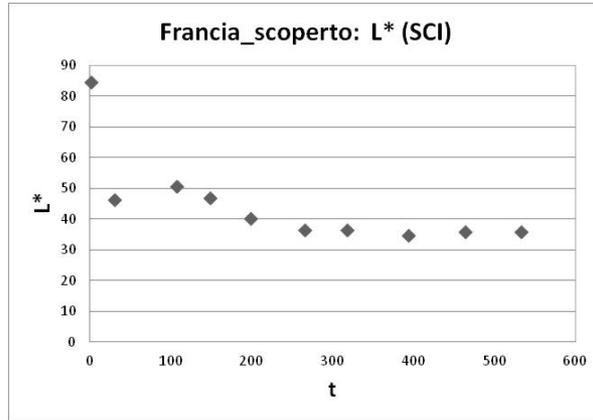


Magna Grecia scoperto: dopo 17 mesi

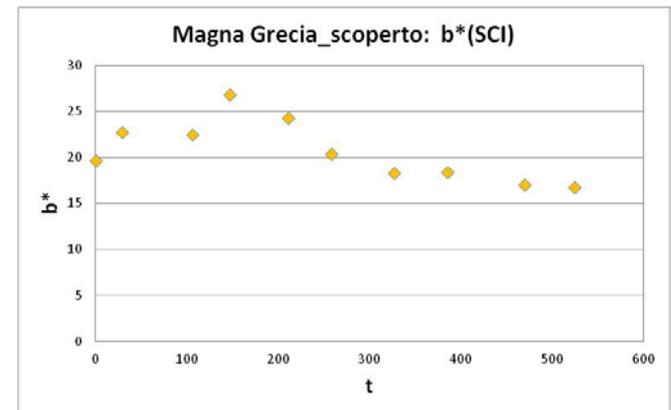
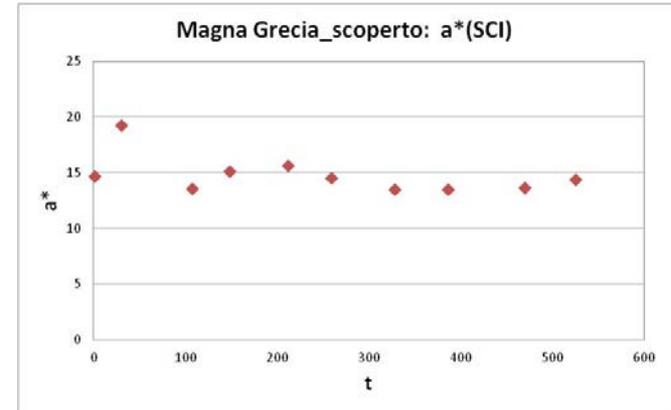
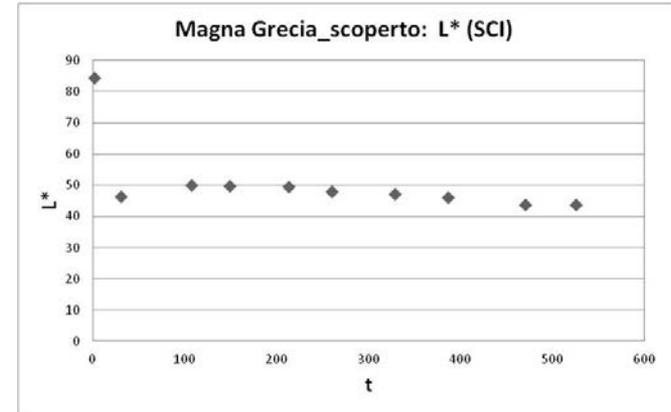


# Andamento $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ in funzione di $t$

Francia



Magna Grecia



# Conclusioni della prima fase di misura

- **Marmo:**
  - leggera diminuzione della luminosità ( $\Delta L$ ) e leggera differenza cromatica ( $\Delta E$ )
  - riduzione esponenziale della luminosità in funzione di ( $PM \times t$ ) con una buona correlazione ( $R^2$ ) nei siti che registrano maggiori concentrazioni di particolato atmosferico
  - perdita di materiale sperimentale ( $3-4 \mu m/anno$ ) al di sotto dei valori accettabili presenti in letteratura
- **Vetro:**
  - significativa diminuzione della luminosità e significative variazioni cromatiche in tutti i siti
  - riduzione esponenziale della luminosità in funzione di ( $PM \times t$ ) con una buona correlazione ( $R^2$ ) in tutti i siti
- **Rame:**
  - significative variazioni cromatiche in entrambi i siti

# Prossime valutazioni

- Calcolo della perdita di materiale sui provini di marmo e di rame
- Studio della correlazione tra luminosità e concentrazione di particolato atmosferico

**Grazie a**

**Fabio Barbini,  
Aldo Di Giulio,  
Carla Gargaruti,  
Stefano Listrani,  
Fabrizio Sacco  
(ARPA Lazio)**

**Antonella De Santis  
(ISPRA)**

