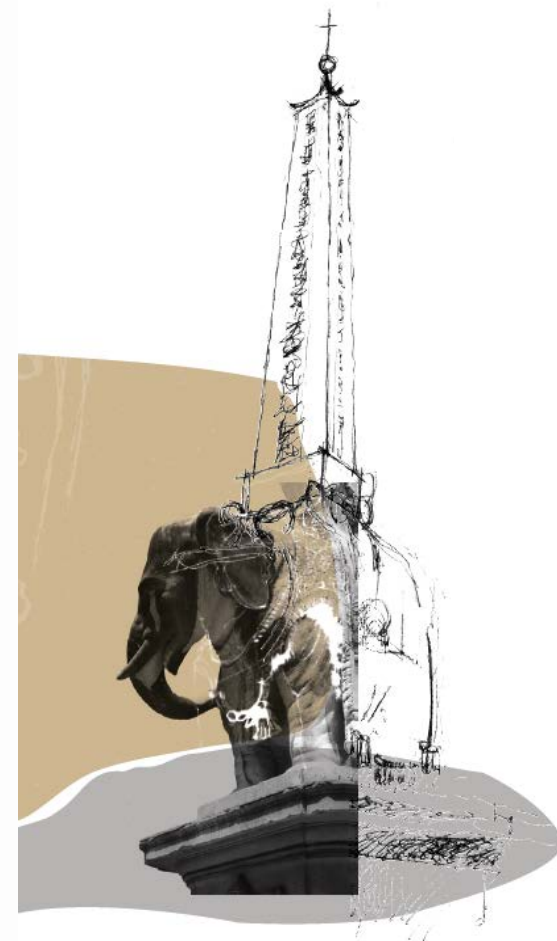


Degrado dei monumenti e inquinamento atmosferico: studio dei processi di annerimento, erosione e corrosione sui materiali costituenti i beni culturali di Roma

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



Ambiente, Materiali, Effetti

Fattori climatici e ambientali

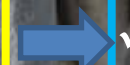
- ✓ Temperatura
- ✓ Umidità relativa
- ✓ Vento
- ✓ Precipitazioni
- ✓ Sale Marino
- ✓ Gas (NO_x , SO_2)
- ✓ Particolato atmosferico

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

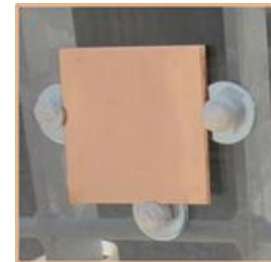
Marmo



Vetro



Rame



I siti

Stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria

Arenula (**fondo** urbano)

Cinecittà (**fondo** urbano)

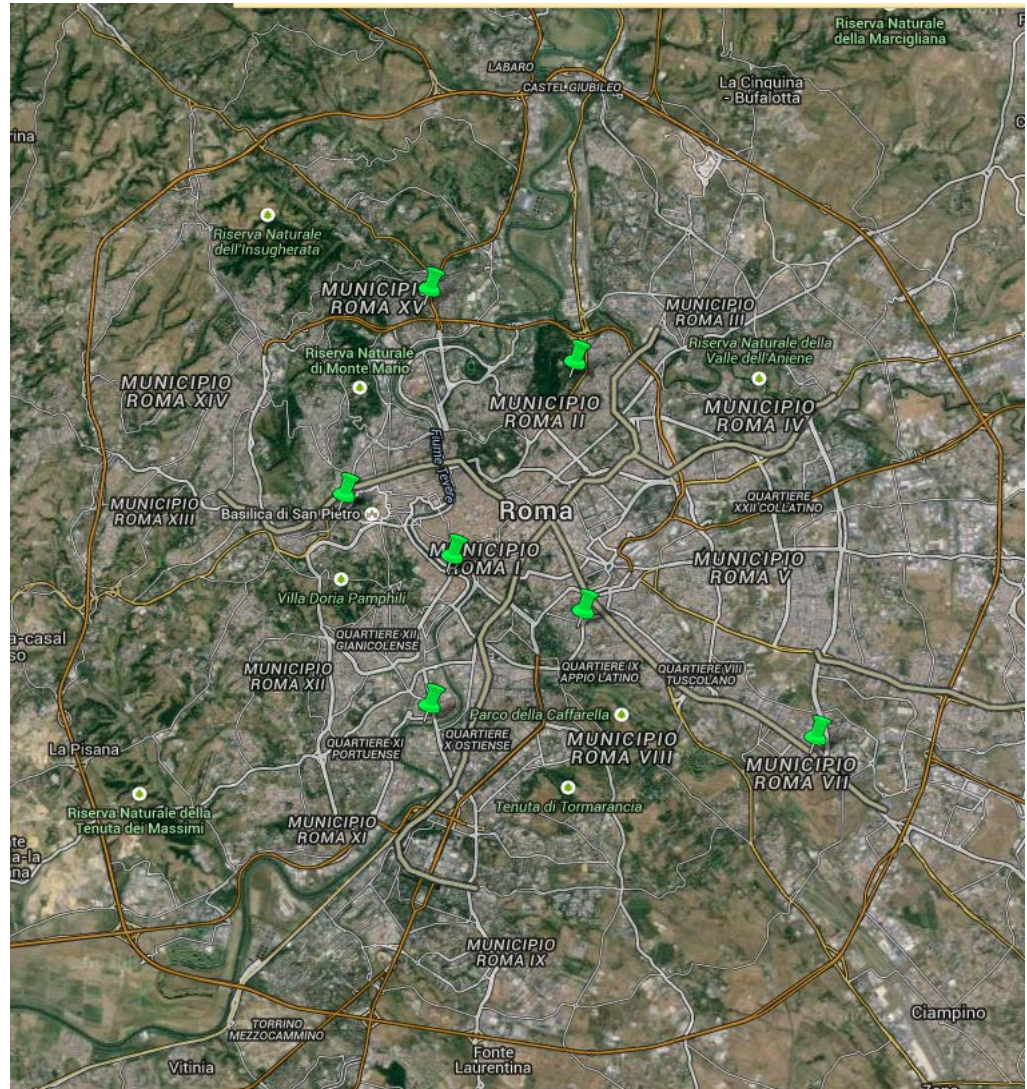
Cipro (**fondo** urbano)

Francia (**traffico** urbano)

Fermi (**traffico** urbano)

Magna Grecia (**traffico** urbano)

Villa Ada (**fondo** urbano)



Caratterizzazione dei siti

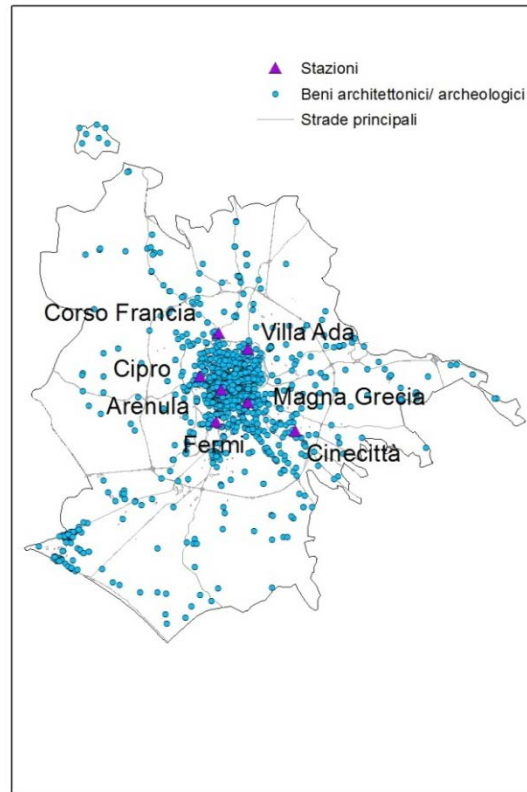
Francia



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

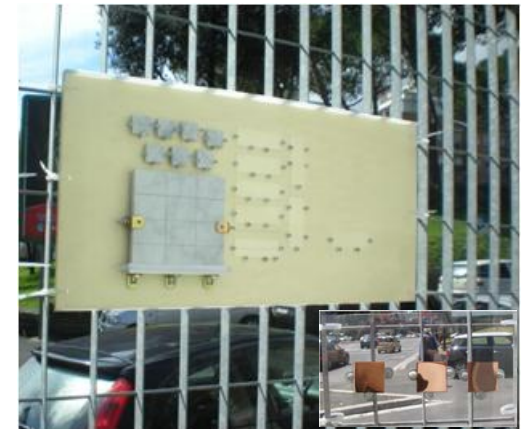
Cinecittà: espositore con tettoia



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})

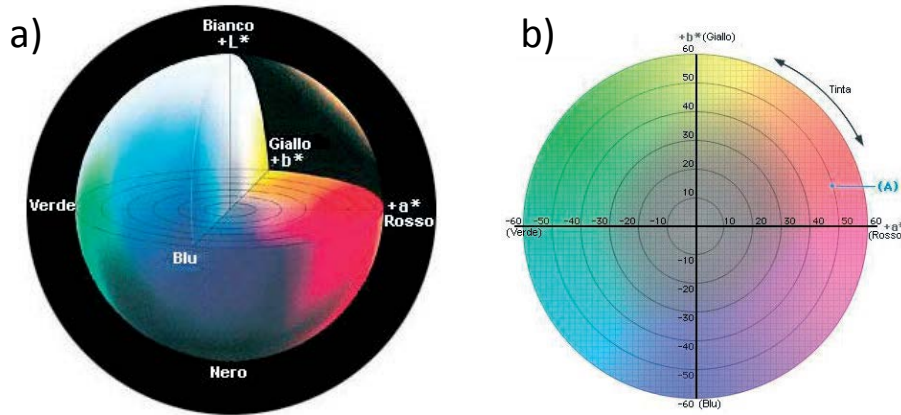
Corrosione (Rame)

- 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)



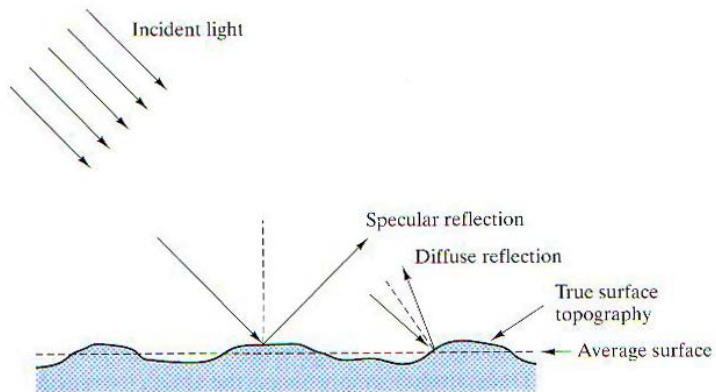
L* (luminosità): da 0 (nero) a 100 (bianco)
a* (cromaticità): + a* → rosso, - a* → verde
b* (cromaticità): + b* → giallo, - b* → blu

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

$\Delta E_{ab}^* > 2$ 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

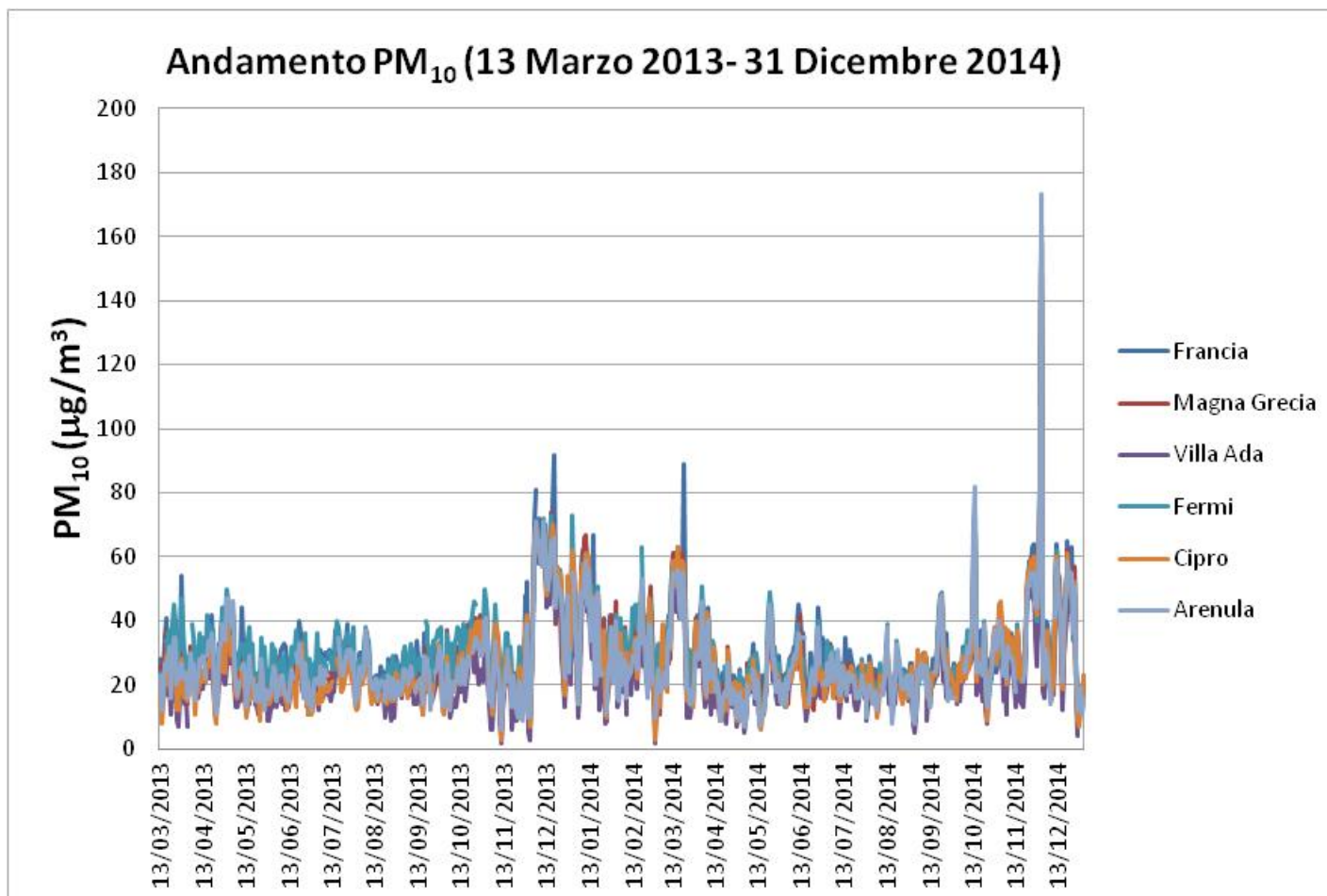
- Misure dei parametri colorimetrici (L^* , a^* e b^*) con cartoncino bianco

RAME

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

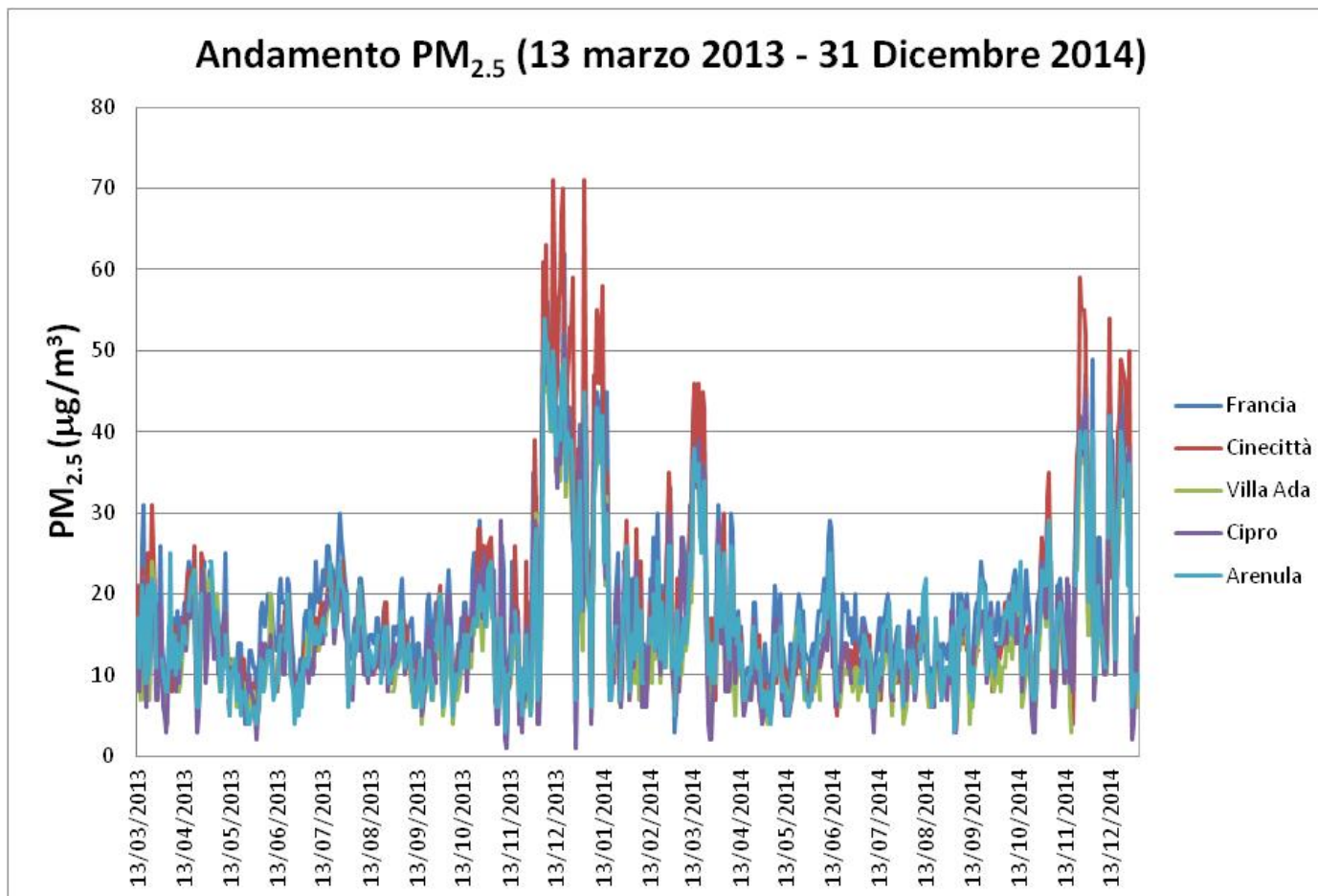


Elaborazioni delle concentrazioni di PM₁₀ a Roma



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

Elaborazioni delle concentrazioni di PM_{2.5} a Roma



	Francia	Cinecittà	Villa Ada	Cipro	Arenula
PM _{2.5} medio (µg/m ³)	19	17	14	15	16

Periodi di misura e concentrazioni medie di PM₁₀ e PM_{2.5}

PM₁₀ (µg/m³)

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_{2.5} (µg/m³)

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

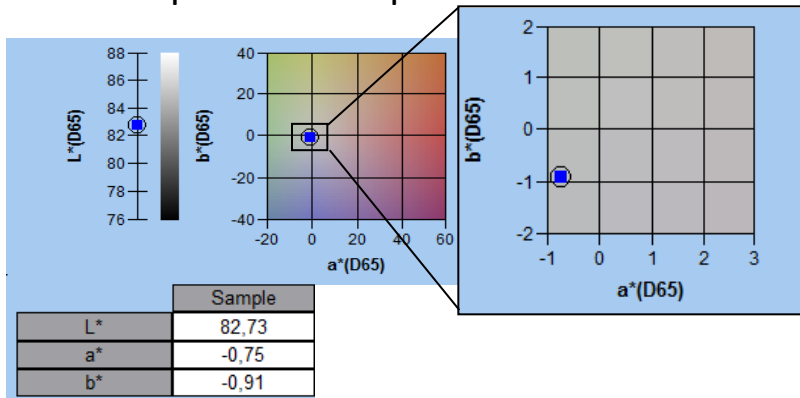
	L^*_i	a^*_i	b^*_i	L^*_f	a^*_f	b^*_f	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{ab}^*	t (giorni)
Arenula	84,5	-0,7	-0,5	83,8	-0,6	-0,1	-0,8	0,1	0,4	1	636
Cinecittà	81,8	-0,80	-0,6	80,0	-0,6	-0,6	-1,8	0,2	0,0	2	646
Cipro *	84,9	-0,6	-0,2	82,5	-0,6	0,3	-2,5	0,1	0,5	3	314
Francia (Coperto)	82,7	-0,8	-0,6	80,2	-0,6	-0,2	-2,4	0,2	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

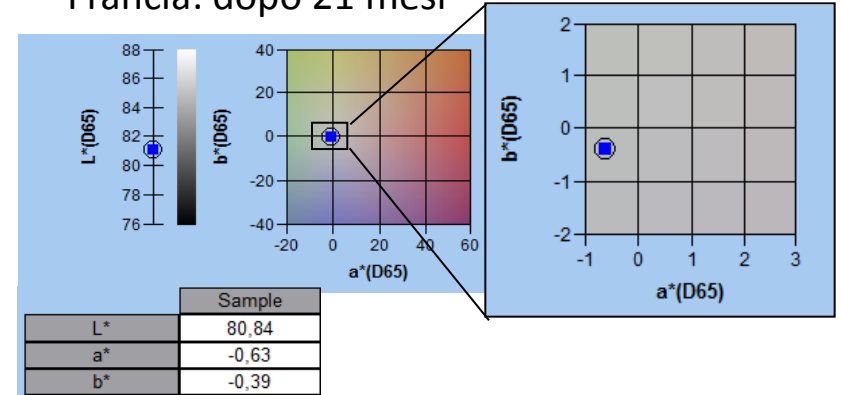
**Villa Ada: Misure dal 13 marzo 2013 al 10 ottobre 2014

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

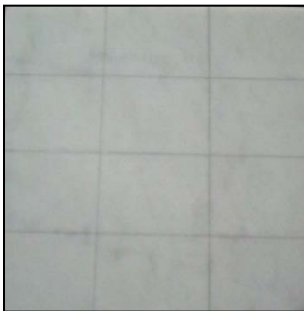
Francia: prima dell'esposizione



Francia: dopo 21 mesi



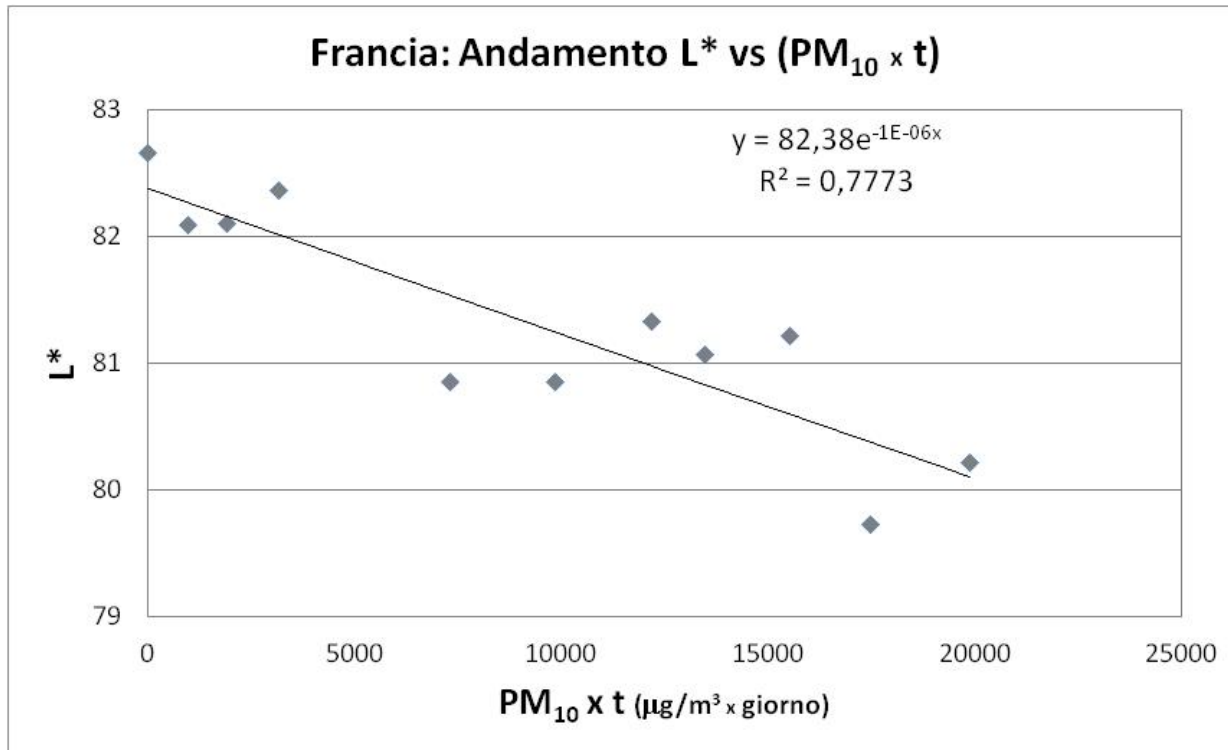
Prima dell'esposizione



Dopo 21 mesi



Marmo: andamento L* in funzione di PM₁₀ e t



	R² (PM_{2,5})	R² (PM₁₀)
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

ΔW (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. Theodorakopoulou¹, and K. Kreislova – ACP11-2011

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

** MULTI-ASSESS- Publishable Final Report, 2007

VETRO



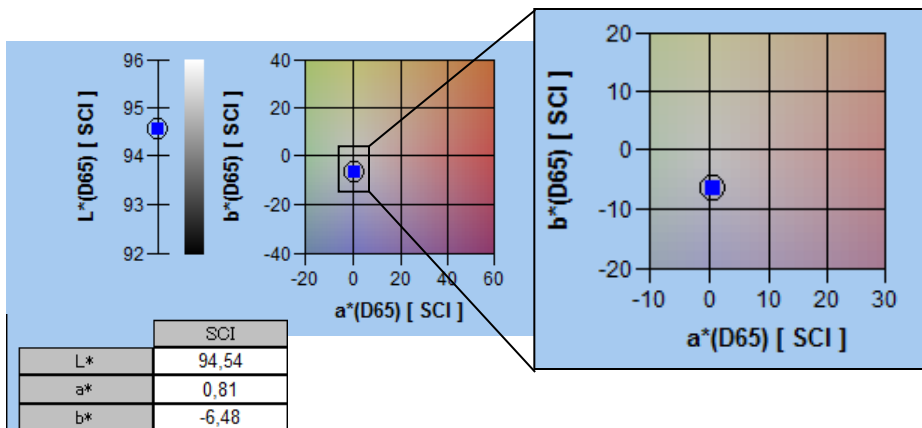
Chiesa di Dio Padre Misericordioso, *Dives in misericordia*

Risultati preliminari: annerimento vetro

Modalità SCI	L^*_i	a^*_i	b^*_i	L^*_f	a^*_f	b^*_f	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{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

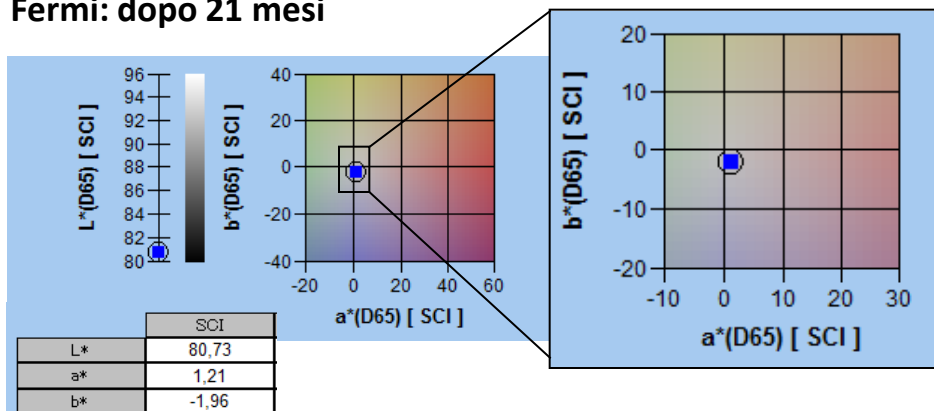
Fermi: prima dell'esposizione



Provino prima dell'esposizione



Fermi: dopo 21 mesi

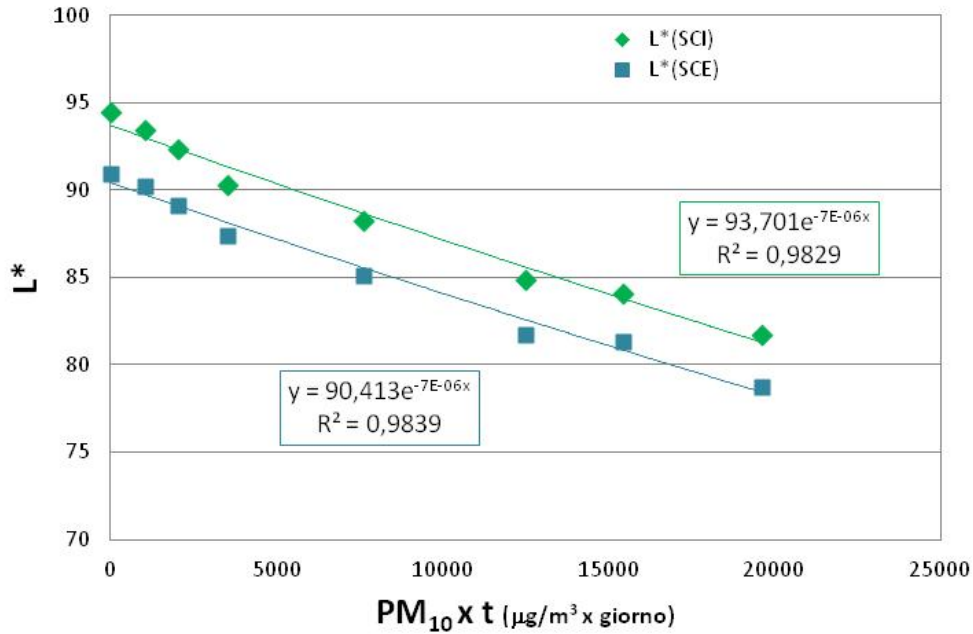


Provino dopo 21 mesi



Vetro: andamento L* in funzione di PM₁₀ e t

Fermi: Andamento L* vs (PM₁₀ x t)



	R ² _ SCI PM _{2.5}	R ² _ SCE PM _{2.5}	R ² _ SCI PM ₁₀	R ² _ SCE PM ₁₀
Arenula	0,86	0,88	0,87	0,89
Cinecittà	0,86	0,88	0,88	0,89
Cipro	0,71	0,69	0,69	0,67
Francia	0,97	0,97	0,98	0,97
Fermi			0,98	0,98
Magna Grecia			0,95	0,95
Villa Ada	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	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{ab}^*	t
Francia _ coperto	84,4	14,7	19,7	45,6	13,5	21,2	-38,8	-1,2	1,5	39	533
Francia _ scoperto	84,5	14,7	19,8	35,9	7,4	6,7	-48,6	-7,3	-13,1	51	533
Magna Grecia _ coperto	84,4	15,0	20,5	46,9	13,7	23,0	-37,4	-1,3	2,5	38	525
Magna Grecia _ scoperto	84,5	14,7	19,7	44,0	14,4	16,8	-40,5	-0,3	-2,9	41	525

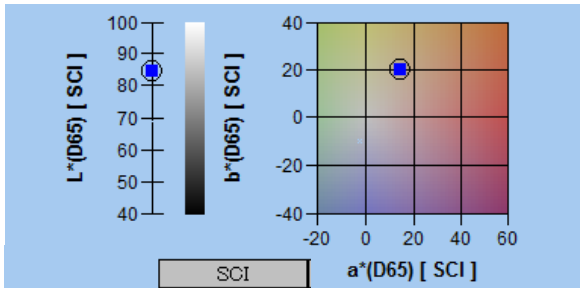
Confronto rame: Francia prima dell'esposizione e dopo 17 mesi

1/2

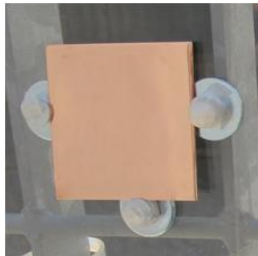
Francia scoperto: prima dell'esposizione

Francia scoperto : dopo 17 mesi

SCI

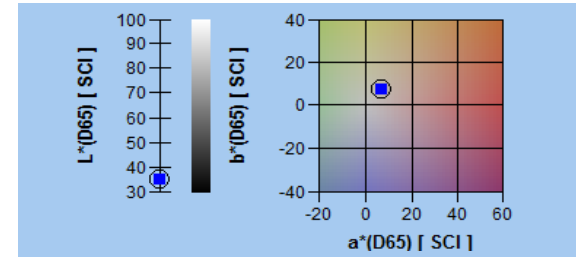


	SCI
L*	84,28
a*	14,68
b*	19,82



L*
a*
b*

SCI

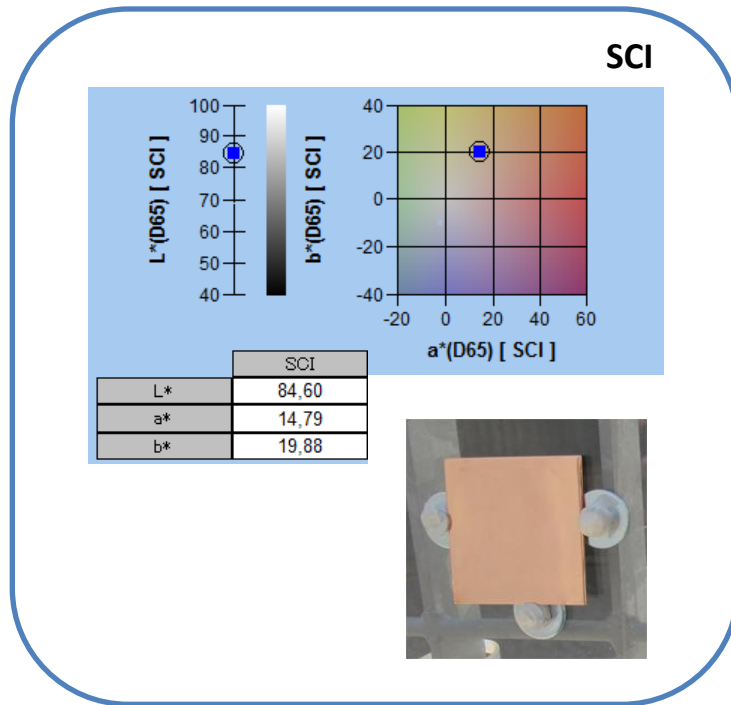


	SCI
L*	34,73
a*	7,18
b*	7,22

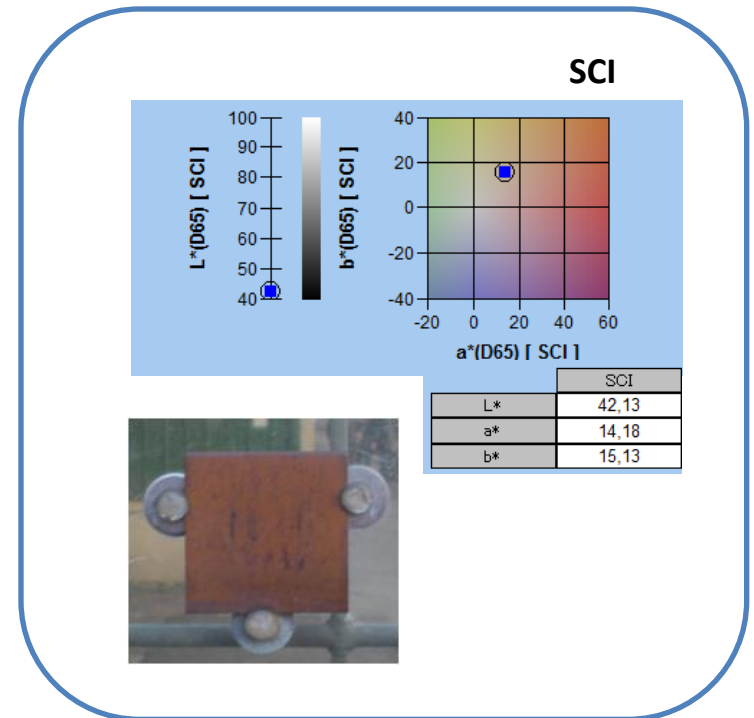


Confronto rame: Magna Grecia prima dell'esposizione e dopo 17 mesi

Magna Grecia scoperto: prima dell'esposizione



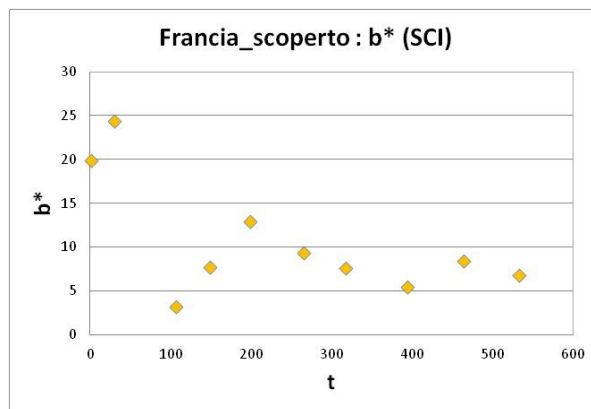
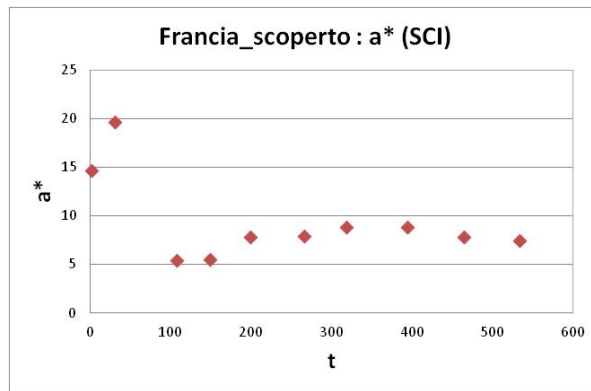
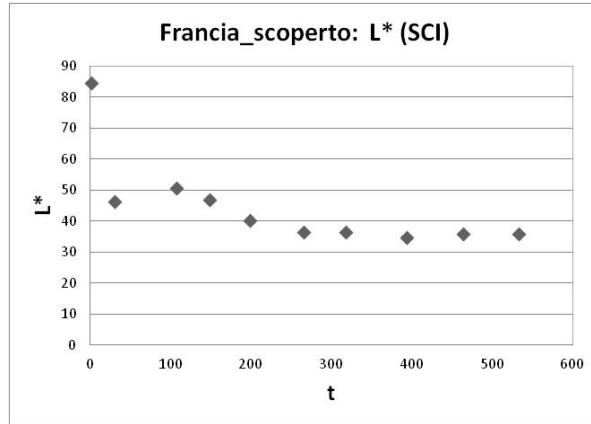
Magna Grecia scoperto: dopo 17 mesi



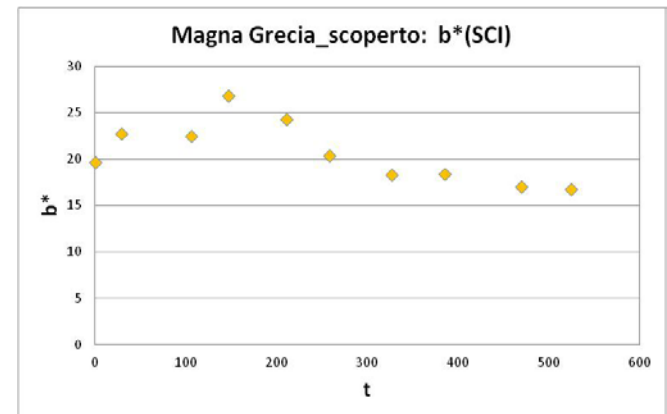
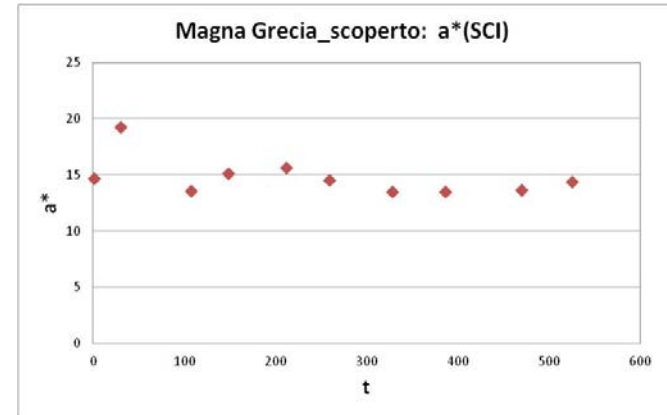
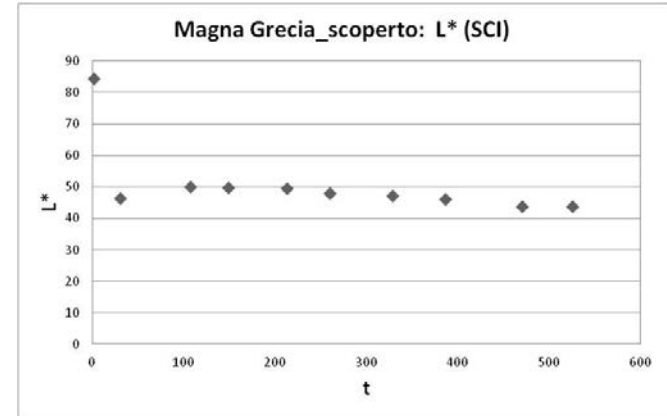
L*
a*
b*

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

Francia



Magna Grecia



Conclusioni della prima fase di misura

- **Marmo:**
 - leggera diminuzione della luminosità (ΔL) e leggera differenza cromatica (ΔE)
 - 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)**

