

Tecnologie digitali per la diagnostica dello stato di conservazione dei beni culturali

Roberta Fantoni
roberta.fantoni@enea.it



3 aprile 2019 - ore 15.00

IN BREVE

1. **Introduzione alle tecnologie digitali: imaging in situ o remoto per superfici di BC**
2. **Tecnologie laser da utilizzare *in situ* o remotamente**
 - **Informazioni sulla superficie: Morfologia, Composizione chimica, Stratigrafia**
 - **Processamento di immagini e dati spettroscopici**
3. **Esempi di applicazioni in campagne dimostrative per il trasferimento tecnologico su progetti della Regione Lazio:**
 - **i prototipi ENEA realizzati ed utilizzati**
 - **Le applicazioni su siti di interesse regionale in risposta a specifici problemi degli stakeholders**

1.1 Introduzione alle tecnologie digitali

Imaging *in situ* o remoto per superfici di BC

- Che cosa era disponibile prima del digitale? Raccolta dati puntuale, riferimenti su grafici, disegni, stampe fotografiche.
- Le tecnologie digitali attuali consentono l'acquisizione di dati in forma di immagini 2D o modelli 3D.

Il digitale consente:

- Processamento automatico o semiautomatico dei dati (es. trasformazione di più immagini monocromatiche in una in falsi colori)
- Conservazione e condivisione dei dati su supporto informatico
- Fruizione dei dati, sia per studio che per diletto

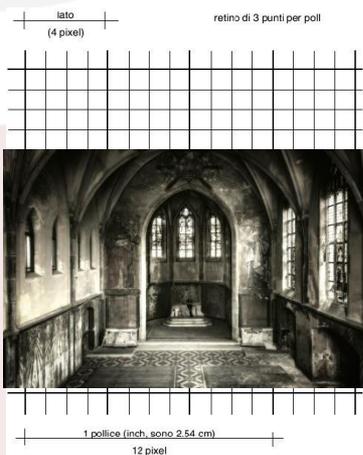
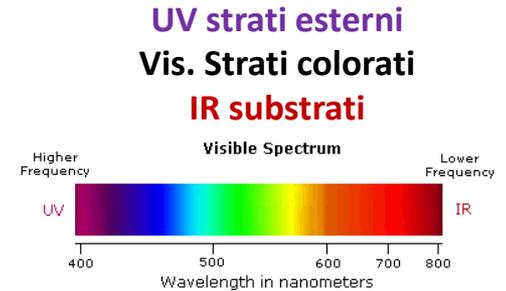


Immagine monocromatica:
ad ogni pixel (x,y) corrisponde
un valore di intensità nella
scala di grigi

1.2 Principali tecnologie digitali applicate ai BC

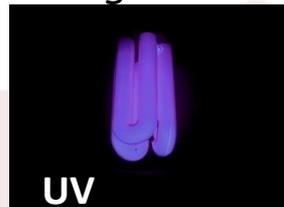
Limitandoci alle tecnologie di imaging macroscopico abbiamo varie famiglie:

- Imaging acustico (radar, sonar) per ottenere informazioni sulla struttura sottostante o subacquee
- Fotogrammetria, remotizzabile da aereo o drone
- Imaging in diverse regioni spettrali:



- Radiografie X, gamma e neutroniche, per informazioni sugli strati profondi
- Imaging iperspettrale (dall'UV all'IR), multispettrale nel visibile
- Imaging di fluorescenza (eccitato nell'UV e rivelato nel visibile)
- Termografia (eccitata nell'infrarosso e rivelata nella stessa regione)

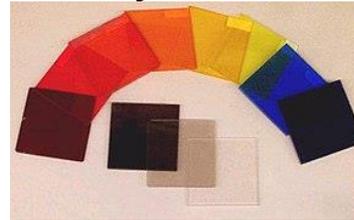
sorgenti



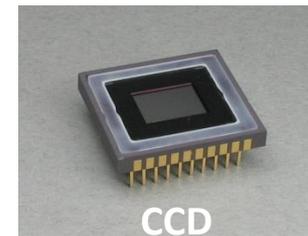
bersaglio



filtri



rivelatori



1.3 Problematiche relative alle superfici di BC



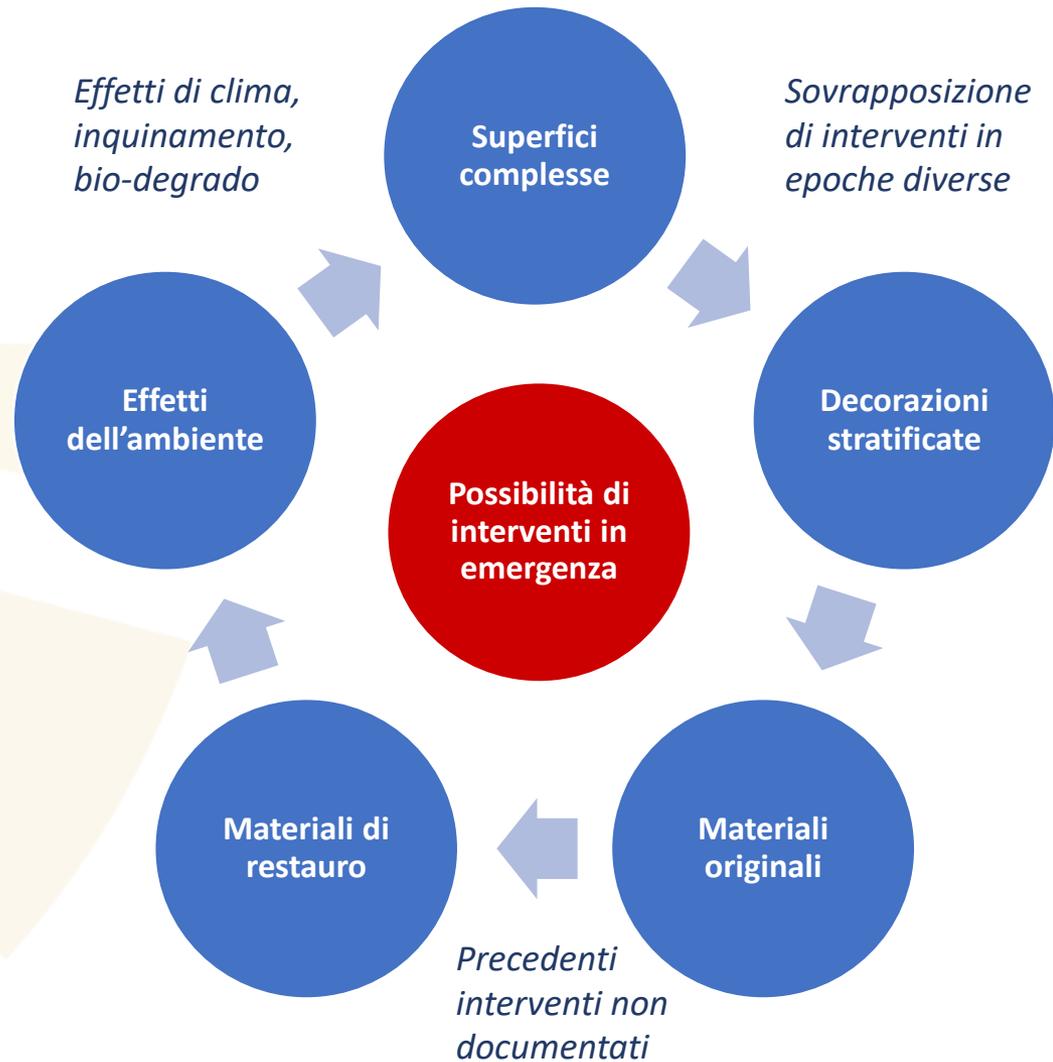
Monastero di Sucevița – Bucovina 2006

Per i BC si richiede:

- Conoscenza storica
- Minima invasività
- Rapidità di operazione
- Archiviazione dei risultati
- Pianificazione periodica degli interventi (conservazione preventiva)



Posizionamento di sensori in fibra ottica su opere provvisorie post-sisma



1.4 Stato dell'arte nell'imaging per i BC

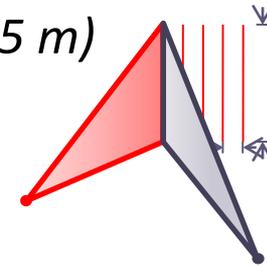
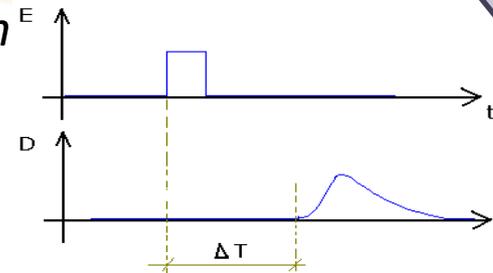
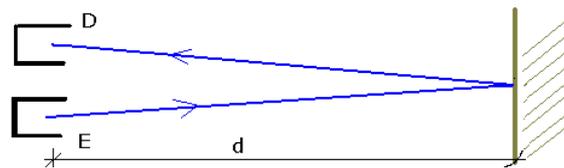
Tecnica	Pro	Contro
Fotogrammetria 	Veloce, facile, economica	Calibrazione complessa, 2D facile, 3D da elaborare, ottimale da vicino
Laser scanner monocromatici 	Veloci a bassa risoluzione, adatti a grandi distanze	Non danno immagini a colore native
Xray imaging	Info. sub-superficiali (strutturali, metalli)	dati alla superficie non risolti
IR imaging, termografia	Info. sub-superficiali (strutturali, infiltrazioni d'acqua)	Scarsa specificità alle componenti superficiali
UV fluorescence imaging	Veloce, economica	Poco selettiva, rivela solo specie fluorescenti
Riflettanza iperspettrale	Veloce, economica	ottimale da vicino, Complessa calibrazione
THz assorbimento/riflessione	Info. sub-superficiali (acqua, metalli)	Tecnica di contatto, Scarsa specificità

2.1 Imaging laser

La disponibilità di sorgenti laser nelle diverse regioni spettrali dall'UV all'IR, accoppiata a sistemi di scansione rapidi e precisi, ha permesso lo sviluppo di sistemi laser radar per acquisire immagini spettroscopiche 2D e modelli 3D

1. Sistemi in luce strutturata (triangolazione + ottica diffrattiva) *adatti a raccogliere modelli 3D di piccoli oggetti vicini (1-5 m)*

2. Sistemi a tempo di volo (tipo lidar) *per modellare grandi oggetti lontani > 100 m*



3. Sistemi a modulazione d'ampiezza con misura dello sfasamento



*consentono alta
risoluzione < 1mm
per medie distanze
(5 – 30 m)*

2.2 Interazioni laser superficie

Quando un fascio di radiazione monocromatica (laser) incide su una superficie si possono verificare una serie di fenomeni, più o meno probabili in funzione dell'energia incidente, che regolano il destino dell'energia depositata.

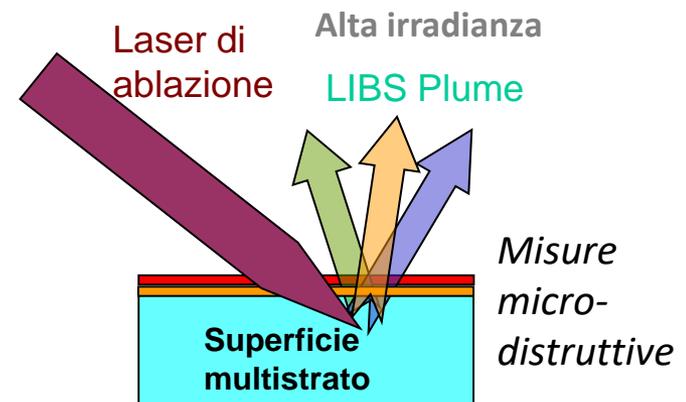
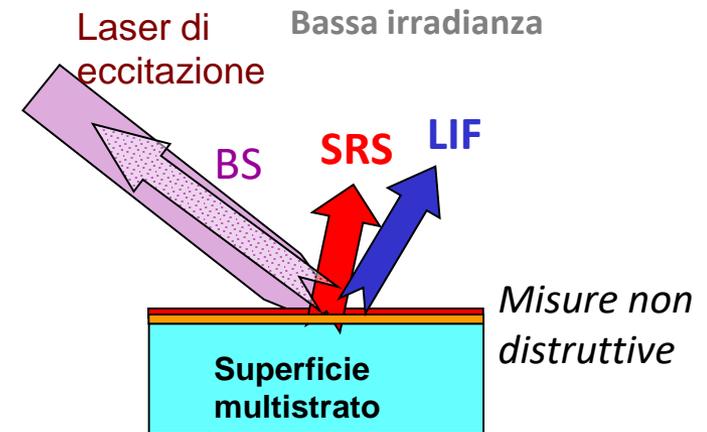
A seguito dell'assorbimento, in ordine crescente di irradianza (potenza per unità di superficie) abbiamo:

Back Scattering (**BS**) o retroriflessione alla stessa lunghezza d'onda di eccitazione;

- Fluorescenza indotta da laser (**LIF**) a lunghezze d'onda superiori a quella incidente, con spostamenti legati alle differenze di energia fra stati elettronici accoppiati tramite processi di rilassamento interno;

- Scattering Raman di Stokes (**SRS**), a lunghezze d'onda superiori a quella incidente, con spostamenti legati ai modi vibrazionali sulla superficie;

- Breakdown indotto da laser (**LIBS**) con emissioni atomiche nel plasma generato sulla superficie durante un processo di ablazione/ionizzazione al di sopra della soglia di innesco ($\sim 1 \text{ GW/cm}^2$).



Irradianza laser

Soglia di ablazione

2.3 I sistemi laser scanner per imaging digitale remoto

Vantaggi

- Non distruttivi e non invasivi / micro-distruttivi (LIBS)
- Auto illuminanti
- Insensibili alla luce ambiente
- Tengono conto di correzioni geometriche e calibrazioni in situ
- Permettono il processamento software automatico di grandi basi di dati
- Utilizzabili come riferimento in archivi digitali

Novità

- Possibile uso integrato di più di un prototipo, con integrazione hardware o software
- Integrabili con diversi tipi di sensori puntuali utilizzati *in situ*
- La diagnostica di superficie si accoppia alla possibilità di fruizione virtuale
- Adatti allo sviluppo di algoritmi per realtà aumentata

2.4 Informazioni dalle tecniche laser remote

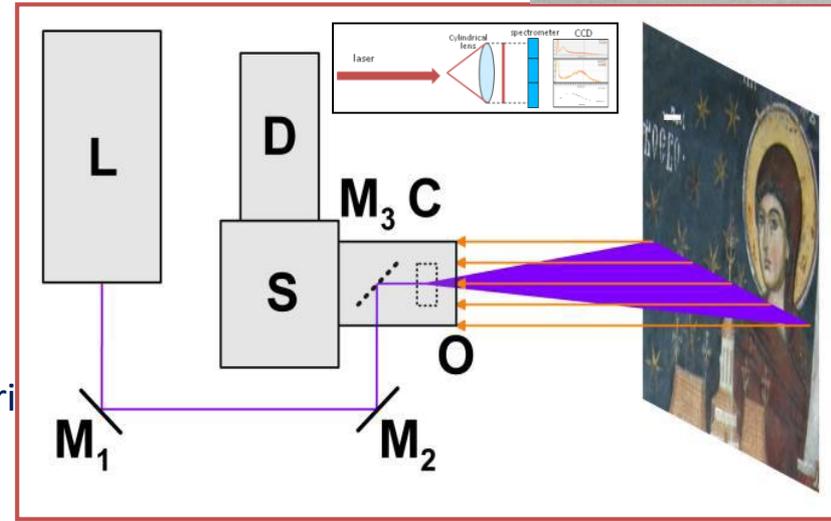
Tecnica	Tipo di misura	Informazione
Laser scanner tricromatici	Modello 3D ad alta risoluzione	Morfologia remota
“ “ “	Riflettanza a tre lunghezze d'onda	Colorimetria remota
LIF imaging	Emissione di fluorescenza indotta da laser UV	Distribuzione specie fluorescenti (consolidanti, vernici)
SR-LIF e TR-LIF	Spettro e decadimento della fluorescenza	Identificazione delle specie fluorescenti (consolidanti, biodegrado)
Spettroscopia Raman	Spettri vibrazionali di gruppi molecolari	Identificazione delle molecole Raman attive (pigmenti inorganici ed organici)
LIBS	Emissione atomica	Composizione atomica delle specie superficiali
“	Emissione atomica dopo ablazione superficiale	Stratigrafia remota

2.5 Immagini, spettri e decadimenti temporali



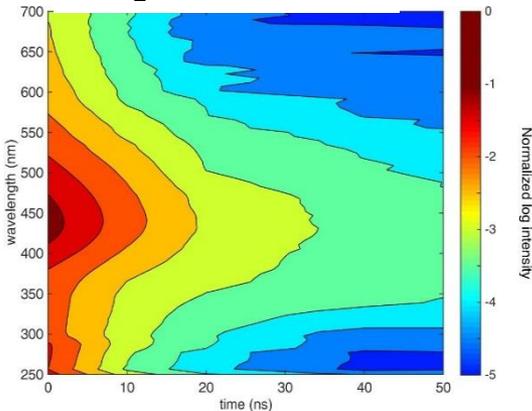
Disponendo di un rivelatore a matrice (CCD) si possono raccogliere immagini bidimensionali, accoppiandolo con un elemento disperdente (prisma, fenditura) o con un sistema di gate temporale (ritardo variabile) si possono ottenere righe su una dimensione e spettri o decadimenti temporali nell'altra.

L'esempio mostra l'acquisizione di immagini-spettri per una scansione con lama di luce incrociata ad una fenditura.

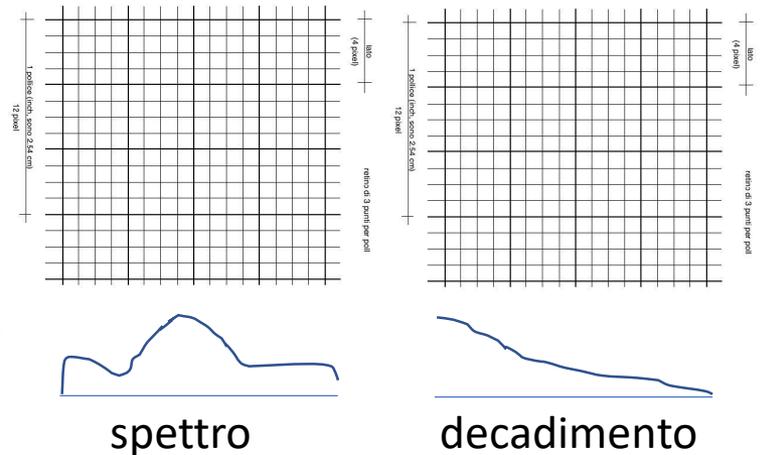
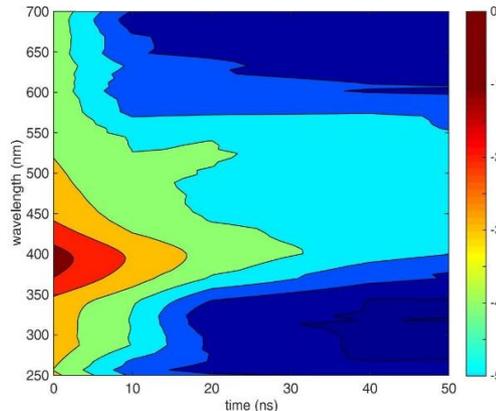


Utilizzando il sensore per raccogliere dati puntuali nelle due direzioni possiamo ottenere mappe (λ, τ)

TiO₂ + olio di lino



ZnO + olio di lino



Spettri risolti in tempo di due coloranti bianchi

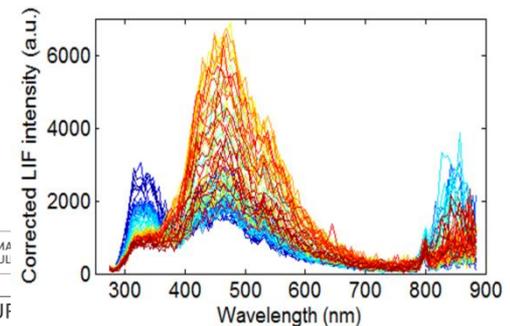
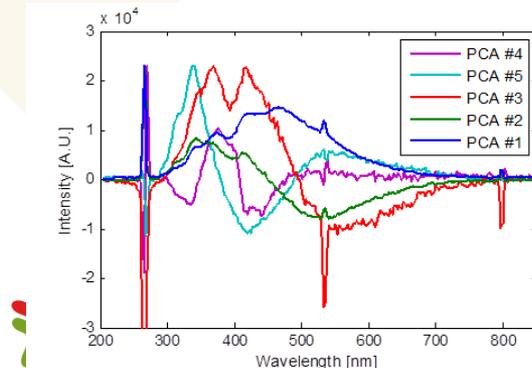
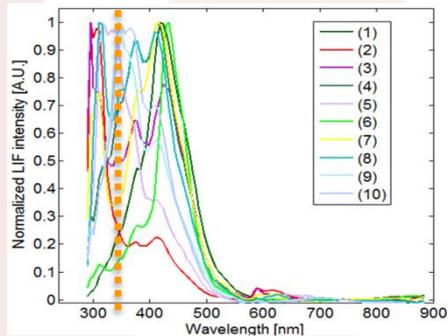
2.6 Trattamento dei dati spettroscopici

acronimo	Tecnica di processamento
PCA	Principal Component Analysis Trasformazione lineare delle variabili in ingresso: massimizza la varianza associata a ciascuna variabile in uscita.
SAM	Spectral Angle Mapper Operatore di proiezione su ciascun canale spettrale che misura in termini di "distanza" la differenza fra gli spettri.
MCR	Multi Curve Resolution Analysis Decomporre un gran numero di spettri in componenti semplici tramite appropriate condizioni che permettono di rappresentarle con curve significative

$$\alpha = \cos^{-1}(\hat{u}, \hat{w}) = \frac{\sum_{i=1}^N u_i w_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2 \sum_{i=1}^N w_i^2}}$$

PCA
$$x_{ik} = \bar{x}_k + \sum_{\ell=1}^N p_{\ell k} t_{i\ell} + e_{ik}$$

$$e_{ij} = 1 - \frac{\sqrt{\int (s_i(x) - s_j(x))^2 dx}}{\sqrt{\frac{1}{N} \int \sum_j^N s_j^2(x) dx}}$$



2.7 Integrazione dati

Le informazioni raccolte in formato digitale sono adatte ad essere sovrapposte per un'analisi integrata anche se ottenute in formati differenti su aree non omogenee e con risoluzioni non confrontabili.

Modelli 3D
multidimensionali

geometria, morfologia, colore

Archiviazione e Fruizione dei dati su un modello a «cipolla» che consente di raggiungere il livello di dettaglio dell'informazione cercata secondo le esigenze dell'utente (esperto o occasionale)



Compatibilità con H-BIM per la manutenzione di edifici storici

distribuzione spaziale

Immagini 2D
monocromatiche
o in falsi colori

Composizione chimica

Dati spettroscopici
puntuali

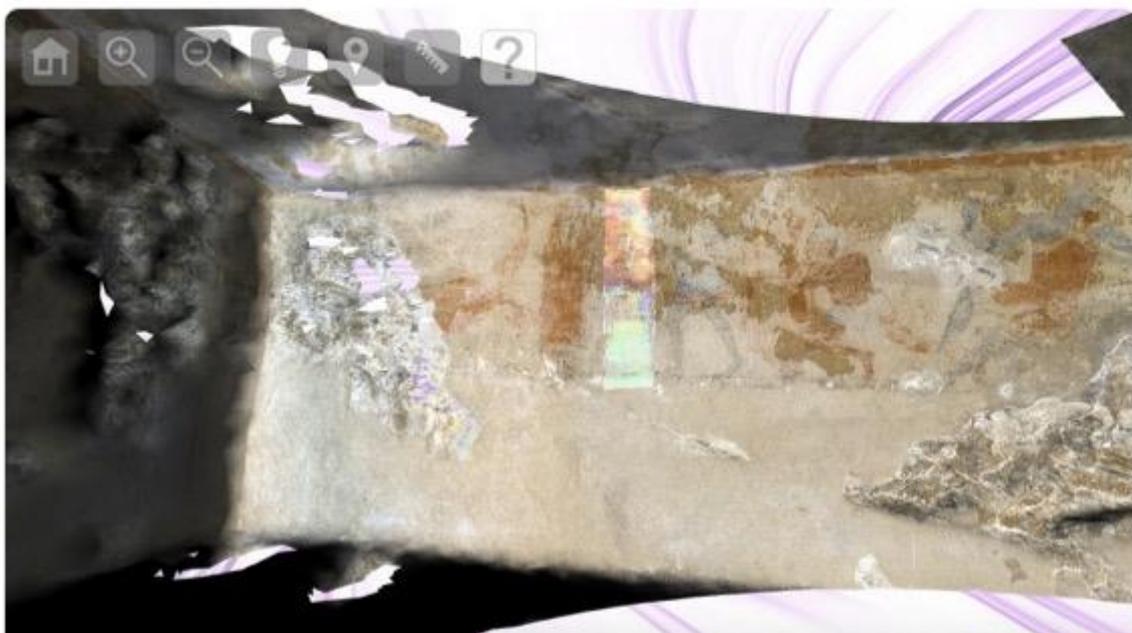
2.8 FRUIZIONE IN RETE DI TUTTE LE INFORMAZIONI DIGITALI

Piattaforma web per la condivisione attiva di dati sperimentali multidisciplinari ENEA attraverso la rete digitale GARR

a cura di Sofia Ceccarelli

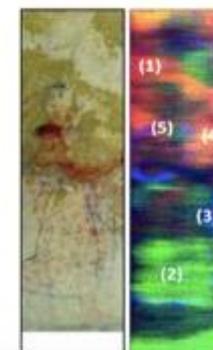


Tomba dei Demoni Azzurri (Tarquinia)



Infos

**Analisi LIF
(Laser Induced Fluorescence)**



[Link al filmato di Sofia Ceccarelli](#)

3.1 I progetti di innovazione e trasferimento tecnologico della Regione Lazio



Precedente progetto COBRA

Obiettivo: Sviluppo e disseminazione di metodi, tecnologie e metodologie avanzate per la conservazione di beni culturali, basata sull'applicazione di radiazioni e tecnologie abilitanti.

Partecipanti: ENEA

Periodo: 21 lug.2015 – 20 dic. 2017



Sviluppo e diffusione di metodi, tecnologie e strumenti avanzati per la **CO**nservazione dei **B**eni culturali, basati sull'applicazione di **R**adiazioni e di tecnologie **A**bitanti

Progetto ADAMO del DTC in corso

Obiettivi: Trasferimento tecnologico; Servizi alle imprese; Dimostrazioni su casi di studio selezionati; Sviluppo di prototipi e test di prodotti innovativi.

Partecipanti: ENEA, INFN, CNR, Uni. Roma Sapienza, Uni Roma Tor Vergata, Uni. Roma Tre, Uni. Tuscia

Periodo: 2 ott.2018 – 2 gen. 2020

Progettoadamo.enea.it



A·D·A·M·O

TECNOLOGIE DI ANALISI, DIAGNOSTICA E MONITORAGGIO PER LA CONSERVAZIONE E IL RESTAURO DI BENI CULTURALI



UN INVESTIMENTO PER IL TUO FUTURO



3.2 I siti di progetto e le problematiche degli stake-holder del Lazio



Sviluppo e diffusione di metodi, tecnologie e strumenti avanzati per la Conservazione dei Beni culturali, basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti



Interventi su 25 siti regionali, eseguiti su richiesta degli Stake-holders (gestori, imprese di conservazione)

Interventi pianificati su 11 siti nella zona sud-est di Roma, in collaborazione con gli Stake-holders, accompagnati da un'analisi di contesto socio-economico.

Tombe e catacombe

Conservazione di affreschi

Bio-degrado, precedenti interventi

Siti archeologici

Identificazione di frammenti

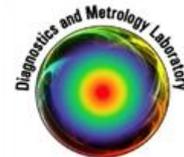
Materiali originali, condizioni ambientali

Musei, chiese, palazzi, pinacoteche

Conservazione di statue e dipinti

Materiali originali, integrazioni e ritocchi

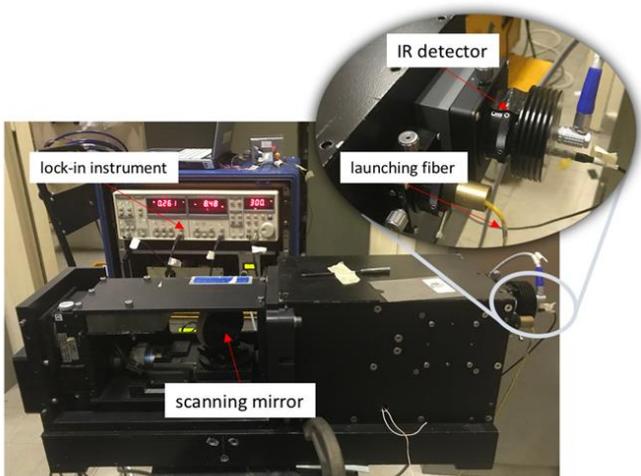
3.3 Prototipi di laser scanner ENEA utilizzati *in-situ*



Laser scanner RGB-ITR a colori



Sistemi LIF



Laser scanner IR-ITR a 1.55 μm

LIBS - Raman

3.4 La conservazione di affreschi nelle catacombe

DOMANDA: Può l'acquisizione di modelli digitali aiutare a contrastare la perdita delle immagini per decolorazione?



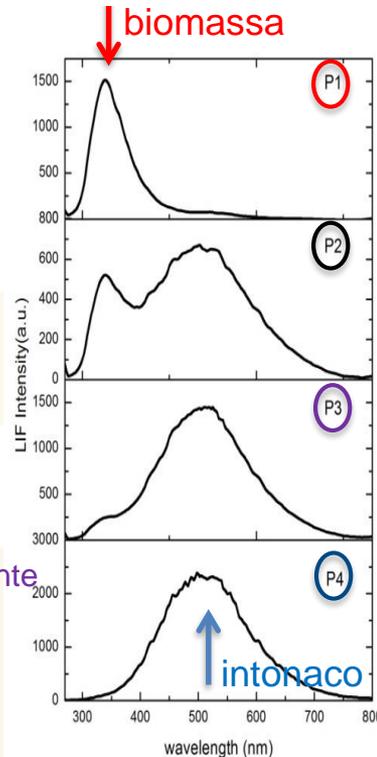
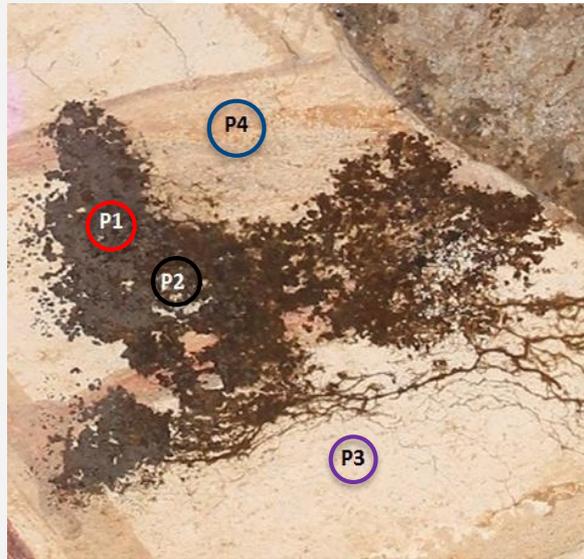
Modello 3D ad alta risoluzione da RGB-ITR



Risultato finale della sovrapposizione dei dati RGB-ITR (struttura + colore), foto bianco/nero del 1950 e foto con lampada UV

RISPOSTA: In alcuni casi sì, con tecniche di image enhancement, in altri si può ricostruire quanto perduto sovrapponendo al modello vecchie foto digitalizzate.

DOMANDA: Può l'acquisizione di modelli e dati digitali aiutare a contrastare il bio-degrado e fare conservazione preventiva?



Spettri LIF puntuali

La persistenza della banda a 340 nm in **P3** indica la possibilità di **rivelazione precoce** di zone attaccate dai microorganismi prima che siano visibili.

P1 – zona di biomassa più densa

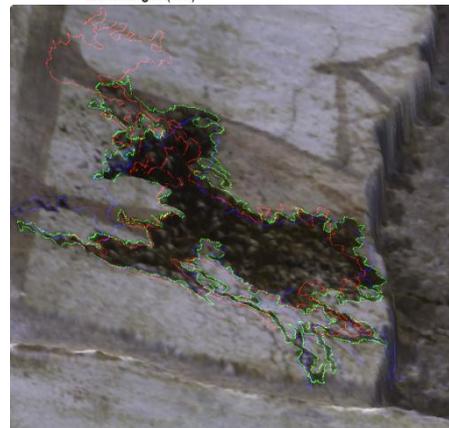
P3 - zona apparentemente priva di biomassa

P2 – zona di biomassa meno densa

P4 – zona lontana dalla biomassa

Identificazione della zona di bio-degrado sul modello 3D RGB-ITR

RISPOSTA: Sì, combinando le misure puntuali LIF con il modello 3D, che consente di monitorare l'estensione del fenomeno nel tempo.



Dopo 4 e 8 mesi sono effettivamente apparse le colonie nella zona indicata sul modello.

Necessità di diagnostiche spettroscopiche durante il restauro

Affresco su tomba con
iscrizione persa



DOMANDA: E' possibile utilizzare l'imaging
spettroscopico per leggere la scritta persa?



Immagine di riflettanza

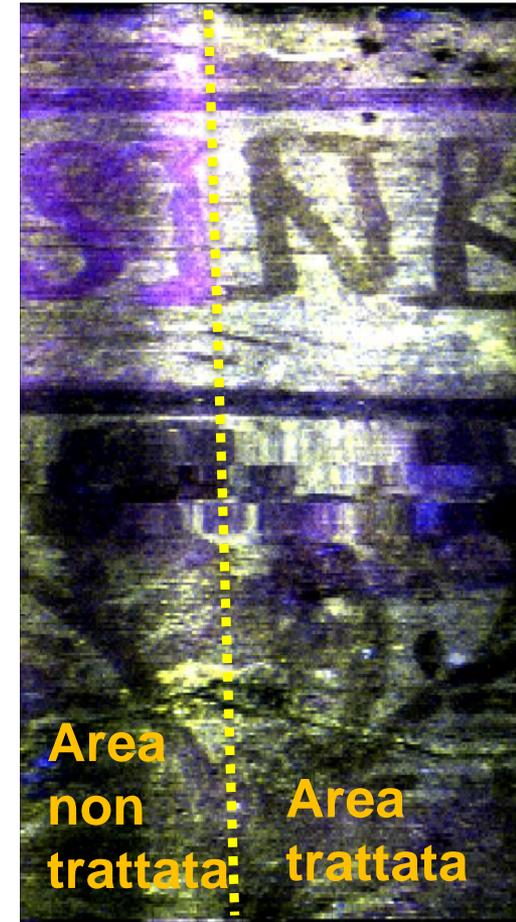


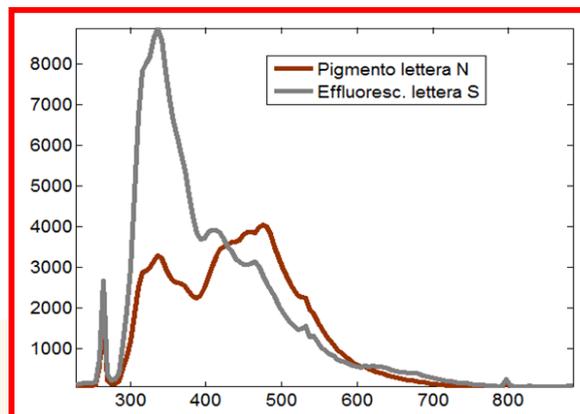
Immagine di fluorescenza

RISPOSTA: Sì è stato
possibile mediante LIF

- DOMANDE:**
1. E' ancora presente lo strato pittorico?
 2. Quale consolidante è stato usato?

Mediante LIF si ottiene la firma spettrale caratteristica di un consolidante @340 nm sulle lettere mancanti e su altre decorazioni.

RISPOSTA #1: Si L'efflorescenza copre le lettere mancanti in corrispondenza dell'applicazione del consolidante

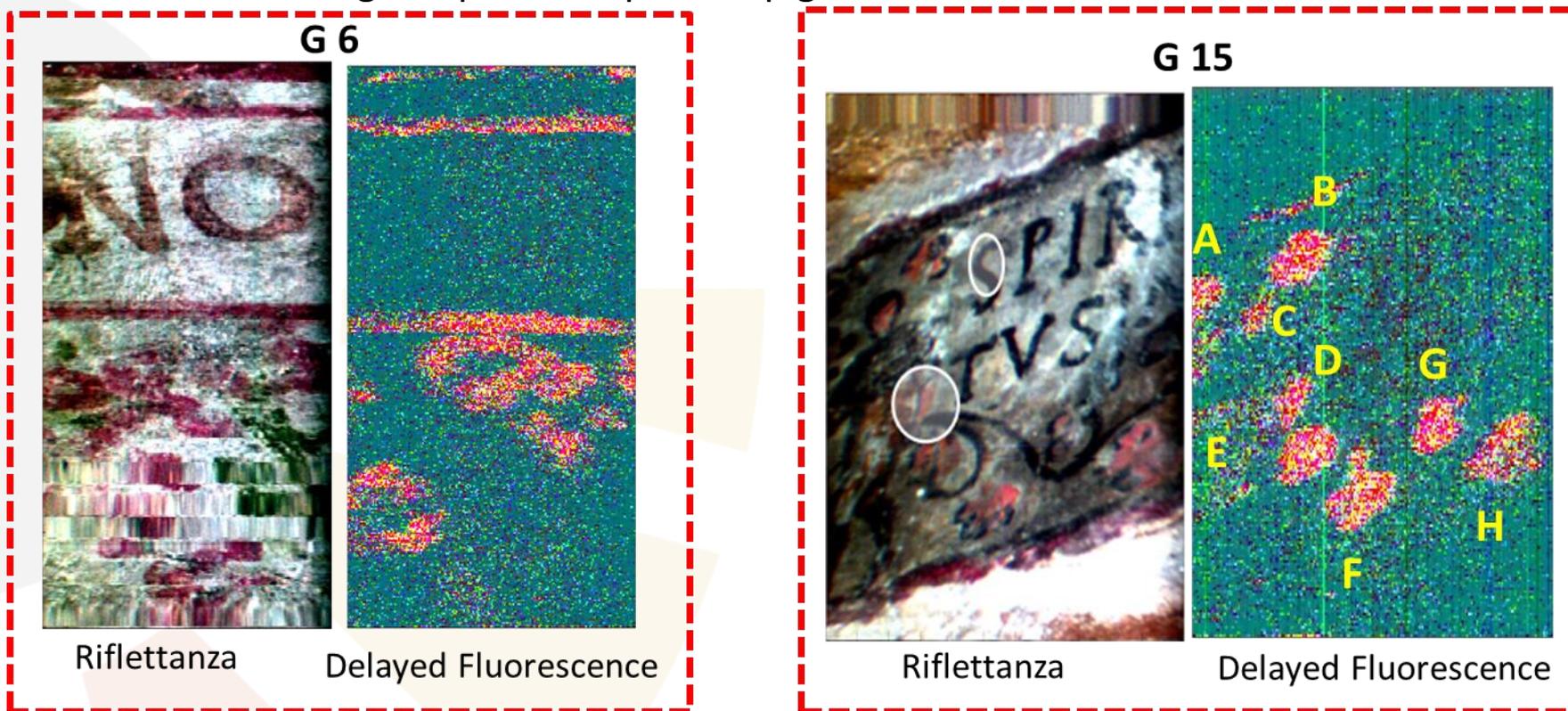


	S. Alessandro	SiEt	Vinilici	Acrilici
LIF	banda a 340 nm: Intensa	banda a 340 nm: Intensa	Banda a 340nm: Intensa (per la maggior parte)	Banda a 340nm: Presente in alcuni casi (AC35)
TR-LIF	banda a 340nm: Pronta	banda a 340nm: Pronta	banda a 340nm: Ritardata	banda a 340nm AC35: Ritardata
RAMAN	Picco a 1291cm ⁻¹ (manca banda vinilica a 630cm ⁻¹)	Picco a 1295 cm ⁻¹	Picco a 630 cm ⁻¹ (manca picco a 1295 cm ⁻¹)	Picco a 1296 cm ⁻¹ Primal AC35 Plextol D492

RISPOSTA #2: Si tratta del Silicato di Etile **SiEt**

- DOMANDE:**
1. E' possibile ottenere informazioni sui pigmenti?
 2. E' possibile datare gli affreschi?

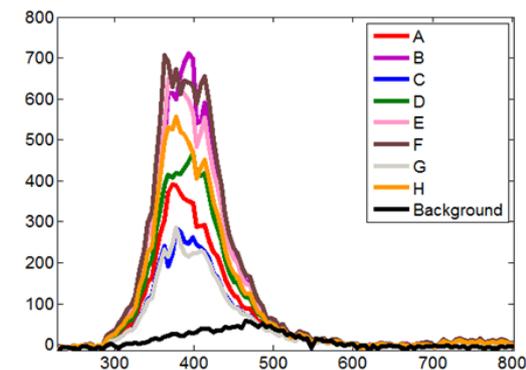
Indagine spettroscopica sui pigmenti rossi di due affreschi



- L'imaging TR-LIF ha mappato la distribuzione dei pigmenti rossi e arancioni sulla superficie, entrambi piccati @ 380 - 400 nm.
- Sono caratterizzati dalla stessa costante di decadimento temporale di 8-12 ns.
- L'analisi Raman e l'XRF hanno confermato **ocra rossa (G6)** e una miscela di **ocra rossa e minio (G15)**.

RISPOSTE:

1. **SI** I pigmenti rossi sono stati identificati
2. **NO** ma gli affreschi sono contemporanei



3.5 Le analisi in situ: LIBS

Frammenti da un «butto» vicino Tarquinia (XIII-XIX secolo)

DOMANDA: Possiamo ottenere informazioni su materiali, tecniche di lavorazione e datazione dei frammenti?

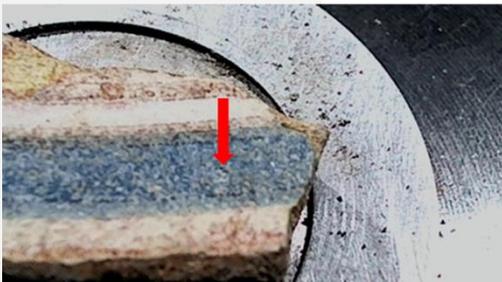
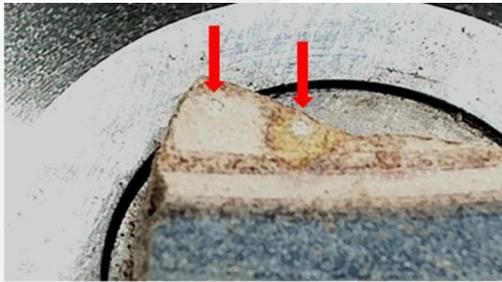


Foto di un frammento esaminato mediante ILS a 10 m di distanza, le frecce indicano i crateri dell'analisi

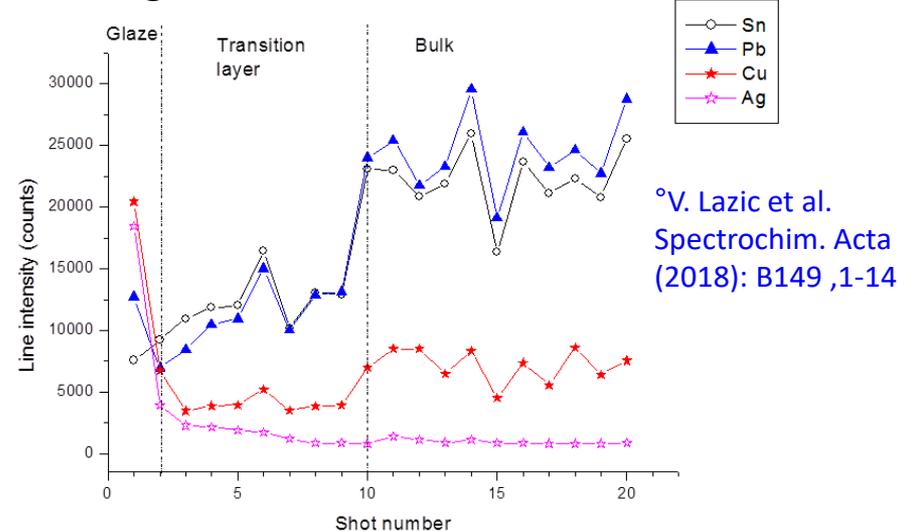
Iridescenza	Bianco	Blu	Giallo	Marrone chiaro
Cu, Ag, Al, Ca, Mg, Mn, Fe, Sr, Na, Li, K	Cu, Ag, Pb, Sn	Co, Pb, Si, Al, Mg, Fe	Cu, Ag, Mg, Mn, Li, K, Rb	Cu, Ag

Risultati: Il pigmento blu è uno smalto a base di cobalto (saffre).

Il primo strato iridescente, ricco di argento e rame presenti anche nel lustro giallo, suggerisce la possibile datazione del frammento nel XVI secolo*, secondo una ricetta storica di Piccolpasso per la ceramica.

*F. Colao et al. Spectrochim. Acta (2002): B57 1219-1234

Stratigrafia LIBS remote nella zona bianca



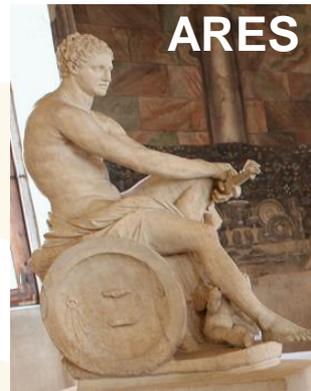
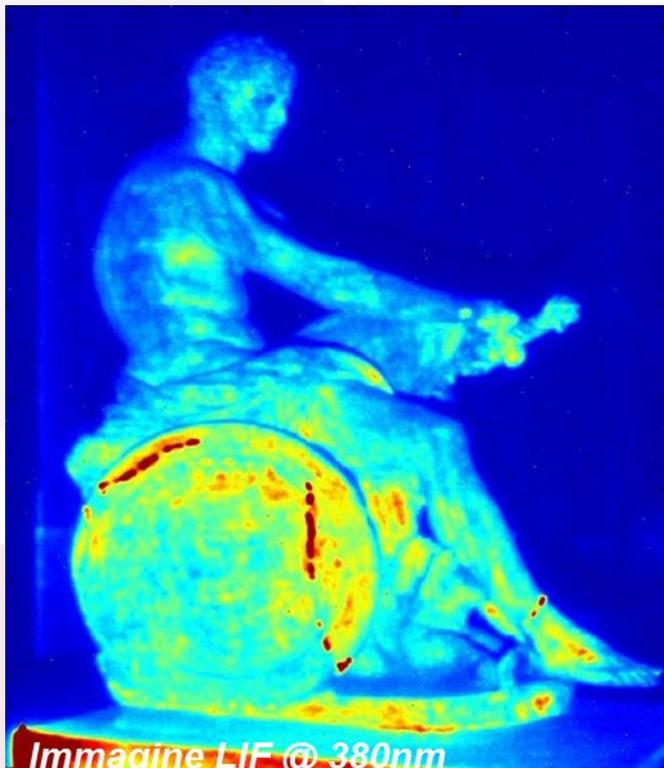
RISPOSTA: Sì combinando l'analisi con le conoscenze storiche

°E' stato eseguito uno studio completo che confronta la tecnica LIBS da campo con quelle di laboratorio PIXE e XRF su diversi campioni di BC

3.6 La caratterizzazione di marmi d'epoca romana

Problematiche relative a materiali e trattamenti originali, e successivi restauri storici

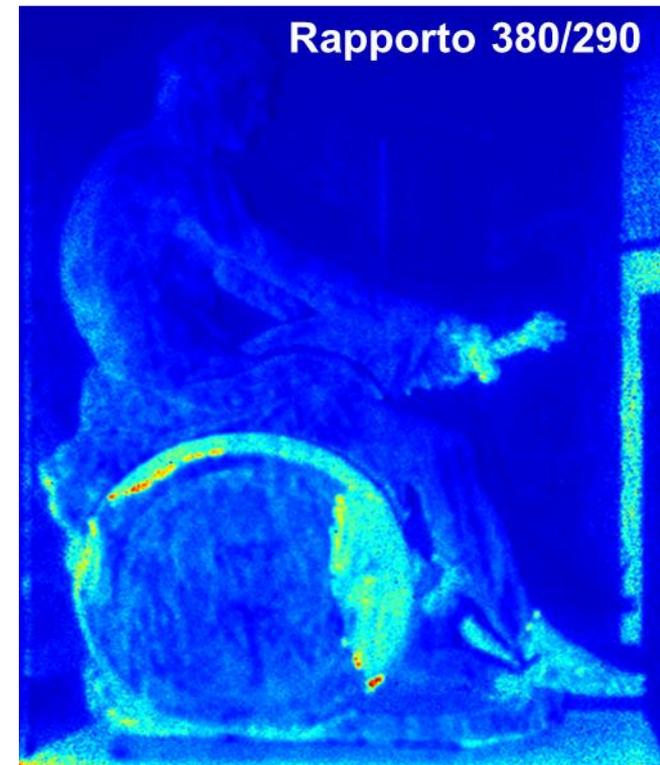
- DOMANDE:**
1. Quali sono i materiali originali e le parti reintegrate nel '500?
 2. Quali materiali sono stati utilizzati nei precedenti restauri?
 3. Sono presenti prodotti di finitura originale o di degrado?



Le immagini raccolte dal sistema LIF imaging sono state processate per discriminare i diversi



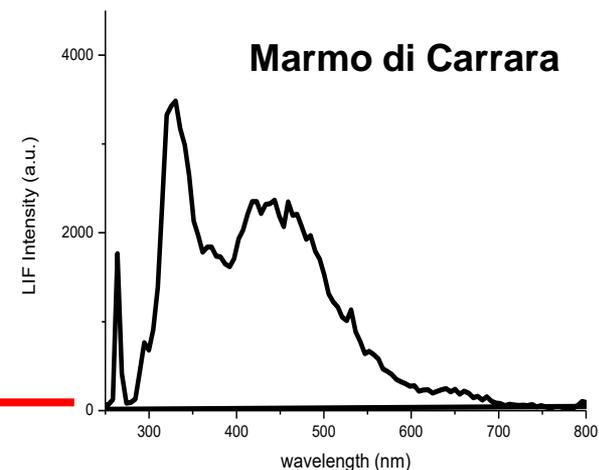
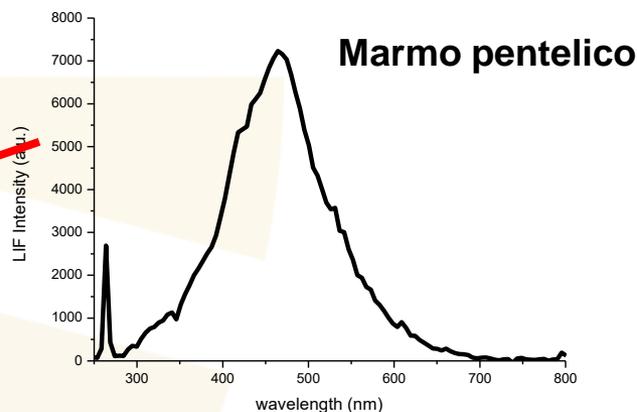
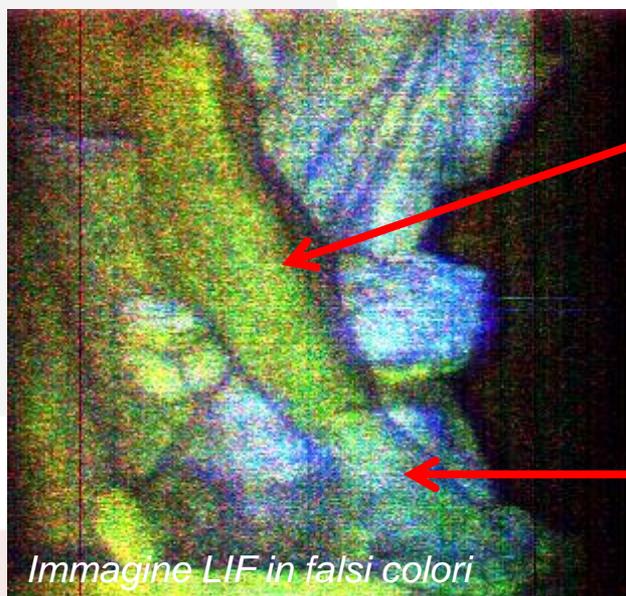
materiali lapidei utilizzati nel restauro d'epoca



RISPOSTA 1: Si possono discriminare i materiali originali da quelli di riporto

Identificazione dei marmi bianchi dallo spettro LIF

Per spiegare le differenze osservate nelle immagini registrate a diversa lunghezza d'onda di fluorescenza, sono stati registrati gli spettri completi con il sistema LIF scanning in una porzione della statua.

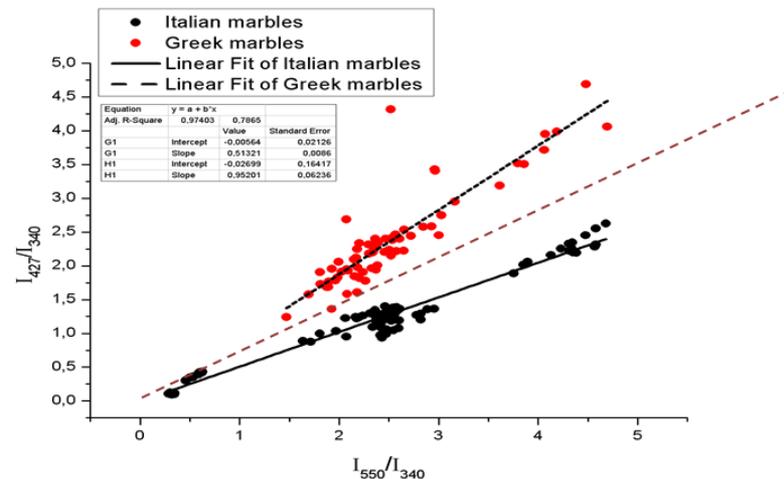


Spettri LIF raccolti, nelle aree indicate dalla punta delle frecce rosse, mediante il sistema LIF scanning

Risposta 2 – Dal confronto con i data base disponibili il marmo originale è un «marmo pentelico», quello del riporto cinquecentesco un «marmo di Carrara»

Algoritmo per l'identificazione automatica dei marmi

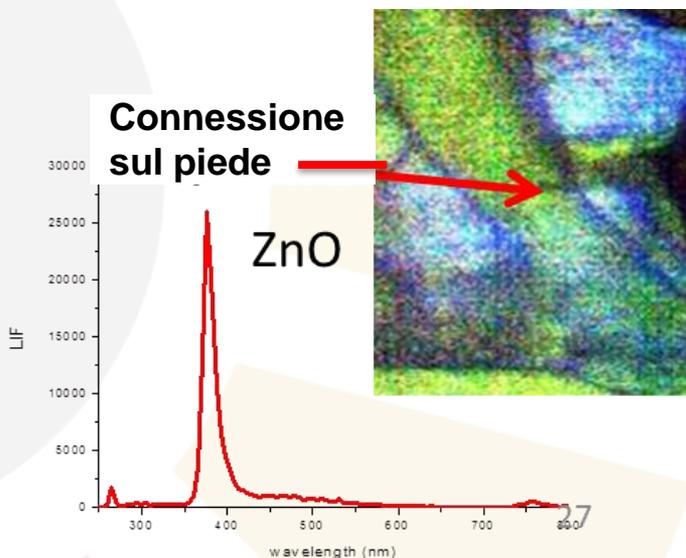
L'algoritmo sviluppato si basa sui rapporti di intensità di fluorescenza per selezionate (tramite filtri) coppie di canali di rivelazione.



Restituzione del risultato dell'applicazione dell'algoritmo alle immagini dell'intera statua. In giallo le parti composte da marmo greco.

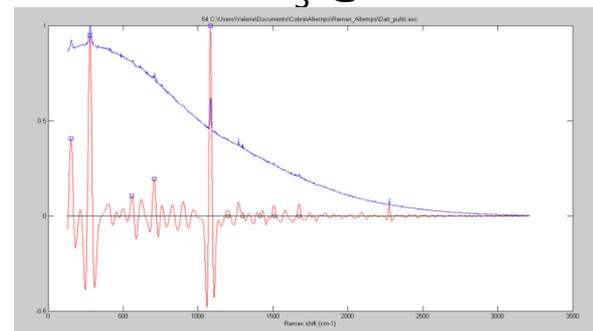
Risposta 2 bis: L'identificazione può essere fatta anche in maniera automatica, senza più registrare gli spettri

Informazioni aggiuntive dagli spettri LIF e Raman

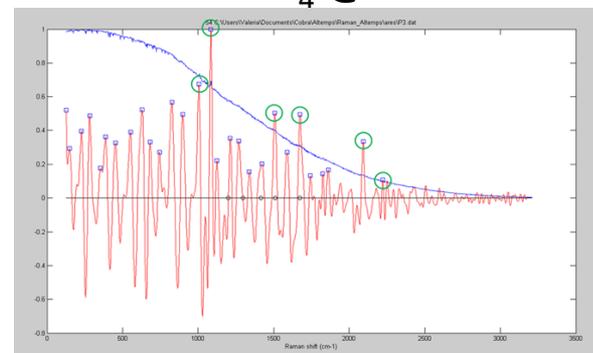


Risposta 3 a – Identificazione come Ossido di zinco del pigmento bianco sulla connessione dalla sua firma spettrale di fluorescenza

Calcite CaCO_3 @1084 cm^{-1}



Gesso CaSO_4 @1007 cm^{-1}



Risposta 3b – Rivelazione di prodotti di degrado, identificati mediante spettroscopia Raman

3.7 Indagini per la conservazione di interni di monumenti

Il Palazzo Vescovile di Frascati, recentemente restaurato – Sala dei Paesaggi



Digitalizzazione mediante RGB-ITR

Le pareti della sala sono completamente decorate con tessuto da parati dipinto a tempera.

DOMANDE:

1. Si evidenziano macchie di infiltrazioni d'acqua?
2. Si evidenziano danni sul tessuto dipinto?

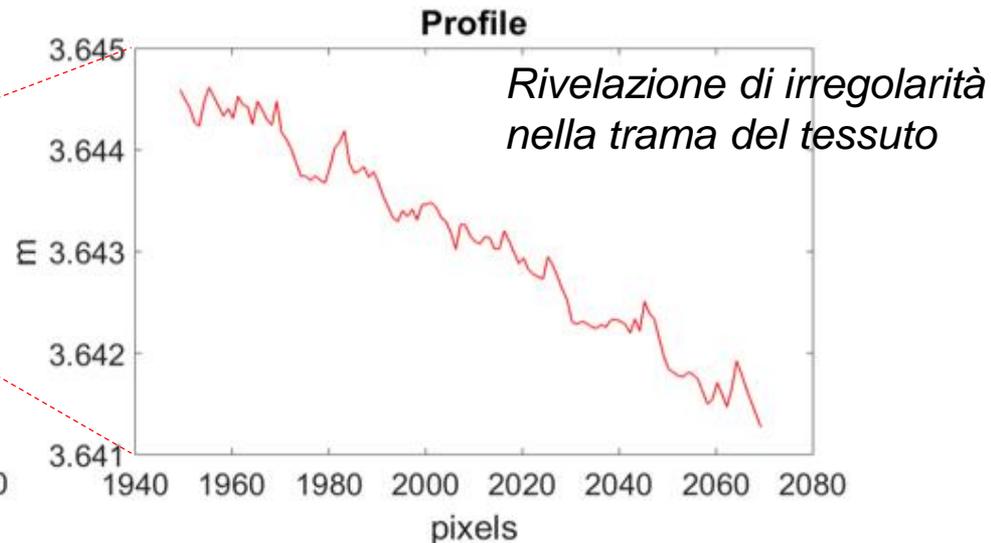
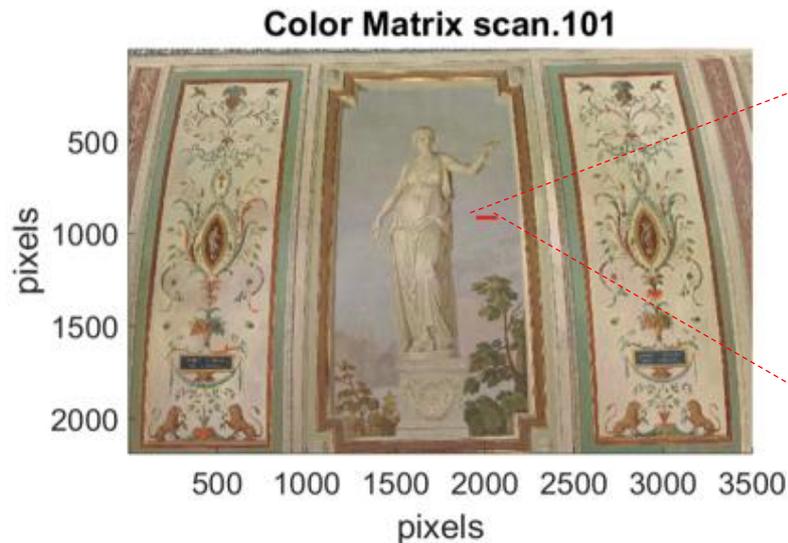


Particolare del soffitto con evidenti zone ridipinte nel precedente restauro per compensare la decolorazione

RISPOSTA 1: Sì

Rivelazione di danni dalla morfologia e dalla composizione della superficie

Analisi morfologica sui dati dell'RGB-ITR



Indagine LIF sulla copertura lignea del caminetto

L'immagine di fluorescenza elaborata per il rapporto fra i canali 380/450 rivela una cricca attentamente restaurata con un consolidante e poi ridipinta



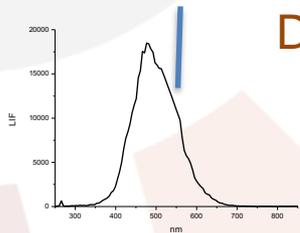
Risposta 2 – L'uso dei due sistemi laser consente la rivelazione sia di anomalie morfologiche che di variazioni di composizione chimica

Altre evidenze di precedenti restauri e rivelazione precoce di danni mediante LIF imaging – La sala delle Stufette



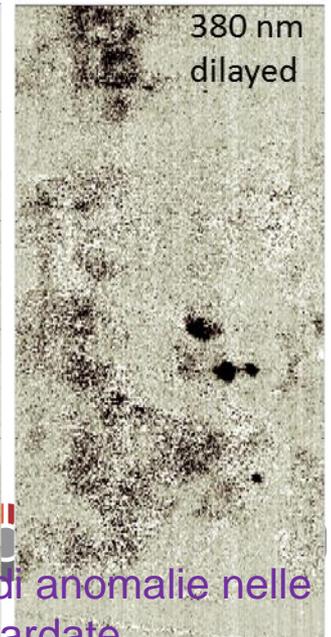
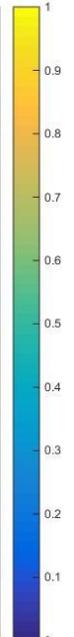
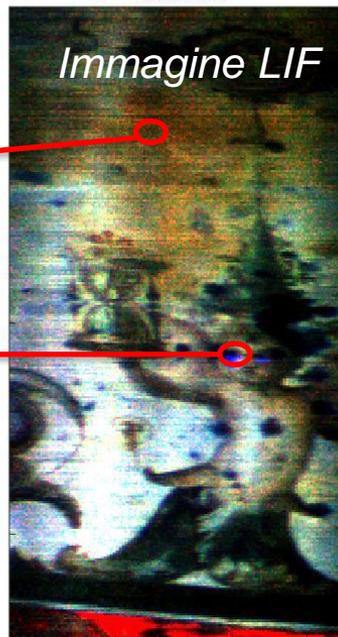
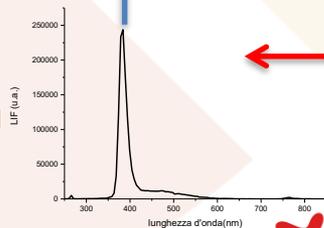
DOMANDA:
Possiamo rivelare precocemente alterazioni nella pigmentazione?

RISPOSTA: Sì, sia nel dominio spettrale che in quello temporale.



Degrado del colore @550 nm

ZnO ritocchi @380 nm



Comparsa di anomalie nelle immagini ritardate

3.8 Indagini conoscitive su opere pittoriche nei musei

Scialbature e ripensamenti degli artisti

L'imaging nel vicino e medio IR (rivelatori al Si e InGaAs) assieme a termografia, THz imaging, radiografie ecc... consentono di rivelare ciò che è nascosto sotto l'attuale superficie pittorica.

Per un imaging sub-superficiale e 3D modeling da remoto ENEA ha sviluppato l'IR-ITR operante a $1.55\mu\text{m}$.

Test di laboratorio eseguito a **10 m** su una tela moderna con ridipintura superficiale. Si rivela chiaramente il disegno sottostante.

Primo test sul campo eseguito in una sala di Palazzo Chigi ad Ariccia, con risultati analoghi a quelli ottenuti con i sistemi di imaging IR commerciali: Evidenza di ritocchi e ripensamenti.



Unione europea
Fondo europeo
per lo sviluppo regionale

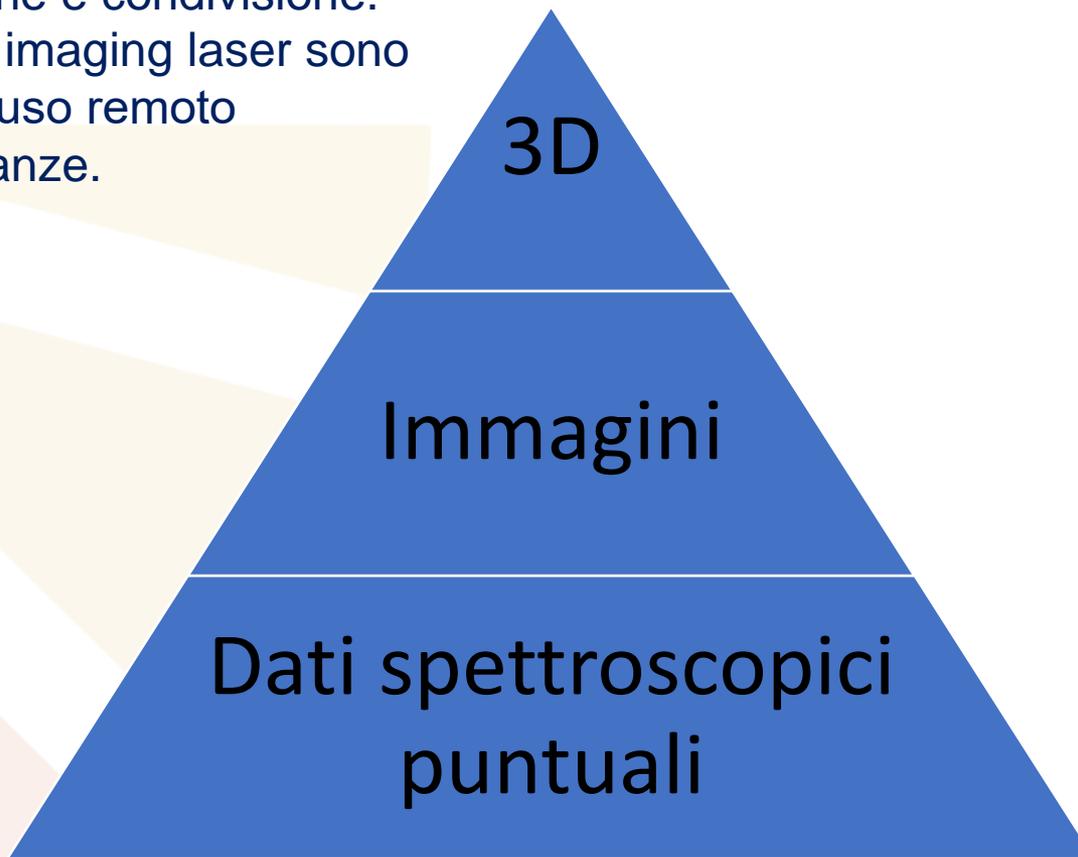


IN INVESTIMENTO



CONCLUSIONI

- Le tecnologie digitali consentono un'efficace raccolta, elaborazione e conservazione dei dati.
- Nel settore dei BC il modello «a cipolla» risulta particolarmente adatto per la fruizione e condivisione.
- I sistemi per imaging laser sono ottimali per l'uso remoto a medie distanze.



GRAZIE PER AVER PARTECIPATO

Roberta Fantoni

Salvatore Almaviva, Luisa Caneve,
Francesco Colao, Massimo Francucci,
Massimiliano Guarneri, Violeta Lazic,
Antonio Palucci, Adriana Puiu, Ottavia
Santorelli*, Valeria Spizzichino,

ENEA, Fusion and Technologies for Nuclear Safety and security Dep.,
Technology Applications for security and Health, Diagnostic and Metrology Lab.
Frascati Research Centre (Italy) - *research fellow

Martina Romani

INFN-Department of Industrial Engineering, University of Rome "Tor Vergata"

Si ingraziano tutti gli Stakeholder coinvolti nelle campagne dimostrative di cui sono stati i mostrati risultati raccolti nei progetti regionali, e la regione Lazio per il supporto.

Sovrintendenza per l'Alto Lazio e L'Etruria Meridionale,
Pontificia Opera di Archeologia Cristiana, Curia di Frascati,
Museo Palazzo Altemps (Roma), Museo Palazzo Chigi (Ariccia),