



**HAL**  
open science

# **METODI DI CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI SONAR Parte seconda Applicazioni al progetto STSS500**

Ramiro Dell'Erba, Francesco Colao

► **To cite this version:**

Ramiro Dell'Erba, Francesco Colao. METODI DI CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI SONAR Parte seconda Applicazioni al progetto STSS500. [Research Report] ENEA. 2009. hal-01977296

**HAL Id: hal-01977296**

**<https://hal.science/hal-01977296>**

Submitted on 10 Jan 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development

<http://www.enea.it/en>

<http://robotica.casaccia.enea.it/index.php?lang=en>

This paper is available on the Open Archives of ENEA

<http://openarchive.enea.it/>

# **METODI DI CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI SONAR**

Parte seconda

Applicazioni al progetto STSS500

FRANCESCO COLAO

ENEA - Fisica Applicata Sezione Laser  
Centro Ricerche Frascati, Roma

RAMIRO DELL'ERBA

ENEA - Tecnologie della Robotica  
Centro Ricerche Casaccia, Roma



AGENZIA PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

# METODI DI CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI SONAR

Parte seconda

Applicazioni al progetto STSS500

FRANCESCO COLAO

ENEA - Fisica Applicata Sezione Laser  
Centro Ricerche Frascati, Roma

RAMIRO DELL'ERBA

ENEA - Tecnologie della Robotica  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

# METODI DI CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI SONAR

Parte seconda

Applicazioni al progetto STSS500

FRANCESCO COLAO, RAMIRO DELL'ERBA

## **Abstract**

*STSS500 camera is an innovative instrument dedicated to submarine robot planned in order to increase human operator perception; the objectives include the possibility to operate in hostile atmospheres, the overcoming of the visible and/or infrared vision limits in turbid waters. STSS500 operates lighting by sound the scene with an array of acoustic rays with known electric characteristics. Later it listens to the reception antenna in order to record the reflected and/or diffuse acoustic echoes from the present obstacles in the scene. The camera is stereoscopic. An opportune analysis of signals received from the reception antenna renders the construction of synthetic data; the data fill in voxel a portion of the space place in front of the STSS500.*

*In a previous technical report, with appropriate simplifications, has shown the strengths and weaknesses of techniques used in remote sensing or imaging (PCA methods, SAM, SCM, etc.) with the intention to apply them, albeit with due caution, to case of acoustic data. The goal always is to help the process of understanding of the scene captured by STSS500 for the operator. To this purpose we have examined the return echoes from experimental data to extract those features correlated to the physical characteristics of the target. After examining the raw data back and three-dimensional images obtained we tried to apply the techniques for automatic identification and classification outlined in the previous report, briefly recalled here. In some cases, they were applied to optical data, which were already available and validated. Other measures of optical were specifically conducted to test the methods.*

*Recall that to do this it is assumed that the specificity of the means of transmission and interaction have scale laws formally similar. Therefore by virtue of that appointment we moved to the acoustic paradigms and algorithms originally developed in different areas and range interaction such as the frequency spectrum of optical data.*

**Key words:** *Robotic, Sonar, Hostile environment, Antarctic.*

## **Riassunto**

La telecamera STSS500 è uno strumento innovativo per la visione robotica sottomarina progettato per aumentare la percezione di un operatore umano i cui molteplici obiettivi includono sia la possibilità di operare in ambienti ostili, che il superamento dei limiti della visione con luce visibile e/o infrarossa in acque molto torbide. Lo strumento STSS500 opera insonificando la scena di riprendere con una serie di fasci acustici formati con caratteristiche elettroacustiche note, quindi si pone in ascolto la antenna di ricezione per registrare gli echi acustici riflessi e/o diffusi dagli ostacoli presenti nella scena. La telecamera è stereoscopica. Un'opportuna analisi dei segnali ricevuti dall'antenna di ricezione rende possibile la costruzione di dati sintetici che tassellano in voxel una porzione dello spazio posto anteriormente all'STSS500.

In un rapporto tecnico precedente, con opportune semplificazioni, si è mostrato pregi e difetti di tecniche in uso nel telerilevamento o l'imaging (metodi PCA, SAM, SCM, ecc) con l'intenzione di applicarle, sia pure con le dovute cautele, al caso di dati acustici. Lo scopo finale è sempre l'aiuto del processo di comprensione della scena ripresa da STSS500 da parte dell'operatore; a tal fine si sono esaminati gli echi di ritorno sperimentali al fine di estrarre quelle features correlabili alle caratteristiche fisiche del bersaglio. Dopo aver esaminato i dati grezzi di ritorno e ricavato le immagini tridimensionali si è proceduto all'applicazione delle tecniche di identificazione e classificazione automatica illustrate nel rapporto precedente e qui brevemente richiamate. In alcuni casi si sono applicate a dati ottici, che erano già disponibili e convalidati. Altre misure di tipo ottico sono state espressamente eseguite per testare i metodi.

Ricordiamo che per fare ciò si è assunto che le specificità del mezzo trasmissivo e dell'interazione abbiano leggi di scala formalmente simili nel caso acustico e in quello ottico; in virtù di tale assunzione si trasferiscono all'ambito acustico i paradigmi e gli algoritmi originalmente sviluppati in ambiti diversi per range e per interazione quali ad esempio lo spettro di frequenza di dati ottici.

**Parole chiave:** Robotica, Sonar, Ambienti ostili, Antartide



## INDICE

<b>METODI DI CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI SONAR PARTE SECONDA: APPLICAZIONI AL PROGETTO STSS500.....</b>	<b>7</b>
<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>7</b>
<b>2. RIFERIMENTI .....</b>	<b>8</b>
2.1. Progetto.....	8
2.2. Documenti di riferimento .....	8
<b>3. INTRODUZIONE .....</b>	<b>9</b>
<b>4. STRUMENTI E METODI .....</b>	<b>9</b>
4.1. Telecamera acustica STSS500.....	9
4.2. Telecamere ottiche .....	11
4.3. Campioni analizzati .....	12
4.4. Immagini acustiche .....	15
4.4.1. Considerazioni sui dati sperimentali di STSS500 .....	18
<b>5. CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI SPERIMENTALI.....</b>	<b>21</b>
5.1. Classificazione nel dominio acustico.....	22
5.1.1. Immagini acustiche simulate .....	22
5.1.2. Immagini acustiche sperimentali .....	25
5.2. Classificazione nel dominio ottico.....	27
5.2.1. Immagini di riflettanza .....	28
5.2.2. Immagini di fluorescenza .....	32
<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>41</b>
<b>7. REFERENZE .....</b>	<b>43</b>
<b>8. APPENDICE .....</b>	<b>44</b>
8.1. Campione ANPH.....	44
8.1.1. Metodo del baricentro .....	45
8.1.2. Metodo del cepstrum .....	45
8.1.3. SVM .....	46
8.2. Campione CIL1.....	47
8.2.1. Cepstrum .....	47
8.2.2. SAM .....	47



8.2.3.	SVM .....	48
<b>8.3.</b>	<b>Campione FERE .....</b>	<b>48</b>
8.3.1.	Metodo del baricentro .....	48
8.3.2.	Cepstrum .....	49
8.3.3.	SVM .....	49

# **Metodi di classificazione dei segnali sonar parte seconda: applicazioni al progetto STSS500**

## **1. Premessa**

Il progetto "Sonar Tridimensionale Stereoscopico Simultaneo a 500 kHz" (STSS-500) ha come scopo l'osservazione di oggetti immersi in mare tramite una telecamera acustica stereoscopica. I vantaggi di una telecamera acustica, rispetto ad un'ottica, sono nel potere agire in acque torbide, situazione che si presenta nella maggior parte delle attività marine di tipo industriale.

La propagazione acustica in ambiente marino presenta diverse difficoltà da superare; tra di esse vi è la banda di frequenza piuttosto limitata che riduce l'informazione contenuta nell'immagine. Si pone, quindi l'obiettivo di sfruttare tutte le complesse tecniche oggi note per ottenere una buona risoluzione dell'immagine ottenuta con il massimo contenuto informativo.

Nel presente rapporto esamineremo alcuni dati sperimentali sia ottici sia acustici propri del sistema STSS500. La presenza di dati ottici è servita per provare e testare le tecniche di classificazione in un campo ove esse si applicano abitualmente e su dati già disponibili e validati nella loro classificazione. Altre misure di tipo ottico sono state espressamente eseguite al fine di testare i metodi di classificazione su un insieme di dati più ampio e facile da trattare.

## 2. RIFERIMENTI

### 2.1. Progetto

<b>STSS500</b>	Sonar Tridimensionale Stereoscopico Simultaneo a 500 kHz
<b>WP10</b>	Progettazione e realizzazione del prototipo del sistema di elaborazione di immagini
<b>Linea 2</b>	Sviluppo ed implementazione del software per la presentazione dei dati, la classificazione e l'interfaccia con il robot. (formazione delle immagini)

Tabella 1 Il progetto.

### 2.2. Documenti di riferimento

riferimento	descrizione
<i>Il progetto di ricerca</i>	<b>MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA</b> <b>Dipartimento per l'università, l'alta formazione artistica, musicale e coreutica per la ricerca scientifica e tecnologica</b> <b>Direzione generale per il coordinamento e lo sviluppo della ricerca</b> <b>Legge 53/2000 art. 5</b> <b>Anno 2004 - Protocollo: 100</b>
<b>Metodi di classificazione dei segnali sonar. Parte prima: stato dell'arte.</b> <b>Francesco Colao e Ramiro dell'Erba</b>	<b>Rapporto tecnico ENEA</b>
<b>Realizzazione di un sistema di visione stereoscopica per il progetto STSS500. Luciano Blasi e Marco Chirivì</b>	<b>Rapporto tecnico ENEA</b>

Tabella 2 Documenti di riferimento.

### 3. INTRODUZIONE

I dettagli dell'analisi dei possibili modi di rendering, filtraggio dei dati e di discriminazione dello spettro di potenza emesso dal singolo voxel si trovano nel rapporto tecnico di Luciano Blasi e Marco Chirivì, che si sono occupati del rendering tridimensionale (Blasi 2009).

In questo studio si riporta esclusivamente l'elaborazione di immagini acustiche ed ottiche al fine di estrarre quelle *features* correlabili alle caratteristiche fisiche del bersaglio, la cui visualizzazione possa aiutare il processo di comprensione della scena all'operatore ripresa da STSS500.

### 4. Strumenti e metodi

Gli algoritmi di identificazione e classificazione basati sulle tecniche di analisi sviluppati in un precedente rapporto (Colao 2009) sono applicati ad immagini acquisite con diverse modalità. Oltre all'utilizzo della telecamera acustica STSS500, sono state acquisite immagini anche nel dominio ottico.

In termini di struttura dei dati, tutta la strumentazione sperimentale utilizzata produce dei dati tra loro omologhi: si tratta di una serie di matrici bidimensionali ciascuna delle quali rappresenta l'immagine di una sezione dell'oggetto scansionato. Nel caso acustico le sezioni corrispondono ad immagini di intensità di segnale retrodiffuso separate nello spazio da una distanza pari alla risoluzione longitudinale della telecamera acustica. Nel caso ottico le sezioni provengono tutte dalla medesima distanza tra strumento di misura e oggetto in studio, rappresentandone tuttavia attributi diversi che nel caso specifico sono le intensità in funzione della lunghezza d'onda. L'intensità del segnale emesso dal singolo pixel vs la lunghezza d'onda è assimilato in termini qualitativi all'involuppo del segnale sonoro emesso dal singolo voxel in STSS500. Grazie a questa analogia risulta dunque possibile trattare i dati provenienti dalle telecamere ottiche alla stessa stregua di quelli acustici.

#### 4.1. Telecamera acustica STSS500

La telecamera STSS500 (Marasco 2007a, Marasco 2007b) è uno strumento innovativo per la visione robotica sottomarina i cui molteplici obiettivi includono:

- la possibilità di operare in ambienti ostili
- aumentare la percezione di un operatore umano mediante informazioni supplementari sulla natura dell'oggetto osservato
- superare i limiti della visione con luce visibile e/o infrarossa impossibile in acque molto torbide

STSS500 opera insonificando la scena di riprendere con una serie di fasci acustici di diversa frequenza "formati" con caratteristiche elettroacustiche note, quindi pone in ascolto le antenne di ricezione per registrare gli echi acustici riflessi e/o diffusi dagli ostacoli presenti volume di spazio esaminato. Un'opportuna analisi dei segnali ricevuti dall'antenna di ricezione (Lavarini 2003) rende possibile la costruzione di dati sintetici che tassellano lo spazio discretizzato in elementi detti soxel/voxel. Per i dettagli relativi al progetto STSS500 si rimanda a (Colao 2009); qui ci occuperemo solo degli aspetti relativi all'analisi ed all'interpretazione dei dati sperimentali.

La telecamera acustica realizzata da WASS è mostrata in Figura 1. Essa è composta da due *array* di 160 piezoelettrici trasmettenti (orizzontali) che generano 16 fasci le cui frequenze sono date in tabella 1. L'apertura dei fasci è di 16 deg x 16 deg, ma il "*beam forming*" (variazione della fase in modo da "formare" il fascio con opportune

interferenze costruttive e/o distruttive) fa sì che i fasci siano localizzati in un angolo solido  $16 \text{ deg} \times 1 \text{ deg}$  per ciascuna frequenza  $f$  delle 16 emesse dall'antenna trasmittente. Vi è quindi una corrispondenza biunivoca tra l'angolo nel piano verticale e la frequenza. Il ricevitore centrale, posto ortogonalmente rispetto al piano dei trasmettitori, è composto da 16 ricevitori eguali il cui cono di ascolto è  $16 \text{ deg} \times 16 \text{ deg}$ . Anche in questo caso il *beam forming* permette di selezionare una zona dello spazio di ampiezza  $1 \text{ deg} \times f \times 16 \text{ deg}$ , ortogonale a quella dei trasmettitori. In questo modo si può ricavare una relazione tra la posizione angolare della regione di spazio insonificata e l'ampiezza del segnale acustico retro diffuso, con una risoluzione angolare di circa  $1 \text{ deg}$ . Uno schema a blocchi è mostrato in figura 2.



Figura 1 - Il sistema STSS500: Elettronica di controllo ed antenne trasmettenti e ricevente.

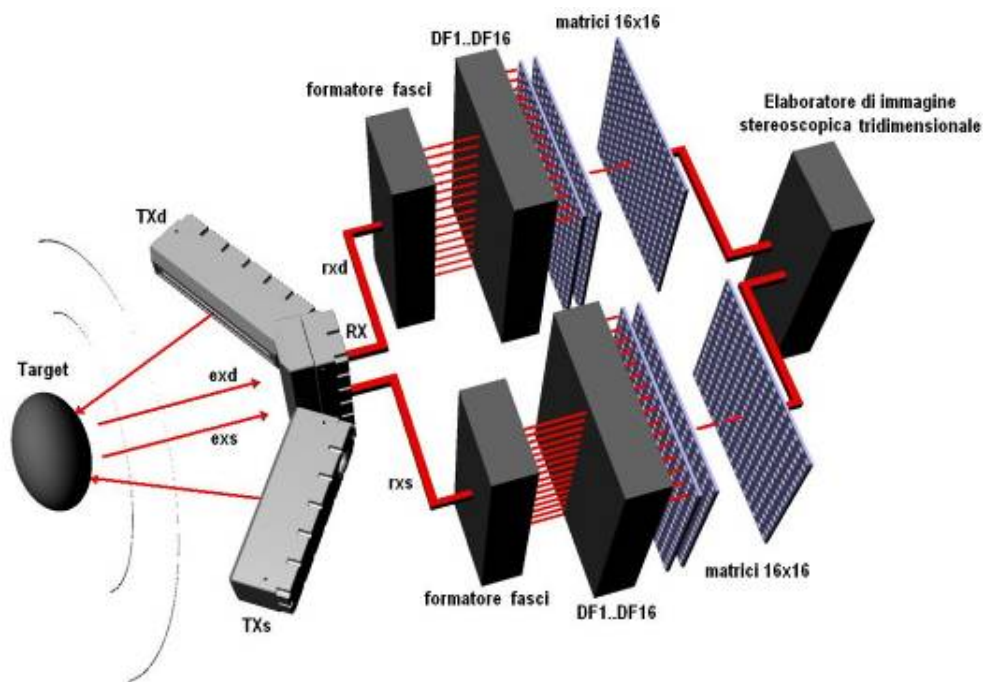


Figura 2 - Schema a blocchi del sistema STSS500

La telecamera opera utilizzando i trasmettitori destro e sinistro i quali emettono alternativamente un treno d'onde rettangolare composto da 16 frequenze e della durata di circa 100  $\mu$ s (Marasco 2007b); si nota che, in mancanza di filtraggio di *shaping*, lo slargamento temporale intrinseco di un simile treno d'onde è inversamente proporzionale alla durata, ed in questo caso di circa 10 KHz. Le frequenze trasmesse sono riportate in Tabella 1. La presenza di due illuminatori permette di vedere una stessa scena illuminata da due punti di vista diversi, raddoppiando la quantità di dati rispetto al singolo illuminatore e corrispondentemente aumentando la quantità di informazione.

Tabella 1 - Frequenze ed angolo di trasmissione del sistema STSS500

N	Frequenza (Khz)	Angolo (°)
1	600.308	26.0
2	579.655	27.0
3	560.541	28.0
4	542.807	29.0
5	526.316	30.0
6	510.948	31.0
7	496.600	32.0
8	483.178	33.0
9	470.603	34.0
10	458.802	35.0
11	447.711	36.0
12	437.274	37.0
13	427.439	38.0
14	418.162	39.0
15	409.401	40.0
16	401.119	41.0

Il segnale in trasmissione viene “formato” (ovvero sommato con ritardi diversi in modo da generare interferenze costruttive e distruttive lungo direzioni opportune) in modo che ogni frequenza sia localizzata in un angolo di ampiezza di circa 1 deg, lungo la direzione riportata in Tabella 1. Il bersaglio diffonde il segnale che viene raccolto dai 16 ricevitori posti al centro dei due trasmettitori.

## 4.2. Telecamere ottiche

Oltre che nel dominio acustico, sono state acquisite delle immagini ottiche di riflettanza e di fluorescenza.

### Immagini di riflettanza

Le immagini di riflettanza sono state acquisite con una telecamera BASLER accoppiata ad un dispersore di linea spettrale SPECIM ImSpector V8 (Specim 2009), appositamente acquistata per il progetto STSS500. Questo strumento consente di effettuare misure risolte spettralmente in modo rapido ed accurato. Analogamente a quanto si ha nel caso del sonar STSS500, anche in questo caso i dati consistono in numero elevato di matrici bidimensionali Nella configurazione sperimentale adottata in

questo studio, la scena da scansionare è ripresa per linee adiacenti, successivamente le varie acquisizioni vengono composte per formare un'immagine bidimensionale. Le dimensioni dell'immagine, espresse in pixel, sono rispettivamente di 480 pixel nella direzione orizzontale (corrisponde al numero di pixel della CCD) e di una quantità variabile corrispondente al numero di righe scansionate nella direzione verticale. La risoluzione spettrale è di circa 5nm, cui corrispondono 320 canali. La risoluzione spaziale media nel piano trasverso è di circa 2mm.

#### Immagini di fluorescenza

Le immagini acquisite con la tecnica di fluorescenza indotta da laser (Laser Induced Fluorescence - LIF), sono state ottenute illuminando il soggetto con una luce ultravioletta e scansionando la superficie illuminata per punti a spaziatura uniforme (pixel) nelle due direzioni ortogonali alla quella di vista (Colao 2007). Per ogni punto di misura è stato rilevato e memorizzato lo spettro della emissione luminosa raccolta. L'immagine LIF risulta così composta da pixel per ciascuno dei quali si ha uno spettro di fluorescenza. Le dimensioni dell'immagine sono soggette a limitazioni pratiche legate al tempo necessario ad acquisire ciascun singolo pixel (circa 1s/pixel), e tipicamente sono di circa 120 x 120 pixel. La risoluzione spaziale nel piano trasverso è di circa 3mm.

### 4.3. Campioni analizzati

I dati esaminati appartengono a gruppi diversi comprendenti sia immagini acustiche che ottiche; mentre le prime sono acquisite su oggetti immersi in acqua, le seconde sono state eseguite sia in aria che in acqua. Queste ultime sono state fatte in vista dell'utilizzo di dati ottici ad integrazione di quelli prodotti dal sonar STSS500. Al gruppo delle immagini acustiche appartengono anche quelle relative ad un oggetto virtuale insonificato con simulatore.

Il primo degli oggetti immersi nell'acqua della vasca di prova, è un cilindro metallico di diametro 50 cm e lungo circa 80 cm posto verticalmente rispetto al trasmettitore (cfr. Figura 3). Il cilindro è stato rivestito di plastica a bolle per smorzare gli echi.



Figura 3 - STSS500 in prova, nella piscina sullo sfondo, con bersaglio cilindrico in primo piano.

Un successivo oggetto ripreso con la telecamera STSS500 nella vasca di prova è stata una lastra di legno piana di dimensioni 100 x 60 cm, come mostrato in Figura 4. Per meglio caratterizzare le prestazioni della telecamera STSS500, le immagini acustiche sono state acquisite con diverse modalità operative. A tale fine ciascuna singola frequenza di trasmissione è stata generata ed inviata da sola oppure, alternativamente, insieme a tutte le altre. Per verificare le prestazioni di rendering tridimensionale sono state anche variate le posizioni relative tra antenna e scena insonificata. Una speciale sequenza è stata infine dedicata alla simulazione di un oggetto in moto trasversale rispetto a STSS500, ottenuta lasciando fissa la scena inquadrata dall telecamera, e spostando da sinistra verso destra l'oggetto della ripresa. Questo allo scopo di fornire all'operatore non una singola immagine ma con una sequenza in modo da supportare il processo di visione del cervello umano, con un contenuto informativo maggiore di quello costituito dalle singole immagini.



Figura 4 - Bersaglio costituito da una lastra piana immersa nella vasca di prova.

Al gruppo delle immagini ottiche appartengono quelle acquisite in riflettanza ed in fluorescenza. La prima acquisizione è relativa ad un campione di prova in aria, mostrato in Figura 5A; successivamente sono state acquisite alcune immagini su frammenti archeologici di provenienza romana (Ferento – VT) immersi in acqua e mostrati in Figura 5B. Sono state infine utilizzate anche immagini di fluorescenza relative a porzioni di affresco della chiesa medioevale di Hrastovlje (Slovenia) (cfr. Figura 5C).





Figura 5A – Campione di test utilizzato per la calibrazione delle immagini.



Figura 5B – Reperti archeologici utilizzati per la classificazione delle immagini di riflettanza in acqua.



Figura 5C - Immagine B/N a bassa risoluzione di un affresco situato nella chiesa di Hrastovlje (Slovenia), utilizzato per i test di classificazione sulle immagini di fluorescenza.

In Tabella 2 sono riportate tutte le acquisizioni fatte ed il relativo utilizzo nell'ambito del presente rapporto.

Si ricorda ancora una volta che la differenza tra immagini acquisite con la telecamera acustica e le altre è di natura qualitativa e non di struttura: mentre nel caso acustico per ogni singolo lobo di insonificazione si dispone dell'andamento della intensità in funzione della distanza dal trasmettitore, nel caso ottico si dispone della intensità in funzione della lunghezza d'onda. Questa analogia strutturale, ci consente tuttavia di utilizzare tale andamento alla stessa stregua di quello relativo all'involuppo del segnale acustico di ritorno. In base dunque alle considerazioni sviluppate nel rapporto precedente (Colao 2009), l'intensità del segnale emesso dal singolo pixel vs la lunghezza d'onda è trattato nello stesso modo di quello relativo all'involuppo del segnale sonoro ricevuto per ogni singolo voxel in STSS500.

Tabella 2 – Campioni analizzati e dettagli delle relative acquisizioni

<i>Oggetto</i>	<i>Ident.</i>	<i>Immagini acquisite</i>	<i>Dimensione matrice</i>	<i>Sezioni</i>	<i>Tipo</i>
Anfora	ANPH	1	32 x 32	17	Simulazione acustica
Vasca vuota	POOL	1	16 x 16	426	Riferimento acustico
Pedana legno	PED	2	16 x 16	426	Immagine acustica
Cubo plastico	CUBO	1	16 x 16	426	Immagine acustica
Cilindro	CIL1	12	16 x 16	426	Immagine acustica
Lastra metallo	HSHE	4	16 x 16	426	Immagine acustica
Stampa policromatica	TRIC	2	170 x 182	320	Imm. di riflettanza
Frammenti	FERE	2	480 x 120	320	Imm. di riflettanza
Affresco	HRAS	1	170 x 182	90	Imm. di fluorescenza

In termini di struttura dei dati, tutti gli oggetti analizzati nel presente rapporto hanno rappresentazioni assolutamente analoghe, indipendentemente dal dispositivo di acquisizione: in particolare si tratta di una serie di matrici bidimensionali ciascuna delle quali rappresenta una diversa sezione dell'oggetto ripreso. Le dimensioni delle matrici bidimensionali sono legate alla risoluzione spaziale trasversale, mentre matrici consecutive rappresentano sezioni adiacenti realizzate nel dominio spaziale per le immagini acustiche e nel dominio spettrale per le immagini ottiche.

#### 4.4. Immagini acustiche

Analizziamo in questa sezione i dati del campione CIL1, che come già illustrato precedentemente è relativo ad un cilindro metallico di diametro 50 cm e lungo circa 80 cm posto verticalmente rispetto al trasmettitore (vedi figura 1). Un esempio del segnale di ritorno, raccolto dai sedici ricevitori, è mostrato in Figura 6a e 6b; è facilmente riconoscibile l'eco di ritorno dovuto al bersaglio ed alla successiva parete distante da questo circa un paio di metri. Nel caso specifico la distanza della telecamera dal bersaglio è di 8 metri e 10 metri dalla parete. Essendo i 16 ricevitori eguali e con ampiezza d'ascolto non formata 16 x 16 deg, i segnali differiscono tra loro unicamente per la fase, per via delle distanze leggermente diverse.

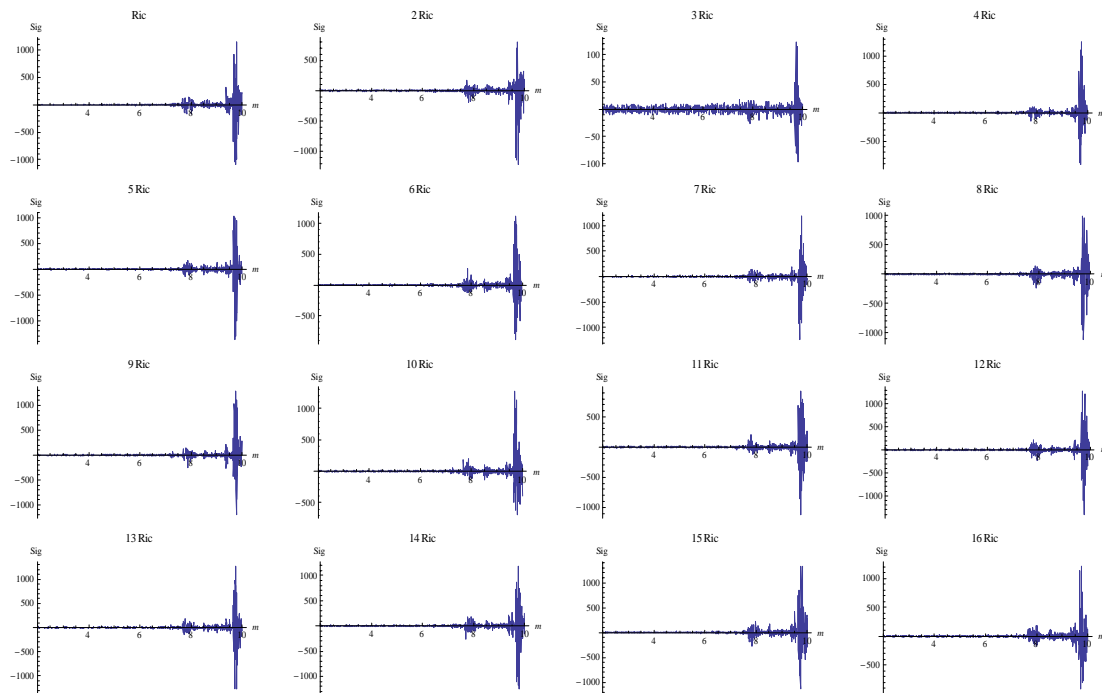


Figura 6a - Segnale di ritorno come raccolto dai 16 ricevitori di STSS500.

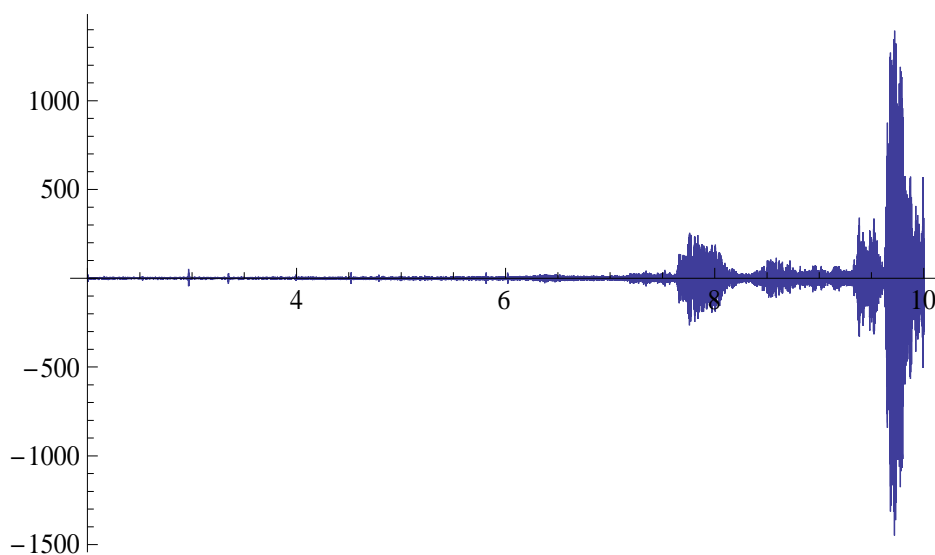


Figura 6b – Ampiezza del segnale di ritorno del primo dei 16 ricevitori di STSS500. In ascissa la distanza in metri dal trasmettitore, in ordinata l’ampiezza in unità arbitrarie.

In Figura 6a si nota come il segnale del terzo ricevitore sia di ampiezza minore di quello degli altri canali, e corrispondentemente con un rapporto S/N circa dieci volte inferiore. La causa è probabilmente dovuta ad un malfunzionamento casuale che si ritrova in circa il 70% delle misure eseguite.

Il segnale di ritorno dal bersaglio ha, naturalmente, una lunghezza temporale superiore a quella del treno d’onde emesso a causa dello slargamento del segnale riflesso; questo può essere notato nella parte d’impatto meglio evidenziata in Figura 6b. Tale slargamento è dovuto a fenomeni di penetrazione del segnale ed elasticità del materiale del bersaglio e dalla sua geometria che modificano il segnale diffuso.

La conoscenza delle frequenze identifica l’angolo nello spazio da dove è stata emessa: infatti solo gli oggetti posti ad un certo angolo, rispetto al trasmettitore, sono illuminati con quella frequenza. Per eliminare l’ambiguità dovuta all’angolo nel piano ortogonale si esegue una formazione dei fasci ricevuti. In pratica ripetiamo quanto fatto sui fasci in

trasmissione nel piano ortogonale; in questo modo intersecando i piani otterremo l'andamento nel tempo dell'emissione di un singolo lobo.

Nel caso dell'esperimento in piscina:

- 1) il segnale viene raccolto dai 16 ricevitori con campionamento a 60 MHz per una distanza che va dai 2 metri ai 10 metri dall'antenna; otteniamo 640000 valori dell'ampiezza del segnale (2 x 8 metri a 1500m/sec campionato a 60Mhz da 640000);
- 2) per 8m si considerano sezioni del segnale della durata di 100  $\mu$ s (ovvero 8 cm per circa 100 sezioni di spazio); al fine di ottenere una maggiore precisione. Il numero di sezioni può essere aumentato se si permette la parziale sovrapposizione delle sezioni (overlap);
- 3) si formano i 16 fasci affinché ci sia una localizzazione in funzione dell'angolo di ricezione (nel piano ortogonale alla direzione di trasmissione);
- 4) si calcola lo spettro di potenza per le frequenze emesse, per quella singola sezione in ogni pixel.

Dal processamento sopra delineato si ottengono N matrici (ciascuna per una regione di spazio) di dimensione 16 x 16 i cui valori misurano l'intensità nel tempo del segnale retro diffuso ad una data frequenza.

A questo punto si pone il delicato problema di discriminatura: si tratta di mettere a punto un procedimento che, elaborando il livello dello spettro di potenza misurato in quel voxel, possa stabilire se il voxel è occupato o meno da un bersaglio fortemente retro diffondente. Un semplice procedimento è quello della sogliatura, in base al quale in ciascuna riga e colonna di una data sezione (matrici 16x16) si sostituisce 1 o 0 a seconda che il livello dello spettro sia superiore o inferiore ad una soglia stabilita. In questo modo si stabilisce che il bersaglio è o non è in una data porzione di spazio solo se la potenza ricevuta supera un fissato valore designato. A dispetto dell'apparente semplicità il procedimento nasconde notevoli complessità essendo peraltro soggetto ad errori dovuti ai segnali spuri. Tra i problemi da affrontare si ricorda per esempio quello legato all'analisi della posizione del bersaglio lungo la direzione di osservazione (a parità di riga e colonna della sezione in analisi lo spettro di potenza diminuisce in ampiezza) in quanto il segnale di ritorno è variabile e non, come ci si potrebbe aspettare, presente solo nel primo riflesso più vicino. In questo caso occorre una decisione di merito.

Limitandoci alla semplice sogliatura, si ottiene un set di matrici (una per sezione) a valori binari che indicano la presenza o meno del bersaglio: questo dato viene infine passato al sistema di rendering stereoscopico descritto in (Blasi 2009).

In questa analisi dei dati si osserva che a valle della discretizzazione in valori binari, a ciascun voxel è associata la presenza o meno di un materiale, che per semplicità è ora considerato come riflettente. Tutti i voxel che invece risultano ombreggiati dalla superficie colpita per prima dall'eco di insonificazione, rimangono nascosti in questa analisi. Lo studio delle relazioni di fase e di ampiezza di questi ultimi sono invece essenziali ai fini della identificazione e classificazione del target.

A titolo di esempio mostriamo in Figura 7 un immagine tridimensionale del campione CIL1 ottenuta considerando la riflessione dal solo strato superficiale.

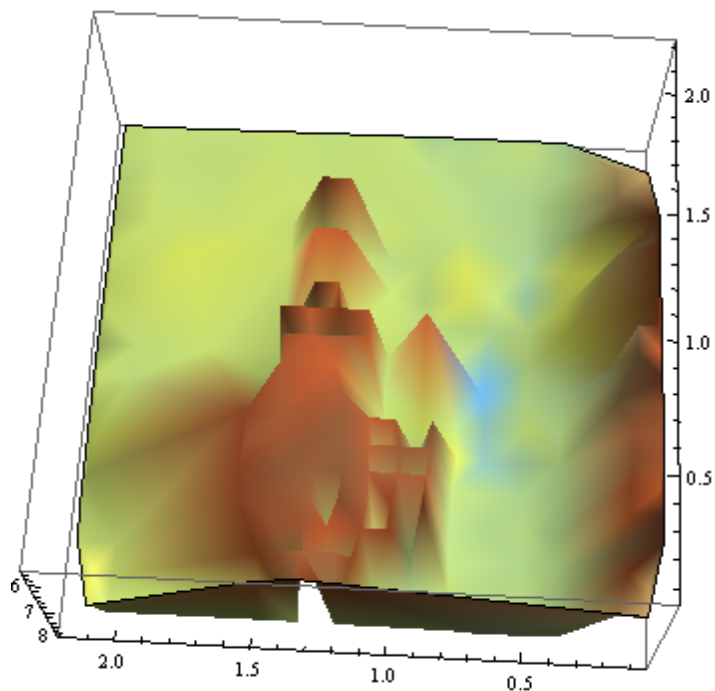


Figura 7 - Immagine tridimensionale del campione CIL1 come ottenuta dai dati grezzi.

#### 4.4.1. Considerazioni sui dati sperimentali di STSS500

Mostriamo in Figura 8a l'immagine bidimensionale di una sezione del campione CIL1 a 8m di distanza, sia come ottenuta dai dati grezzi che mediante l'uso di un filtro gaussiano (Figura 8b). Le corrispondenti immagini tridimensionali sono illustrate nelle Figure 7 e 9 rispettivamente.

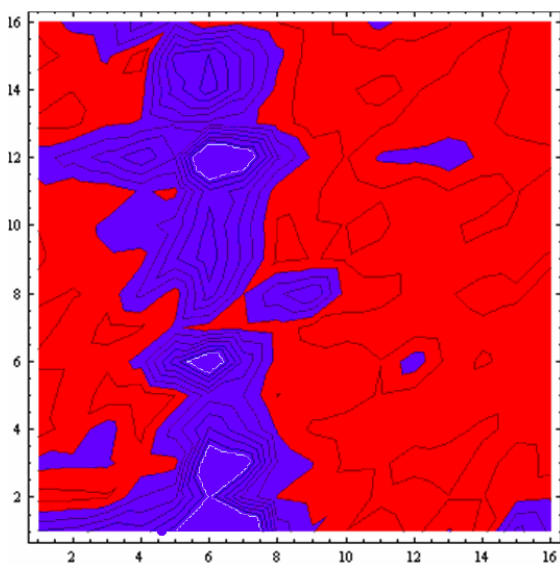


Figura 8a - Immagine bidimensionale del cilindro corrispondente ad una sezione posta ad 8 metri dal punto di ascolto.

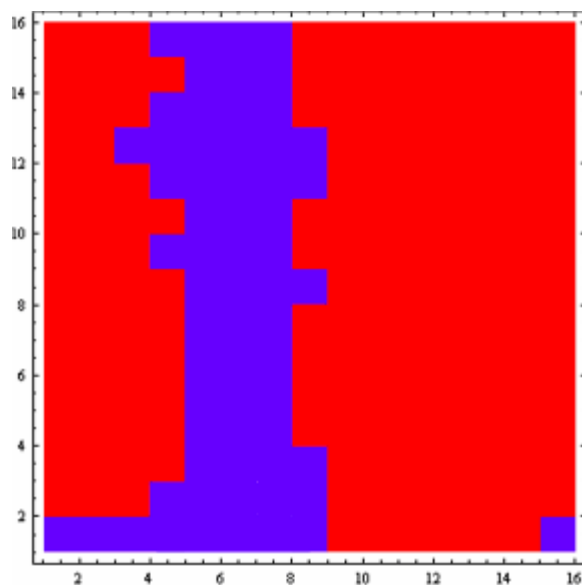


Figura 8b - Immagine bidimensionale del cilindro trattata con filtro gaussiano corrispondente ad una sezione posta ad 8 metri dal punto di ascolto

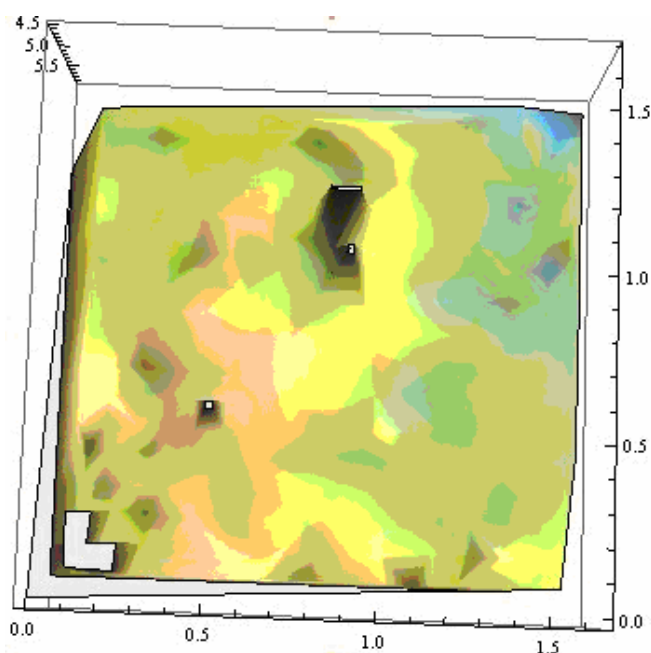


Figura 9 - Immagine tridimensionale del cilindro ottenuta usando un filtro gaussiano sulle frequenze spaziali.

Le immagini mostrate non rappresentano in modo chiaro il soggetto della scena (cilindro sormontato da coni) per una serie di motivi i più importanti dei quali sono il malfunzionamento del ricevitore n.3, e la bassa potenza di emissione dei trasmettitori. Abbiamo già accennato al fatto che il ricevitore n. 3 presenta un segnale rumoroso e questo ci ha spinto ad analizzare ulteriormente i segnali ricevuti dall'antenna STSS500 nel caso più semplice della vasca vuota.

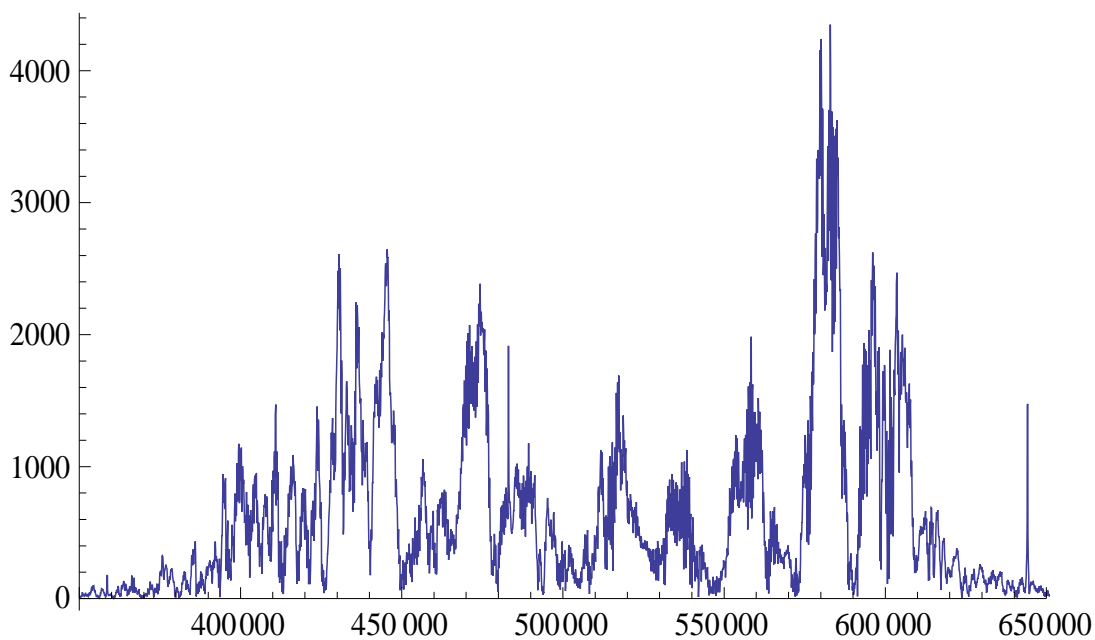


Figura 10 - Trasformata di Fourier del segnale mostrato in figura 6a (ricevitore n.1) relativa al campione CIL1.

A titolo di esempio riportiamo in Figura 10 la trasformata di Fourier del segnale acquisito dal ricevitore n. 1 (segnale mostrato in figura 6b) dalla cui analisi si possono ricavare i valori corrispondenti alle frequenze date in Tabella 1.

In particolare si intende esaminare il segnale riflesso dalla parete sia nel caso di sparo multifrequenza che in quello di singola frequenza. Le analisi sono state eseguite sui dati acquisiti a piscina vuota, così da avere il segnale riflesso e diffuso dalla sola parete terminale. Inoltre per ridurre le brusche variazioni di ampiezza nello spettro di Figura 10, dovute alla modalità di calcolo, operiamo uno *shaping* temporale sui dati acquisiti, conseguendo i vantaggi di avere uno spettro di potenza meglio definito, e di eliminare il riverbero della piscina. Per insonificazioni multifrequenza, riportiamo in figura 11a e 11b la trasformata di Fourier del segnale ricevuto dal ricevitore n.1 e dalla somma delle trasformate dei segnali di tutti i ricevitori (riflessione solo dal muro di fondo della vasca). Teoricamente ci si aspetta la presenza di tutte le frequenze emesse, le cui posizioni di centro banda nominale sono mostrate in sotto forma di righe verticali.

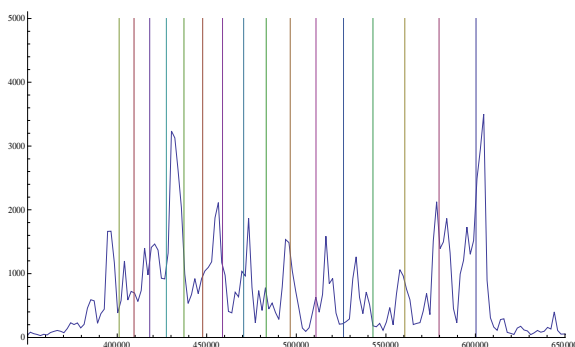


Figura 11a - Trasformata di Fourier del segnale relativo al ricevitore n. 1 nel caso di vasca vuota. Le righe verticali sono le frequenze trasmesse.

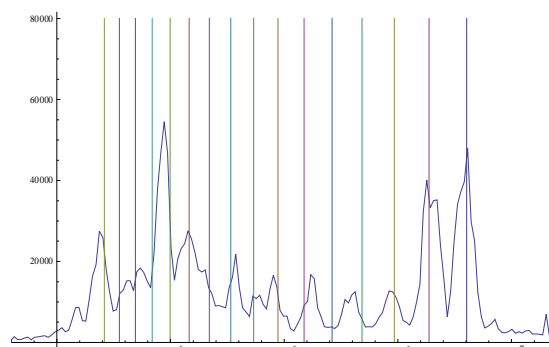


Figura 11b - Somma delle trasformate di Fourier del segnale relativo a tutti i ricevitori nel caso di vasca vuota. Le righe verticali sono le frequenze trasmesse.

Si osserva una mancanza di corrispondenza tra posizioni teoriche e nominali: è infatti evidente l'assenza di alcune frequenze e la presenza di picchi in posizioni intermedie, fatto che si attribuisce in modo generico a fenomeni di interferenza. Sebbene un'analisi più dettagliata sui motivi della mancata corrispondenza esuli dallo scopo del presente lavoro, in quanto necessita di una riflessione critica sull'architettura hardware di STSS500, abbiamo verificato il funzionamento dell'elettronica di invio, operando l'antenna in modalità di trasmissione a singola frequenza di emissione. In Figura 12 si riporta per ciascuna singola frequenza di emissione, una sezione spettrale dell'analisi di Fourier del segnale ricevuto; a parte l'eccezione della frequenza più bassa, si nota l'esatta collocazione frequenziale dei picchi, i quali sono caratterizzati per avere un SNR di circa 23db ed una larghezza a -3db di circa 10kHz. Si è così verificato che funzionamento di STSS500 in modalità di emissione a singola frequenza è corretto; tuttavia in modalità multifrequenza, oltre ad avere un considerevole calo di potenza su ciascuna frequenza emessa, si osservano effetti potenzialmente non legati ai processi fisici di diffusione e riverbero nel mezzo acquoso, che spiegano ampiamente perché le immagini 3D dei campioni esaminati, ed in particolare quella di CIL1, siano poco intelligibili.

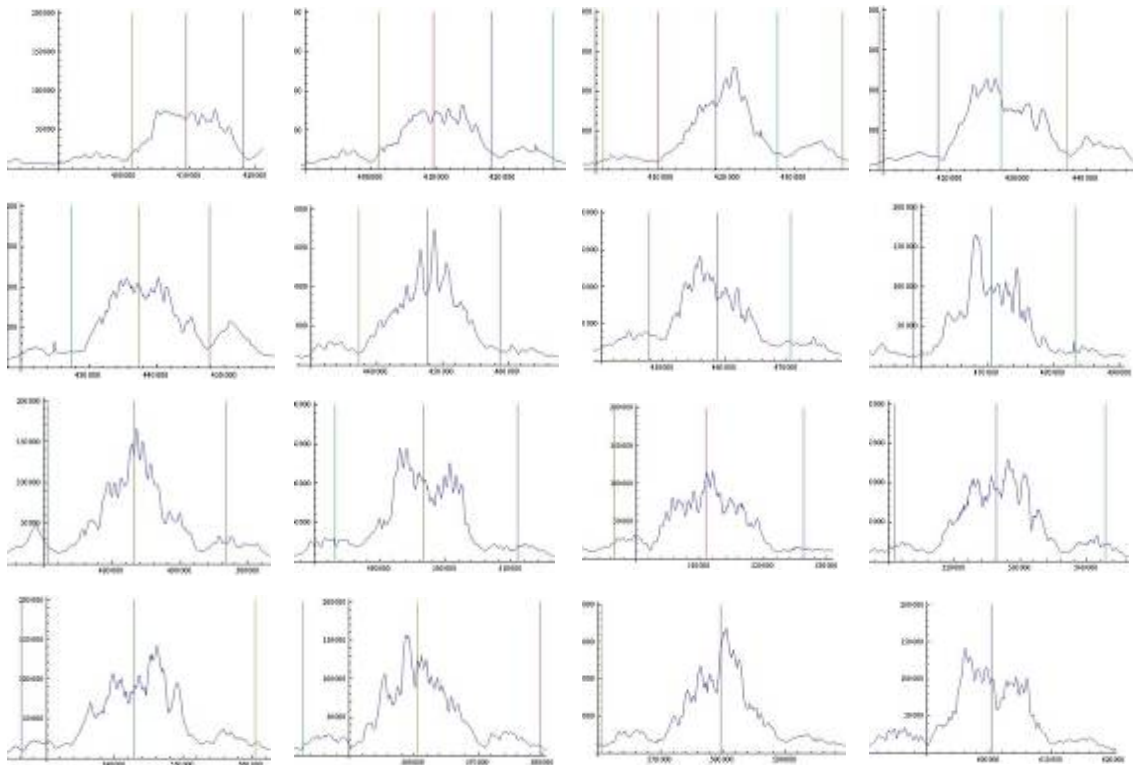


Figura 12 – Analisi di Fourier dei segnali relativi all’emissione di singole frequenze. Le righe verticali corrispondono alle frequenze nominali trasmesse.

Data la complessità di analisi dei dati dei sonar multi fascio ed in vista degli obiettivi specifici di questo rapporto, non si ritiene opportuno sviluppare ulteriormente le tecniche di data processing. Le tecniche di classificazione ed identificazione saranno dunque applicate sui dati disponibili, ovvero sulle sezioni forniteci da WASS, senza ulteriori trattamenti.

## 5. Classificazione delle immagini sperimentali

Riportiamo in questa sezione i risultati ottenuti sui dati sperimentali. In realtà non tutte le immagini elencate in Tabella 2 sono state elaborate. Le tecniche di identificazione e classificazione riportate nel seguito sono state opportunamente scelte in modo da mostrare i risultati tipici. Si è così inteso apportare ogni e tutti gli elementi necessari alla valutazione dei metodi applicati, senza appesantire la discussione. L’elaborazione completa, talvolta pedante e ripetitiva, è raccolta in Appendice A; qui tuttavia mancano i risultati di quei campioni contaminati da un rumore eccessivo, oppure relativi a semplici ripetizioni della stessa misura, od infine relativi ad immagini che non hanno dettagli, parti o sotto parti che si prestano ad essere classificati. Ci si riferisce ad esempio ai campioni completamente omogenei nel campo di vista della telecamera acustica (lastra di metallo, piscina vuota, ecc.) la cui uniformità rende inutile la classificazione.

Nelle sezioni seguenti sono esposti i risultati dello studio e classificazione delle immagini ottenute prima nel dominio acustico e poi in quello ottico. Scopo delle analisi riportate nei paragrafi seguenti, è quello di verificare l’efficacia dei vari algoritmi di identificazione e classificazione.



## 5.1. Classificazione nel dominio acustico

### 5.1.1. Immagini acustiche simulate

In questa sezione si esamina il caso di dati acustici relativi all'insonificazione di un oggetto virtuale in acqua con un sistema avente le caratteristiche nominali del sonar STSS500. Si tratta di dati ottenuti mediante simulazione, che sono quindi scevri dai molti effetti che influenzano negativamente la qualità delle immagini presentate nella sezione precedente. In particolare ricezione e la formazione dei fasci riesce in modo ideale, risultando in dati non contaminati da rumori elettronici o di riverbero; per questo motivo costituiscono un banco di prova ottimale per verificare l'efficacia degli algoritmi proposti.

Il campione in esame, denominato ANPH, rappresenta l'immagine acustica di un'anfora: relativamente al questo campione disponiamo di 17 sezioni ciascuna delle quali è una matrice di 32 x 32 pixel.

In figura 13, si riportano i dati relativi ad alcune delle sezioni maggiormente significative: si tratta di immagini in falsi colori in cui l'intensità del segnale di ritorno è rappresentato con una scala di colore che va dal blu profondo (assenza di segnale) al rosso mattone (segnale vicino alla saturazione). Sono raffigurate 6 sezioni successive, che corrispondono all'aver tagliato l'anfora, lungo piani ortogonali alla direzione di osservazione.

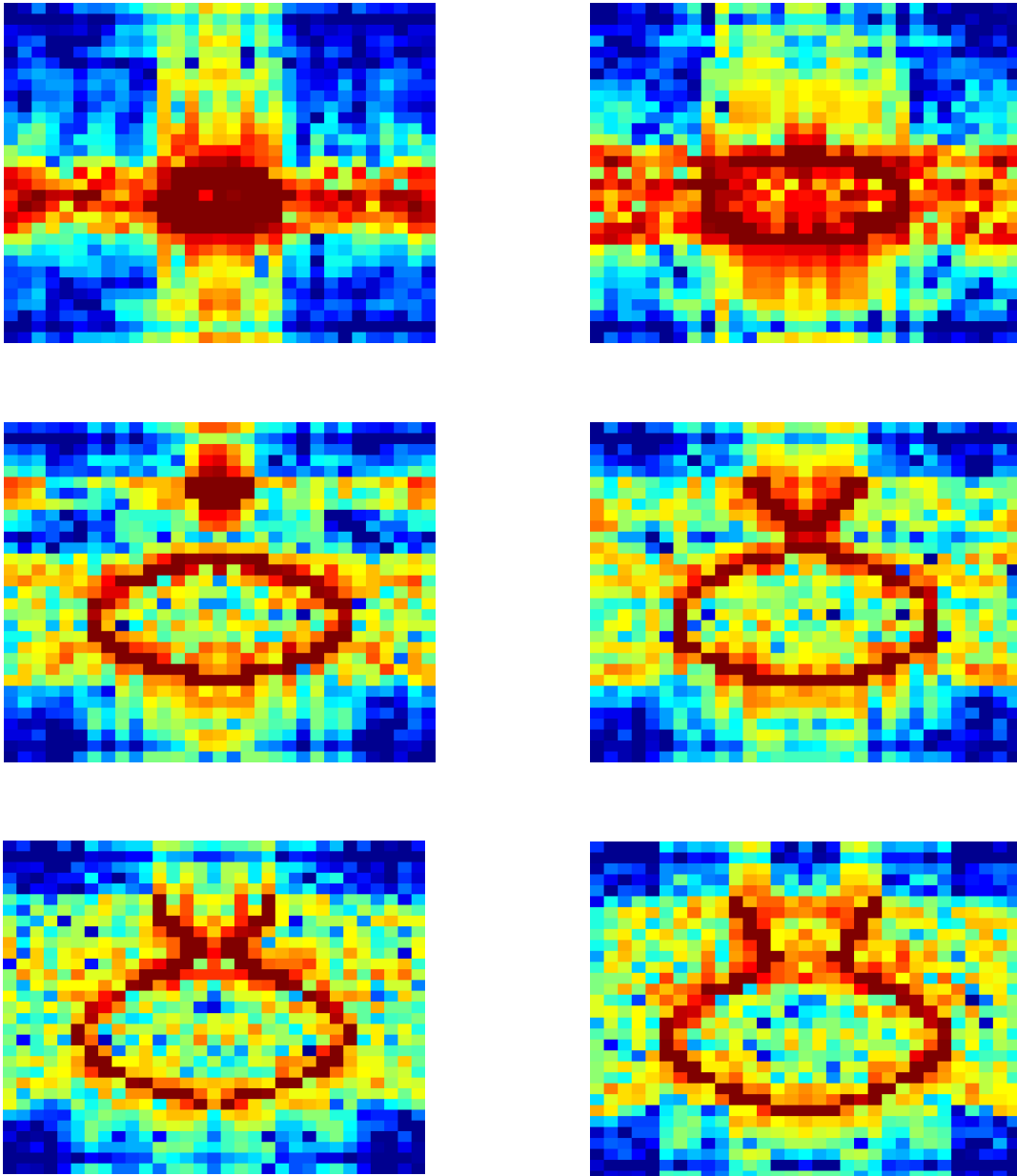


Figura 13 - Immagini di intensità delle più significative sezioni del campione ANPH (sezioni numero 1, 4, 7, 10, 12, 15)

Scorrendo visivamente le immagini della figura 13, è possibile riconoscere la sommità dell'anfora nella prima sezione e le sue sezioni trasverse nelle successive.

Basandoci sull'ipotesi che la simulazione restituisca l'involuppo temporale su un cono di osservazione, è possibile applicare i metodi di classificazione descritti nella prima parte del rapporto. Supposto che il mezzo nel quale è immersa l'anfora riempia con continuità anche il suo interno, è possibile separare lo spazio investigato in almeno due classi qualitative che corrispondono rispettivamente al volume interno ed esterno all'anfora medesima.

Scopo delle analisi riportate nei paragrafi seguenti, è quello di verificare l'efficacia di vari algoritmi al fine di differenziare e classificare varie zone dell'immagine relativa al campione ANPH.

## SAM

Come discusso precedentemente (Colao 2009), l'analisi SAM richiede un segnale di riferimento, e mancando una libreria, si deve ricorrere ad uno standard interno. A tale scopo si è utilizzato l'involuppo del segnale di insonificazione su lobi di emissione opportunamente selezionati. La scelta delle zone da utilizzare è stata guidata dalla necessità di avere un riferimento statisticamente significativo di ciascuna delle classi da rappresentare. È stata così effettuata la media degli involuপি di circa 20 andamenti temporali, su una porzione di volume occupata dall'oggetto insonificato e in modo complementare anche su un volume libero. Si sono così ottenuti i riferimenti riportati in figura 14.

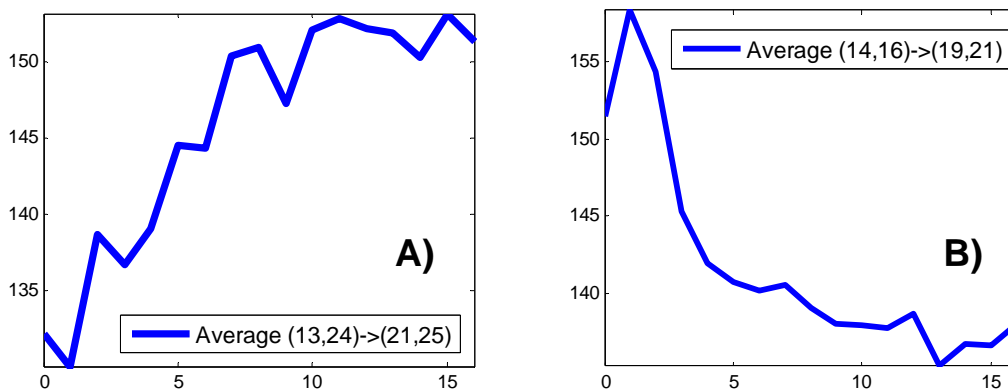


Figura 14- Riferimento per algoritmo SAM per un volume investigato libero A) e dall'anfora B).

Il risultato dell'analisi SAM è riportato in Figura 15, nella quale, al fine di rendere più evidente l'identificazione delle aree di similitudine spettrale, si utilizza una rappresentazione a soglia: in questo caso si dividono i pixel dell'intera immagine in due gruppi, realizzando così la classificazione richiesta. Si associa ogni determinato pixel al primo od al secondo gruppo condizionatamente al fatto che la soglia sia superata o meno. Nel caso di questa immagine la soglia è stata posta a 0.1 corrispondente ad un angolo (nello spazio vettoriale) di circa 6deg. L'osservazione di Figura 15 dimostra la prestazione accettabile dell'algoritmo SAM, evidenziando peraltro un fenomeno di *aliasing* piuttosto rilevante, inevitabilmente presente sui dati simulati, la cui presenza era intuibile già dall'osservazione di Figura 13 ed in particolare 13A. Qualora sia necessario aumentare l'affidabilità dell'identificazione è possibile eliminare questo artefatto ricorrendo ad un opportuno filtro di *shaping* sulle frequenze spaziali contenute nel dato digitale di ingresso.

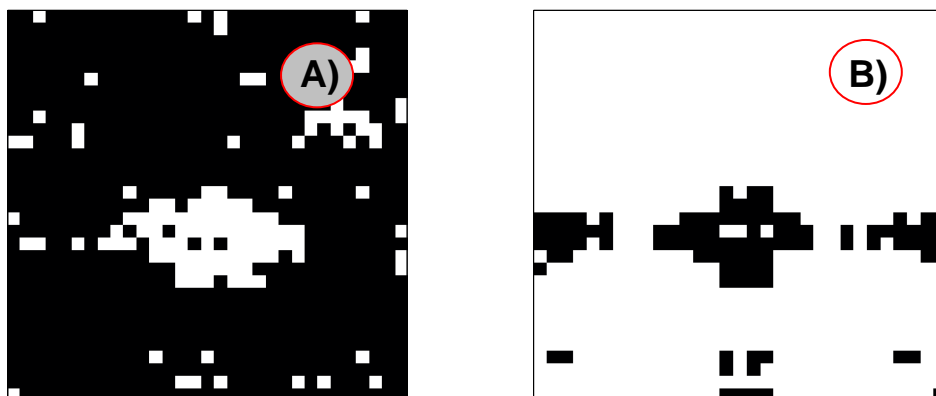


Figura 15 - Classificazione con algoritmo SAM per un volume investigato libero A) e occupato B) dall'anfora.

## SCM

Un risultato significativamente migliore si ottiene con l'applicazione dell'algoritmo SCM, mostrato in Figura 16. Anche se da un punto di vista qualitativo il risultato è simile a quello ottenuto con l'algoritmo SAM, in questo caso si ha un'evidente maggiore correlazione con il dato di insonificazione.

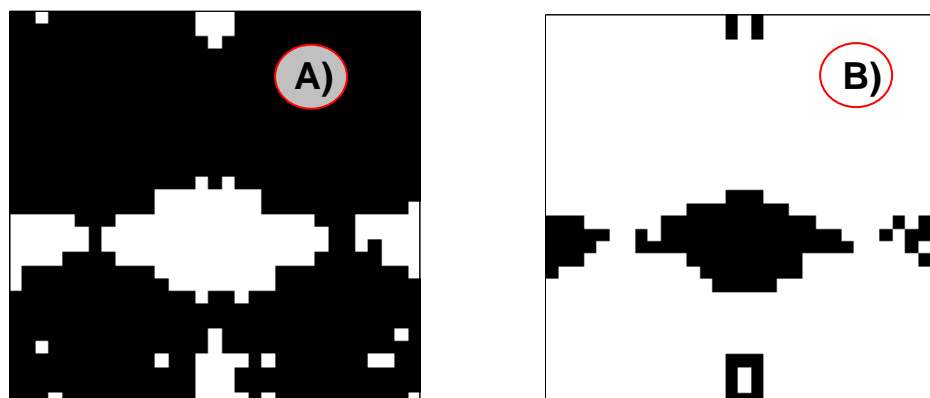


Figura 16 - Classificazione con algoritmo SCM per un volume investigato libero A) e occupato B) dall'anfora.

Il miglioramento ottenuto con la SCM era aspettato, in quanto quest'ultima tecnica è sensibile al segno della correlazione con il campione di riferimento al contrario di quanto avviene con la tecnica SAM.

### 5.1.2. Immagini acustiche sperimentali

In questa sezione si esamina il caso di dati acustici relativi all'insonificazione del campione CIL1 in acqua acquisito con il sonar STSS500: si tratta di dati sperimentali, i quali sono purtroppo contaminati da rilevanti interferenze elettroniche.

L'immagine acustica, già mostrata in Figura 7, rappresenta una semplice figura geometrica: un cilindro sormontato ai due estremi da due coni di pari area di base.

Applichiamo gli algoritmi di classificazione, basandoci sull'ipotesi che il sonar STSS500 restituisca l'involuppo temporale su ciascun cono di osservazione. Risulta ipotizzabile separare lo spazio investigato dal sonar in almeno due classi qualitative che corrispondono rispettivamente al volume interno ed esterno al cilindro.

### ***Metodo basato sul baricentro***

Una prima classificazione può essere effettuata col metodo del baricentro, la cui mappatura è riportata in Figura 17.

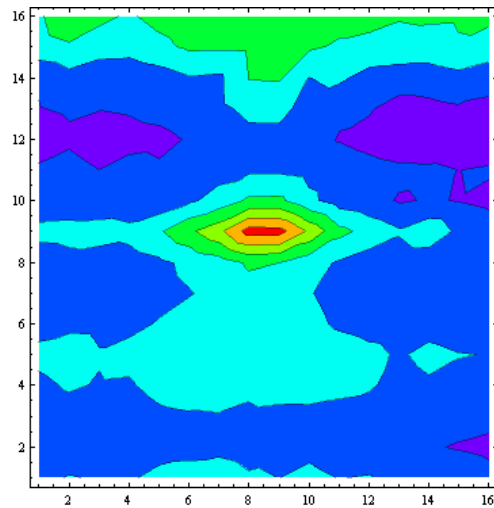


Figura 17 – Mappa di classificazione del campione CIL1 col metodo del baricentro.

La figura riporta in falsi colori i diversi valori del risultato dell'elaborazione, con una scala che va da un minimo rappresentato in rosso al massimo rappresentato in blu. Sebbene il cilindro appaia vagamente schiacciato ai poli, otteniamo un'immagine con una evidente simmetria, sia rispetto ad un asse verticale che a quello orizzontale che si ritiene più intellegibile di quella di Figura 7.

## **SAM**

Come discusso precedentemente, l'analisi SAM richiede un segnale di riferimento; mancando una libreria standard, si utilizza una selezionata area interna all'immagine acustica acquisita. La scelta del riferimento è stata guidata dalla necessità di avere una segnatura rappresentativa di una delle classi da individuare. Il risultato ottenuto è riportato in Figura 18 che dimostra la accettabile attendibilità dell'algoritmo SAM

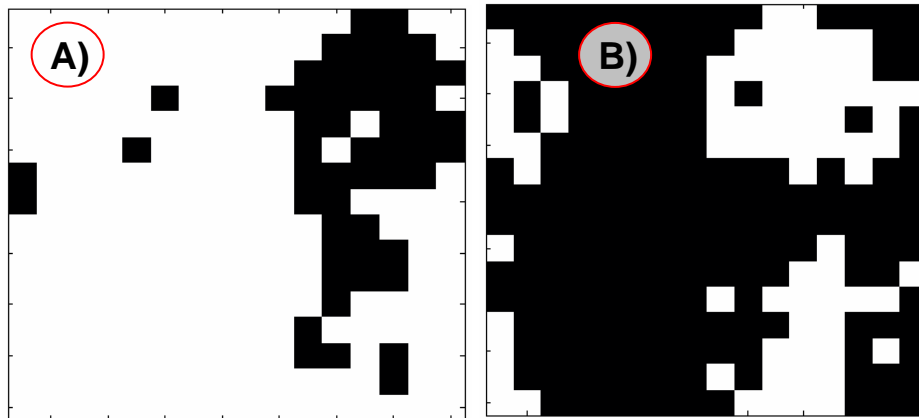


Figura 18 - Classificazione con algoritmo SAM per un il campione CIL1, su volumi interni A) ed esterni B) al cilindro.

## SCM

Un risultato ottenuto con l'applicazione dell'algoritmo SCM è riportato in Figura 19. Anche se da un punto di vista qualitativo il risultato è simile a quello riportato in Figura 18, si osserva ora che la classificazione della parte interna all'oggetto ripreso è migliore, mentre il volume esterno è classificato in modo non soddisfacente.

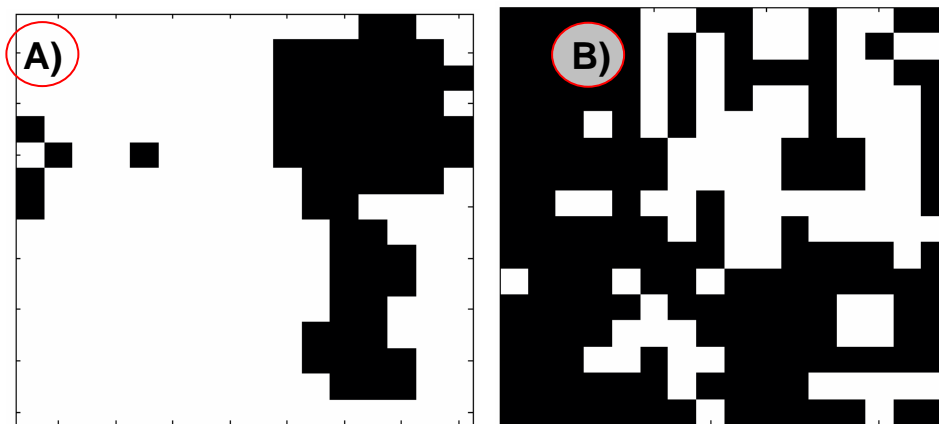


Figura 19 - Classificazione con algoritmo SCM per un il campione CIL1, su volumi interni A) ed esterni B) al cilindro.

## 5.2. Classificazione nel dominio ottico

Sono riportati in questa sezione i risultati ottenuti dall'applicazione degli algoritmi di classificazione ed identificazione ad immagini ottiche di cui è stata rilevata l'emissione spettrale di riflettanza e di fluorescenza.

Le immagini di riflettanza, ottenute con lo scanner spettrale SPECIM, sono relative ad esperimenti effettuati su diversi oggetti: il primo, posto in aria, ha fornito una immagine policromatica bidimensionale; le altre scene scansionate sono relative ad oggetti immersi in acqua.

## 5.2.1. Immagini di riflettanza

### Campione TRIC

Il soggetto della prima scansione, è un campione costituito da una policromia su carta ottenuta dalla stampante RICO mod. Aficio SPC411D, mostrato in Figura 5a. La scelta di questo soggetto è stata fatta appositamente, a causa di una particolarità che ben si presta a verificare le capacità di classificazione degli algoritmi implementati. Sappiamo infatti che il dispositivo utilizzato per la stampa effettua il *rendering* del colore con la tecnica di tricromia, in accordo alla quale si sovrappongono pigmenti di colore diverso al fine di ottenere - per sottrazione - la cromaticità desiderata. I pigmenti contenuti in ciascuna cartuccia di toner, sono ovviamente caratterizzati da emissioni spettrali distinte, e come immediata implicazione si ha quella di poter decomporre la scansione spettrale in accordo alla presenza e consistenza di film di pigmento depositato sulla carta.

Obiettivo del riconoscimento diventa perciò quello di identificare e localizzare le aree nelle quali è presente un dato pigmento. Poiché si ha il completo controllo della localizzazione della deposizione, le analisi eseguite si prestano ad una immediata verifica della capacità di corretta classificazione.

Incidentalmente notiamo che i dati di riflettanza possono essere utilizzati per la fedele riproduzione cromatica del soggetto. In prima approssimazione si può ottenere tale scopo con l'estrazione delle ampiezze di segnale alle bande 400nm, 530nm e 650nm (convenzionalmente denominate RGB) e realizzare la sovrapposizione con uguali pesi. Un esempio del risultato ottenibile con tale tecnica è riportato in Figura 20.

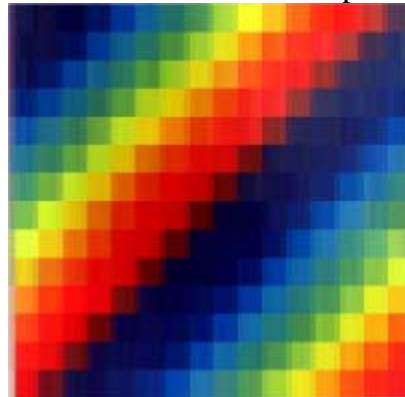


Figura 20 – Riproduzione del campione di test in tricromia effettuata mediante estrazione e sovrapposizione delle ampiezze delle bande R, G, B.

### SAM

Come noto il metodo di classificazione SAM si basa sul valore dell'angolo formato tra uno spettro di riferimento e quello in esame. Per questo specifico caso il riferimento necessario è stato costruito facendo una media degli spettri all'interno di aree monopigmentate indicate in Figura 21.

Il risultato della mappatura di somiglianza è riportato in Figura 22.

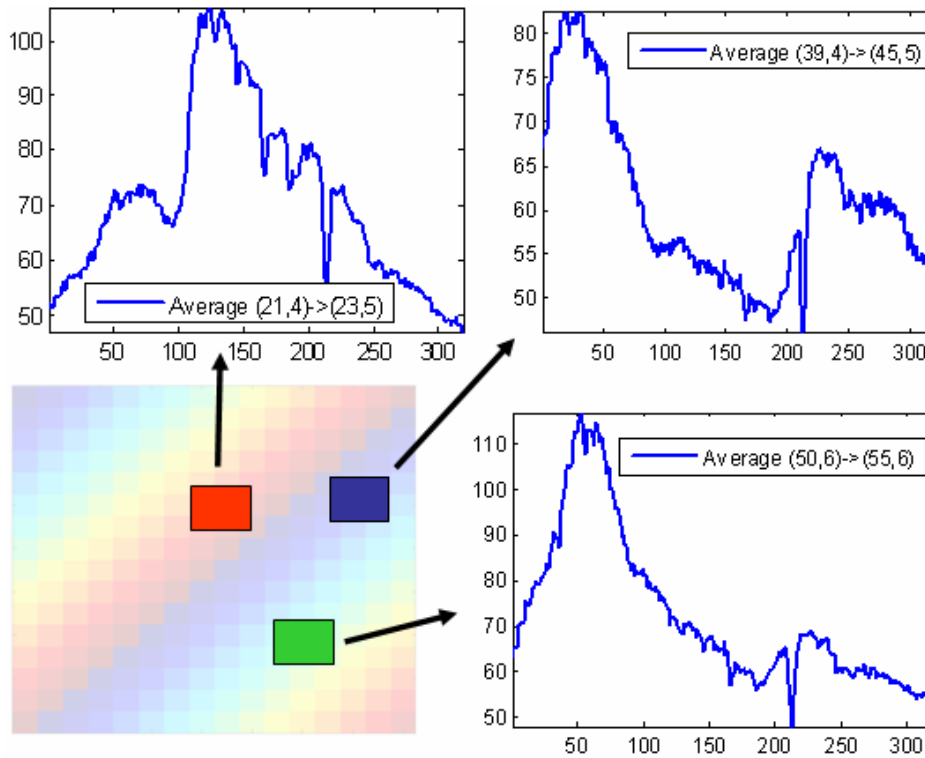


Figura 21- Selezione dei riferimenti per gli algoritmi SAM e SCM; le aree scelte sono rappresentative dei pigmenti rosso (alto a sinistra), verde (basso a destra) e blu (alto a destra).

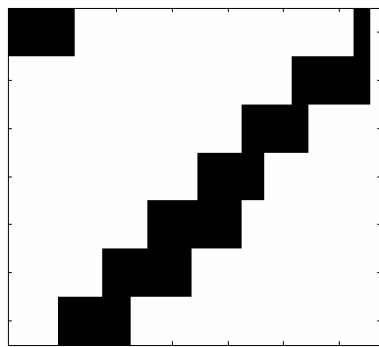


Figura 22A – Classificazione con riferimento spettrale piccato nel blu

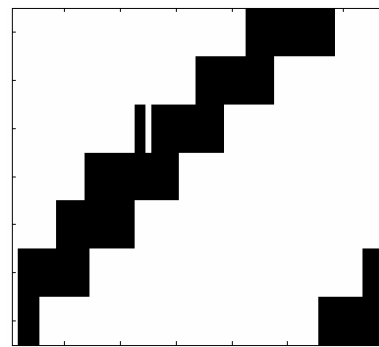


Figura 22B - Classificazione con riferimento spettrale piccato nel rosso

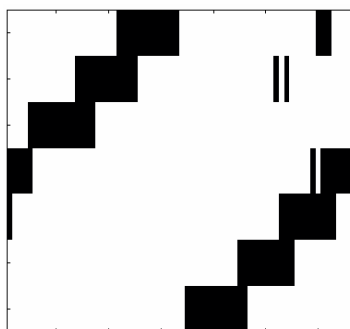


Figura 22C – Classificazione con riferimento spettrale piccato nel verde



## **SCM**

Classificazioni analoghe a quelle di Figura 22 sono state ottenute con l'algoritmo SCM (non riportate in questo rapporto). Il risultato positivo di questo test, atteso per via della sua semplicità, dimostra la sostanziale correttezza formale nella implementazione degli algoritmi di classificazione, senza tuttavia offrire una reale valutazione critica delle loro capacità a causa della eccessiva idealizzazione delle condizioni di misura e della quasi totale mancanza di elementi di disturbo.

## **Campione FERE**

Un secondo campione da cui sono state ottenute immagini di riflettanza è relativo ad una serie di reperti archeologici di origine romana che sono stati immersi in acqua e ripresi con lo strumento basato sullo scanner SPECIM. In Figura 23 si riporta l'immagine RGB corrispondente.



Figura 23 – Riproduzione della scena con reperti archeologici sommersi.

## **SAM**

Il metodo di classificazione SAM necessita di un riferimento, che in questo specifico caso, è costruito facendo estraendolo dagli spettri contenuti nella medesima scansione. L'obiettivo che ci si propone di raggiungere è l'identificazione di aree occupate da oggetti costituiti da materiali diversi. Dalla Figura 23 si osserva che diversi materiali hanno una diversa pigmentazione naturale. Questa osservazione non è inattesa ed ha analogie molto stringenti con il caso della classificazione fatta su immagini provenienti

dal telerilevamento passivo. Infatti vale la pena di ricordare che le proprietà di similitudine degli spettri di riflettanza dei terreni e delle rocce, sono alla base della classificazione automatica della origine geologica dei rilievi provenienti dal telerilevamento passivo (Yuhas 1992, Clark 1995).

Nel caso in esame sono state scelte tre aree differenti la cui posizione è riportata in Figura 24; la prima è rappresentativa di materiali argillosi e lapidei, la seconda delle terrecotte, e l'ultima dello sfondo. Il risultato della classificazione come mappa binaria è riportato in Figura 25; in questa elaborazione è stata utilizzata una soglia pari a 0.13 (corrispondente ad un angolo di circa 8deg nello spazio vettoriale delle segnature spettrali).

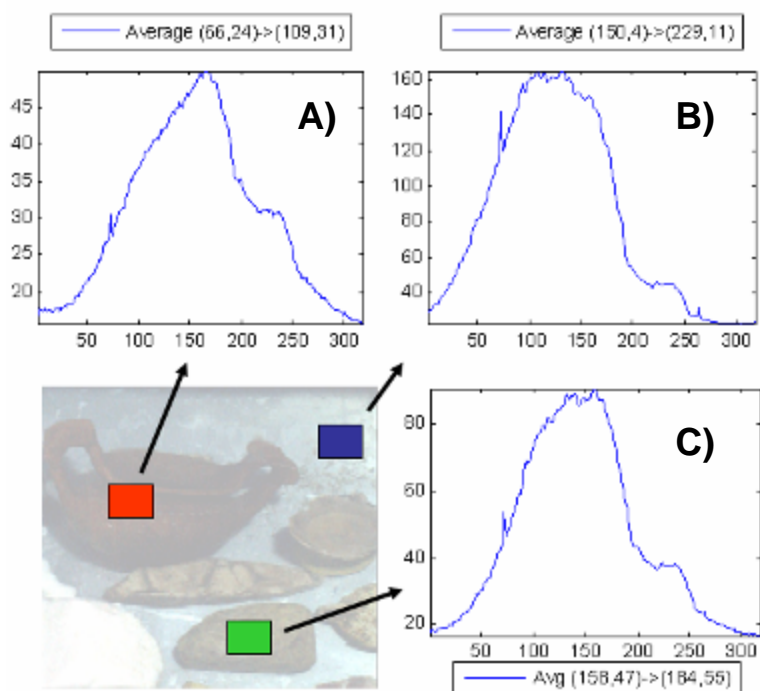


Figura 24 - Selezione dei riferimenti per gli algoritmi SAM e SCM; le aree scelte sono rappresentative dei pigmenti dei terrecotte (A), dello sfondo (B), e dei materiali argillosi e lapidei (C).

Si nota in Figura 25B come non risulta possibile distinguere le argille dai materiali lapidei: ciò è una diretta conseguenza del fatto che queste due classi di materiali hanno una segnatura spettrale simile.

È opportuno notare che il fallimento di una corretta classificazione non implica una intrinseca limitazione della tecnica utilizzata (la SAM nel caso specifico), ma deve piuttosto essere messa in relazione al fatto che la segnatura sperimentalmente ottenuta dipende strettamente dalla distribuzione spettrale della sorgente. In altre parole utilizzando un'opportuna sorgente luminosa, eventualmente monocromatica, la SAM potrebbe agevolmente discriminare questi materiali. La ricerca delle sorgenti che realizzano la discriminazione ottimale delle segnature spettrali, è argomento di natura sperimentale che esula dallo scopo del presente rapporto.

È opportuno notare infine che il metodo SAM è insensibile al fenomeno del metamerismo, realizzando una mappatura di somiglianza che sfrutta appieno tutta l'informazione contenuta nello spettro di riflettanza. Il colore apparente, ovvero quello

percepito dall'occhio umano, non può servire per una efficace mappatura in quanto, per effetto del metamerismo, dipende dalle sorgenti di illuminazione.



Figura 25A - Classificazione con riferimento spettrale sulla terracotta

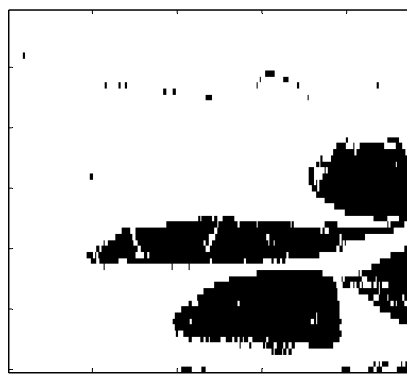


Figura 25B – Classificazione con riferimento spettrale sui materiali lapidei



Figura 25C – Classificazione con riferimento spettrale sullo sfondo del soggetto

### **SCM**

Classificazioni analoghe a quelle della SAM state ottenute con l'algoritmo SCM (riportate in Appendice A).

## **5.2.2. Immagini di fluorescenza**

### **Campione HRAST**

Sono riportati in questa sezione i risultati ottenuti dall'applicazione degli algoritmi di classificazione sull'immagine di un affresco situato nella chiesa medioevale di Hrastovlje (Slovenia). L'affresco in questione presenta un'interessante peculiarità che bene si presta a verificare l'applicabilità dei metodi discussi in precedenza, infatti è stata riportata la presenza di un film consolidante sottile invisibile ad occhio nudo, di cui non è nota né la distribuzione spaziale né lo spessore. L'uso di film allo scopo di consolidare questo tipo di opere d'arte è tipica delle opere di conservazione, ma non è storicamente documentata negli archivi contenenti i dettagli dei restauri effettuati nella chiesa di

Hrastovlje; ciononostante la sua individuazione è risultata particolarmente agevole mediante l'applicazione della tecnica LIF. In questa sezione verificheremo l'applicabilità dei metodi di classificazione al fine di evidenziare le zone trattate rispetto a quelle non trattate.

In figura 26 si riporta l'immagine in falsi colori ottenuta combinando con pesi eguali, tre immagini di fluorescenza a 360nm, 475nm e 525nm, ed assegnando ciascuna di queste bande rispettivamente ai canali Rosso, Verde e Blu per ottenere il *rendering* policromatico. Questa elementare elaborazione di immagine è già sufficiente per evidenziare le zone distinte che si prestano ad una classificazione, e tra queste di particolare interesse è quella corrispondente alla strisciatura verticale (di apparente colore bluastro), che non visibile ad occhio nudo o con fotografie convenzionali, è da mettere in relazione alla presenza del film di superficiale. Tuttavia è importante sottolineare la incapacità di questa semplice rappresentazione a sottodifferenziare all'interno della strisciatura verticale due regioni, rispettivamente relative ad aree con solo film di consolidante (nella metà superiore), e ad aree con film consolidante e rifacimento del pigmento sottostante (nella metà inferiore). Una migliore classificazione è ottenuta con l'applicazione della tecnica SVM, o con il metodo del baricentro, come mostrato nelle sezioni successive.

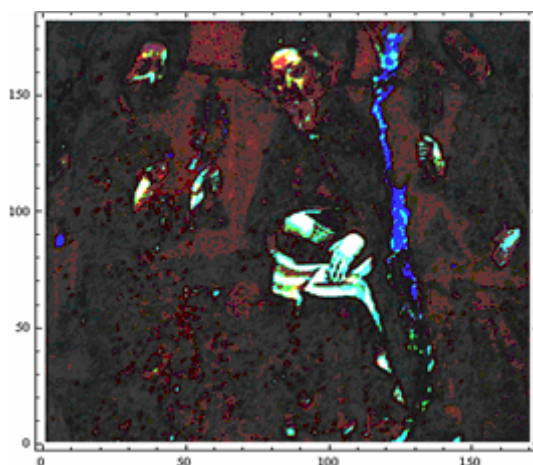


Figura 26 - Immagine LIF composta con la fluorescenza a 525nm, 360nm e 475nm nei canali RGB.

Al fine di identificare con maggiore precisione la presenza del film superficiale mediante la sua segnatura spettrale, è stato realizzato un filmato che riporta le 90 sezioni spettrali in rapida sequenza.

### ***Metodo basato sul baricentro***

Una prima classificazione è stata effettuata selezionando i pixel col metodo del baricentro. L'istogramma con la distribuzione delle intensità di fluorescenza spettrale è riportata in Figura 27a.

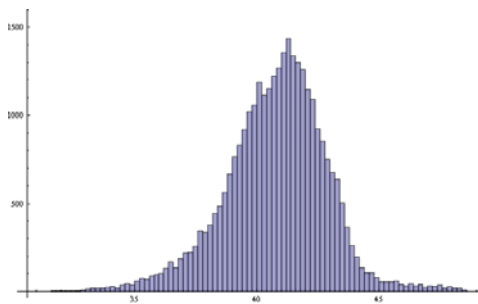


Figura 27a - Istogramma delle ampiezze dei canali da 1 a 90; la scala delle ascisse è centrata attorno al canale 42, essendo trascurabile il peso delle code.

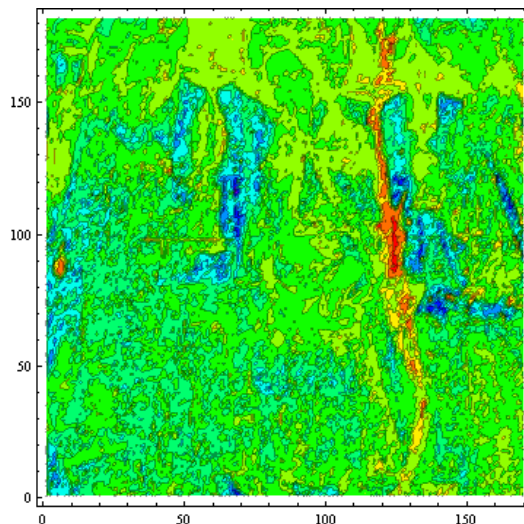


Figura 27b - Classificazione col metodo del baricentro

In accordo al metodo del baricentro, selezionando i pixel ed effettuando il momento primo otteniamo il risultato riportato in Figura 27b. I colori vanno dal blu al rosso secondo la scala il cui intervallo è stabilito tra il valore massimo e quello minimo della figura stessa. La striscia nella quale è presente il film superficiale di consolidante risulta ben evidente ed appare colorata con toni che virano verso il rosso, mentre la parte inferiore appare differenziata in quanto colorata con tonalità tendenti al giallo. Sulla base di questo metodo di classificazione è anche possibile notare altre aree trattate (con apparente colore rosso), tra cui la maggiore in termini di superficie appare sul lato sinistro.

### ***Metodo basato sul momento secondo***

Il momento secondo (risultati sono mostrati in appendice) non dà risultati significativi ai fini della classificazione. In effetti osserviamo che le signature spettrali sono dominate in genere dalla emissione di fluorescenza piccata nel blu (dovuto al contributo predominante dell'intonaco - *plaster*), con una larghezza spettrale relativamente insensibile alla presenza sia di pigmentazione del colore che del consolidante superficiale. Questo motivo costituisce una possibile spiegazione al fallimento della classificazione col metodo del momento secondo.

### ***SAM***

Il metodo di classificazione SAM si basa sul valore dell'angolo formato tra uno spettro di riferimento e quello in esame. Mancando in questo caso una libreria contenente spettri di consolidanti standard, il riferimento necessario è stato costruito facendo una media degli spettri all'interno di un'area evidenziata in figura 28a. In Figura 28b è mostrato il corrispondente spettro di riferimento utilizzato per l'algoritmo SAM.



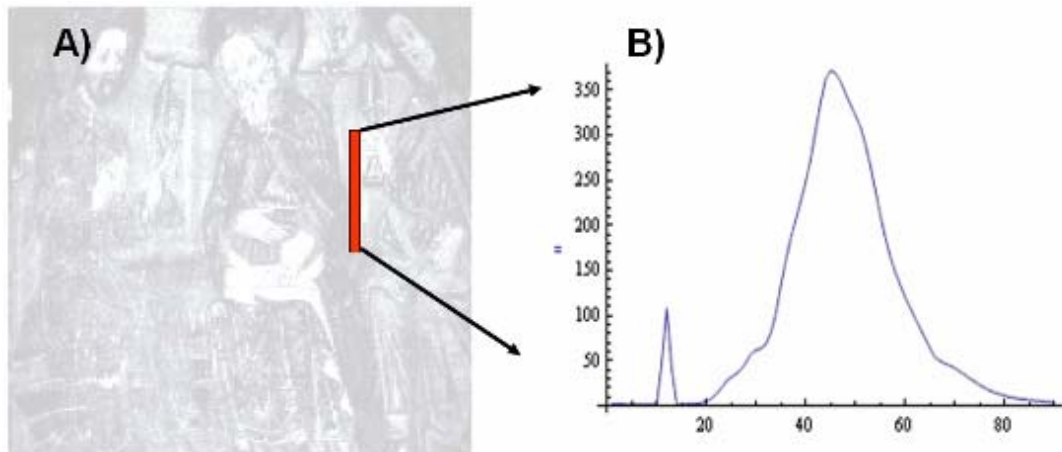


Figura 28 – A) Zona di riferimento per l’identificazione delle aree trattate (evidenziata con rettangolo rosso) e B) spettro di riferimento per le mappature di similitudine.

Il risultato dell’analisi è mostrato in Figura 29a, dove in falso colore è rappresentato il valore dell’angolo che ciascun pixel forma con il riferimento. In pratica a zone dello stesso colore corrispondono spettri simili nel senso della SAM.

L’osservazione di Figura 29a mostra la buona visibilità della striscia di consolidante, che può essere resa ancora più evidente se si utilizza la rappresentazione a soglia riportata in Figura 29b: in questo caso si dividono i pixel dell’intera immagine in due gruppi, i quali realizzano la classificazione richiesta tra aree trattate e non trattate con il consolidante. Quindi si associa ogni determinato pixel al primo od al secondo gruppo condizionatamente al fatto che sia superata o meno la soglia di 0.1 che corrisponde ad un angolo di circa 6deg nello spazio vettoriale. L’immagine a due colori così ottenuta è mostrata in Figura 29b e rende meglio identificabile l’individuazione delle aree trattate.

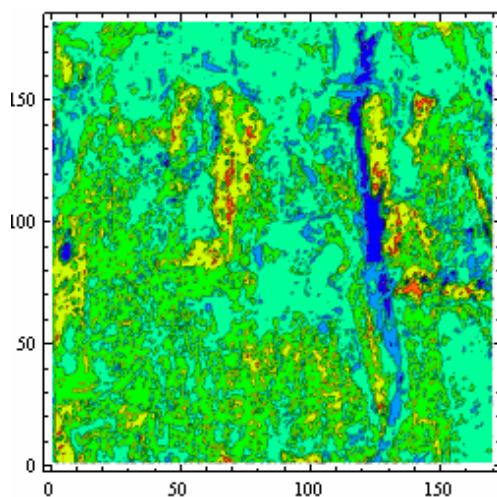


Fig. 29a Mappatura di somiglianza SAM con riferimento di Figura 27b.

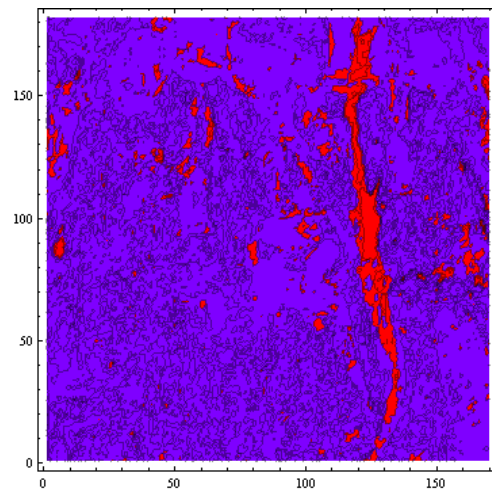


Fig. 29b Mappatura a due colori mediante tecnica SAM, le aree di colore rosso sono state trattate con consolidante superficiale.

Un obiettivo diverso, ma ugualmente interessante ai fini della classificazione delle diverse regioni trovate sull’opera in esame, è quello di identificare l’uso e la distribuzione di uno specifico pigmento. Consideriamo ad esempio il pigmento bianco/rosato utilizzato per la resa di alcuni dettagli dell’affresco e presente in modo

omogeneo e rilevante nell'area raffigurante la mano del personaggio centrale dell'affresco. In questo caso l'area ed il corrispondente spettro di riferimento sono illustrate rispettivamente in Figura 30a e 30b.

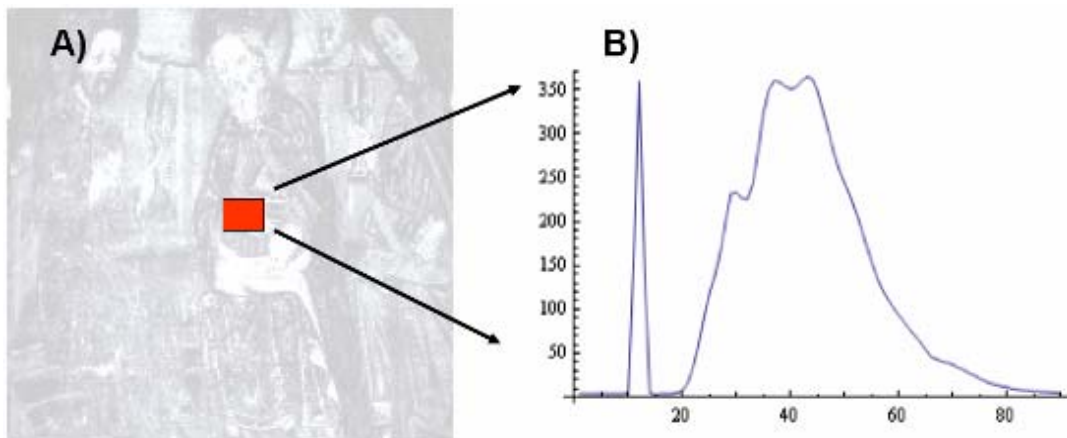


Figura 30 - Zona di riferimento per l'identificazione del pigmento bianco (evidenziata con rettangolo) e spettro medio di riferimento per le mappature di similitudine

Il risultato dell'analisi è mostrato in Figura 31, dove zone dello stesso colore corrispondono spettri simili nel senso della SAM. L'osservazione di questa figura mostra come la similitudine angolare si estende su aree la cui estensione complessiva è molto maggiore di quanto precedentemente ottenuto. Questo risultato, atteso sulla base di considerazioni generali per le quali è plausibile il diffuso l'uso del pigmento bianco, dimostra la efficacia dell'algorithm utilizzato e ne svela la utile applicazione nelle fasi di restauro e conservazione delle opere d'arte.

Come nota conclusiva, si sottolinea che il prodotto scalare non è in se una misura assoluta di somiglianza, nel senso che signature simili ad un dato riferimento non necessariamente saranno simili tra loro. Da un punto di vista pratico si deve quindi tenere conto della possibile ambiguità introdotta dalla mappatura dalla SAM.

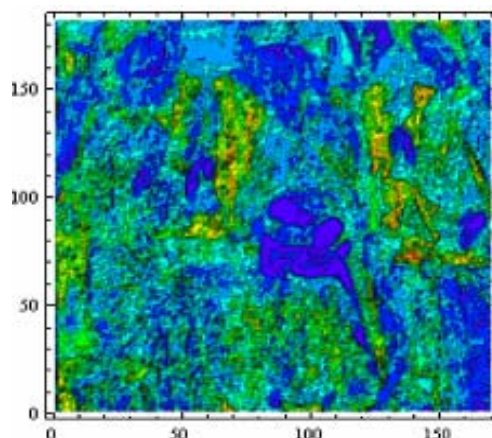


Figura 31 - Mappatura di somiglianza SAM con riferimento sul pigmento bianco.

## SCM

Un vantaggio specifico della tecnica SCM è quello di considerare le correlazioni negative consentendo così di discriminare elementi altrimenti indistinguibili. Come anche per la tecnica vista in precedenza la SCM mostra insensibilità sia all'intensità dello spettro misurato che alla potenza totale. Il riferimento utilizzato per l'identificazione del consolidante è il medesimo di quello utilizzato per la SAM e mostrato in Figura 28; in Figura 32a si riporta la mappa di correlazione SCM, mentre in Figura 32b si riporta la medesima mappatura con soglia a 0.12.

Un risultato analogo si ottiene considerando il riferimento di Figura 30, relativo allo spettro delle aree pigmentate con il bianco. In Figura 32c si riporta la mappa di correlazione SCM, mentre in Figura 32d si riporta la stessa mappatura con soglia a 0.36.

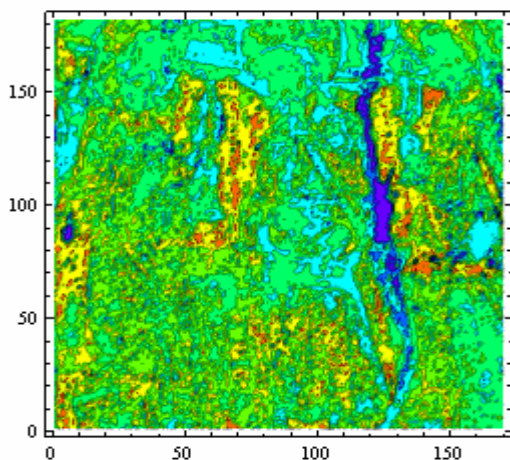


Figura 32a - Mappatura di somiglianza SCM con riferimento di Figura 27.

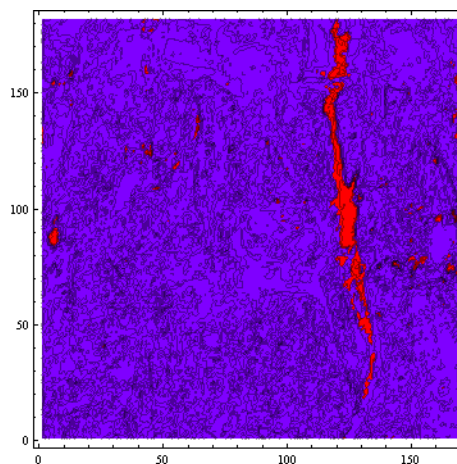


Figura 32b - Mappatura a due colori mediante tecnica SAM.

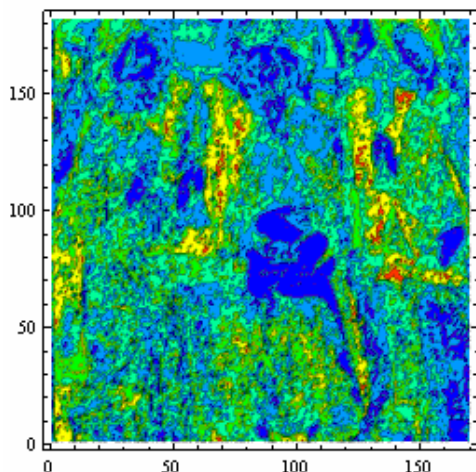


Figura 32c - Mappatura di somiglianza SCM col riferimento del pigmento bianco.

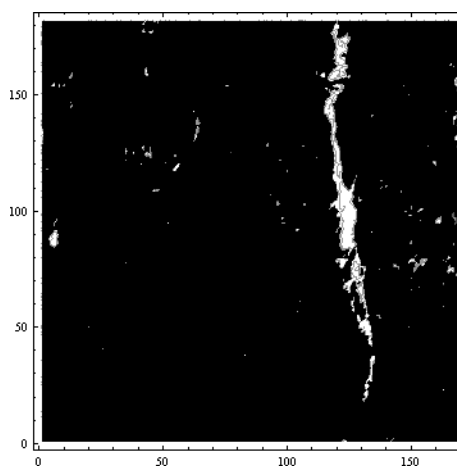


Figura 32d - Mappatura di somiglianza SCM



## **CEPTRUM**

Anche l'analisi cepstrale è in grado di riconoscere un'alterazione delle diverse segnature spettrali. Il cepstrum, definito come la trasformata del logaritmo del modulo della trasformata di Fourier del segnale riemesso in funzione della frequenza, è calcolato per ogni pixel, ottenendo così il risultato mostrato in Figura 33.

Ricordiamo che l'uso principale del cepstrum è nella stima dei parametri della voce e nell'eliminazione dei riverberi ovvero la deconvoluzione di 2 segnali di cui 1 costituito da una sequenza di impulsi ed il secondo un disturbo ritardato e/o sovrapposto al segnale emesso. Distinguiamo due casi: il primo per isolare la forma originale del segnale depurato dal rumore, il secondo invece per ricavare la struttura del riverbero.

L'applicazione al campione HRAST, mostra la capacità del cepstrum di identificare e classificare l'area ricoperta con film consolidante, in questo caso possiamo affermare che l'algoritmo distingue il consolidante assimilandolo al segnale, mentre l'analogo di una struttura di rumore e riverbero rimane assegnato alla segnatura media della pigmentazione, mappata con il colore blu in Figura 33, che naturalmente si estende ricoprire la maggior parte della superficie acquisita.

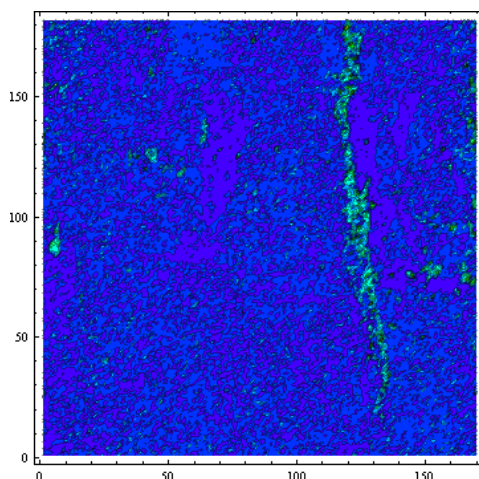


Figura 33 - Cepstrum effettuato sul campione HRAST.

## **SVM**

Una Support Vector Machine (SVM) effettua una classificazione separando in modo ottimale i dati in due o più categorie.

L'applicazione dell'algoritmo SVM può in questo caso separare efficacemente ciascun pixel come appartenente ad una delle categorie sottoelencate:

- vicino film consolidante
- vicino pigmento bianco
- altro

Un evidente vantaggio rispetto agli algoritmi tipo SAM e SCM consiste nella possibilità di specificare un maggiore numero di categorie, e quindi di effettuare la classificazione multiobiettivo in un singolo passo di elaborazione.

In Figura 34a e 34b sono mostrati gli spettri di riferimento per l'algoritmo SVM relativamente alle aree del consolidante e del pigmento bianco/rosato.

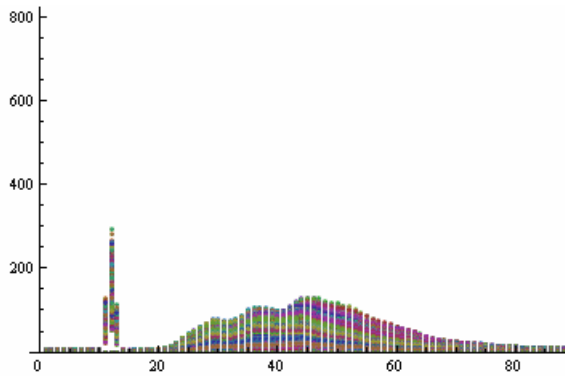


Figura 34a - Categoria degli spettri di riferimento collezionati in una piccola area con film di consolidante (vedi Figura 28).

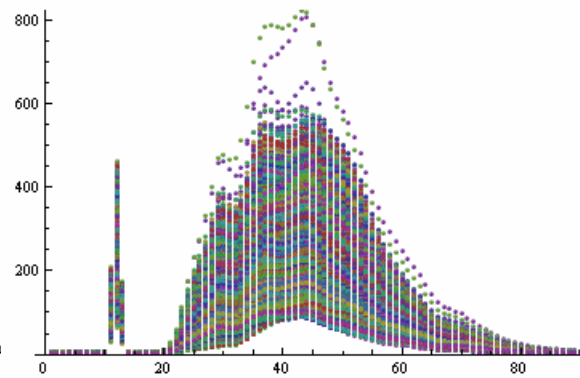


Figura 34b - Categoria degli spettri di riferimento collezionati nell'area pigmentata bianca (vedi Figura 30).

Il risultato è mostrato in Figura 35a, dove possiamo notare come la notevole distanza tra gli spettri della mano e quelli del consolidante. Risultato analogo è mostrato in Figura 35b ove si sono presi gli spettri della fronte e del consolidante.

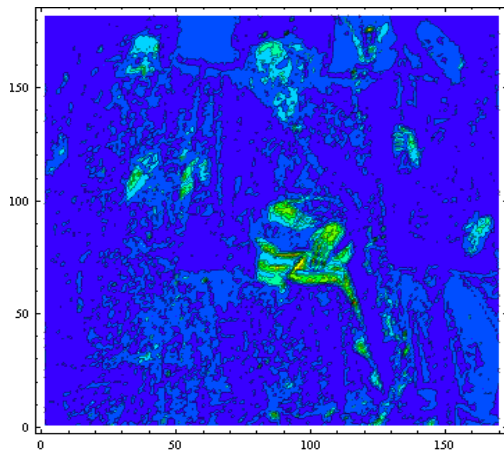


Figura 35a - Rappresentazione grafica delle due signature spettrali separate dalla media degli spettri in una piccola area della mano e del consolidante.

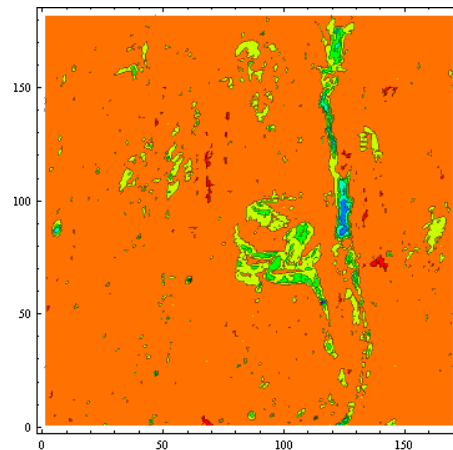


Figura 35b - Rappresentazione grafica delle due signature separate dalla media degli spettri in una piccola area della fronte e del consolidante.

La SVM si presta anche ad una classificazione “molti a molti”, con più classi. Un esempio è riportato in figura 35 ove per classi si è presa la zona della fronte, della mano e del consolidante. In mancanza di altre specifiche differenziazioni fatte sulla base di un corrispondente fisico della cui esistenza si può avere traccia nelle fasi di restauro, non si è potuto andare oltre.

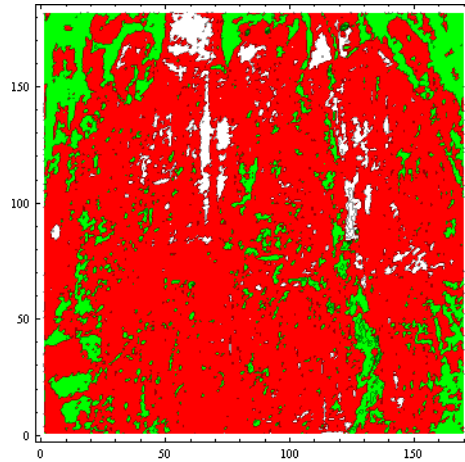


Figura 36 - Rappresentazione grafica delle tre segnature spettrali separate della media degli spettri in una piccola area della mano, della fronte e del consolidante.

In Tabella 3 mostriamo la matrice di correlazione tra misure che dovrebbero distinguere le due stesse classi di appartenenza (consolidante e resto dell'affresco). Dai valori, prossimi a 1, si evince che le tre tecniche identificano quasi gli stessi pixel rendendo l'analisi più robusta.

Tabella 3 –Tabella di correlazione per la classificazione consolidante resto sul campione HRAST

<b>Campione HRAST</b>	<i>SAM</i>	<i>SCM</i>	<i>SVM</i>
<i>SAM</i>	1	0.99	0.70
<i>SCM</i>	-	1	0.72
<i>SVM</i>	-	-	1

## 6. CONCLUSIONI

Il problema della classificazione delle immagini è stato affrontato in due fasi: nella prima è stata rivista la letteratura relativa alle tecniche più adatte allo scopo di classificare porzioni di immagini sulla base delle caratteristiche fisiche dell'oggetto che ha prodotto l'immagine, e ne sono state considerati i pregi e difetti. I metodi delineati nella prima fase e sono stati applicati in questo secondo rapporto ai dati sintetici e sperimentali, acustici ed ottici, allo scopo di verificare l'effettiva applicabilità delle tecniche precedentemente prese in esame.

Le considerazioni conclusive di maggiore interesse che possiamo trarre da questo lavoro riguardano principalmente tre punti:

- applicabilità dei metodi studiati con particolare riguardo al caso di dati acustici;
- scelta dell'algoritmo migliore;
- automatizzazione della classificazione come strumento di realtà aumentata.

### Applicabilità dei metodi proposti

I risultati ottenuti sulla classificazione delle immagini acustiche sui dati simulati sono accettabili, e mostrano l'effettiva possibilità di discriminare aree differenti sulla base degli andamenti temporali del segnale. Differenti algoritmi hanno ovviamente dimostrato differenti efficacia: tra quelli esaminati il metodo del baricentro sembra dare i migliori risultati, seguito poi dalle tecniche di mappatura basata sulla somiglianza delle segnature. Nello specifico dei dati simulati la mancanza quasi totale di elementi di disturbo rende la classificazione stabile e di buona qualità. Diverso è il caso del campione CIL1, per il quale la tecnica del baricentro è la sola a differenziare in modo accettabile diverse aree dell'immagine. Sebbene gli algoritmi SAM e SCM dimostrino una certa validità, si deve notare che il bassissimo rapporto segnale disturbo rende la classificazione incerta.

Sulle immagini ottiche sia di riflettanza che di fluorescenza i metodi SAM e SCM si sono invece dimostrati superiori rispetto agli altri. Di notevole pregio si è dimostrata la capacità di multi differenziazione della tecnica SVM ottenuta con un singolo passo processamento.

Con specifico riferimento alle immagini acustiche, si riporta la potenziale applicabilità dei metodi, anche se è opportuno sottolineare che la scarsa qualità delle immagini ricavate da STSS500 fa rimanere i risultati ottenuti di natura qualitativa.

### Scelta dell'algoritmo migliore

Sulla base dei risultati ottenuti si osserva che la scelta dell'algoritmo migliore ai fini della classificazione rimane una materia piuttosto complessa. Di volta in volta si riesce a spiegare *a posteriori* la migliore prestazione di ciascun algoritmo (vedi per esempio il caso di SAM e SCM per i dati acustici simulati), mentre risulta assai più complesso prevedere la efficacia di ciascun algoritmo solo sulla base dei informazioni generali che si hanno sulla natura e qualità dei dati sperimentali.

Questo fatto non costituisce necessariamente una limitazione ai fini di fornire indicazioni di realtà aumentata all'operatore umano, in quanto le tecniche descritte possono essere implementate in modo parallelo e fornire rappresentazioni grafiche simultanee del soggetto inquadrato dalla telecamera con contenuti informativi differenti ed eventualmente complementari tra loro.

Più delicato è il caso della scelta delle segnature di riferimento. In tutti i casi sin qui esaminati, la scelta è stata fatta su aree opportunamente selezionate sulla base di considerazioni specifiche relative all'oggetto inquadrato. La scelta è stata fatta anche in

questo caso *a posteriori*, mentre in assenza di informazioni specifiche la scelta *a priori* risulta difficile. Un modo per risolvere questa problematica, è quello di utilizzare per prime tecniche che non necessitano di riferimenti quali ad esempio quelle basate sull'analisi dei momenti primo e secondo, ed utilizzare questa prima classificazione come input agli algoritmi più sofisticati di SAM e SCM. Alternativamente si possono prendere in considerazione tecniche di ricorsione che utilizzano il risultato di una classificazione come input per generare nuovi riferimenti raffinando la classificazione fatta.

#### Automatizzazione della classificazione come strumento di realtà aumentata

Sebbene tutte le classificazioni fatte in questo studio siano state eseguite in modalità manuale, possiamo supporre che le corrispondenti elaborazioni possano essere fatte anche in modalità automatica. Nella modalità manuale, l'utente dirige il gioco di selezione dei riferimenti e delle tecniche scegliendo tra quelle implementate: in questo caso il risultato è sempre sotto la diretta supervisione dell'operatore che esercita il controllo scegliendo di volta in volta le metodiche migliori.

In assenza di scelte da parte dell'operatore si deve necessariamente ricorrere a classificazioni non assistite. In questo caso l'operatore va visto come semplicemente passivo, la cui attenzione è richiamata solamente quando si verifica una determinata condizione, quale per esempio la presenza di specifiche segnature che corrispondono a situazioni di particolare interesse e /o allarme. Quanto discusso nel paragrafo precedente costituisce la base per effettuare tali classificazioni in modo automatico, mentre non si può prescindere a sottoporre a supervisione da parte dell'utente finale il risultato finale dell'analisi di classificazione.

In definitiva osserviamo la validità delle tecniche esaminate e la loro effettiva capacità di classificazione delle immagini basata sull'analisi delle segnature temporali e spettrali. Nel caso di dati sperimentali ottenuti dal sonar STSS500 si sottolinea tuttavia la necessità di avere una minore contaminazione dai disturbi e nel contempo una maggiore definizione, condizione che se non soddisfatta, confina al solo dominio qualitativo il risultato della classificazione delle immagini acustiche.

## 7. REFERENZE

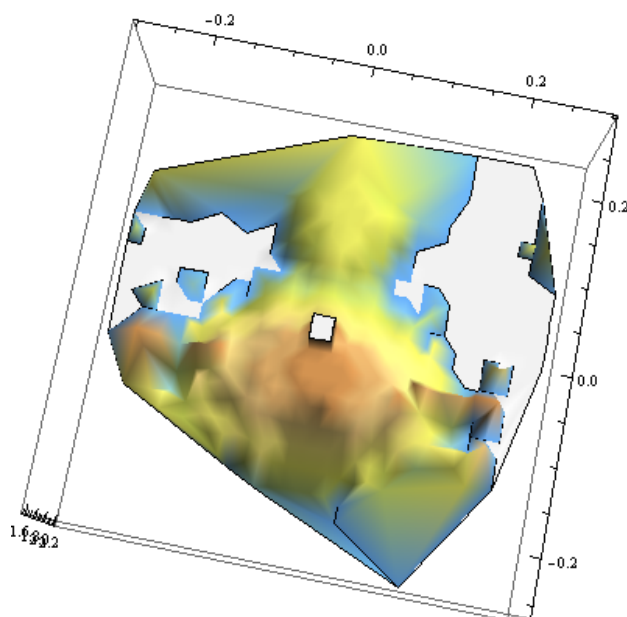
- [1] L.Blasi et al. , 2009, “Realizzazione di un sistema di visione stereoscopica per il progetto STSS500”, ENEA report in press.
- [2] F.Colao, R.Dell’Erba “Metodi di classificazione dei segnali sonar: stato dell’arte”, ENEA report n. RT/ 2009/5/FIM, Roma, ISIN:0393-3016.
- [3] Balbi et al. 2007, Struttura dati per sonar 3D, Rapporto Tecnico WASS, STSS/W/RT/009.
- [4] Carvalho Jr. et al. 2000, Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improving Spectral Angle Mapper. In: Ninth JPL Airborne Earth Science Workshop. JPL Publication 00-18, pp. 65-74.
- [5] Colao et al. 2007, Scanning hyperspectral lidar fluorosensor: a new tool for fresco diagnostics, in Conservation Science 2007, Archetype Publication, London.
- [6] Colao et al. 2008, Caratterizzazione spettroscopica dei rivestimenti di campioni immerse in acqua mediante LIF, Rapporto Tecnico ENEA, RT/2008/25/FIM
- [7] Loew M.H. et al. 2000, An approach to image classification in ultrasound, IEEE, 193-199.
- [8] Marasco R. 2007a, Simulazione e confronto dei sistemi sonar per imaging a trasmissione convenzionale e a trasmissione angolo frequenza, Rapporto Tecnico WASS, STSS/W/RT/004
- [9] Marasco R. 2007b, Caratteristiche dell’antenna del sistema STSS500, Rapporto Tecnico WASS, STSS/W/RT/007
- [10] Sternlichtet D.D. al. 2003, Time-dependent seafloor acoustic backscatter, J.Acoust.Soc.Am., 114, 2709-2725.
- [11] Yuhas R.H et al. 1992. Discrimination Among Semi-Arid Landscape Endmembers Using Spectral Angle Mapper Algorithm, Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Pub-92-14, AVIRIS Workshop. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, pp. 147-150.
- [12] D.D.Sternlichtet al., Time-dependent seafloor acoustic backscatter, J.Acoust.Soc.Am., 114, 2709-2725, (2003).
- [13] Specim, Spectral Imaging LTD, <http://www.specim.fi/> (2009).

## 8. APPENDICE

In questa appendice sono raccolti i risultati di classificazione delle immagini non riportati nel testo.

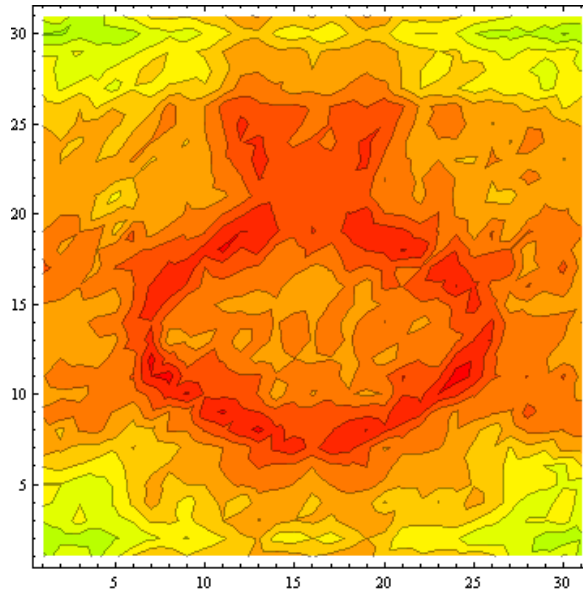
<b>8.1.</b>	<b>Campione ANPH</b> .....	<b>44</b>
8.1.1.	Metodo del baricentro .....	45
8.1.2.	Metodo del cepstrum .....	45
8.1.3.	SVM .....	46
<b>8.2.</b>	<b>Campione CIL1</b> .....	<b>47</b>
8.2.1.	Cepstrum .....	47
8.2.2.	SAM .....	47
8.2.3.	SVM .....	48
<b>8.3.</b>	<b>Campione FERE</b> .....	<b>48</b>
8.3.1.	Metodo del baricentro .....	48
8.3.2.	Cepstrum .....	49
8.3.3.	SVM .....	49

### 8.1. Campione ANPH



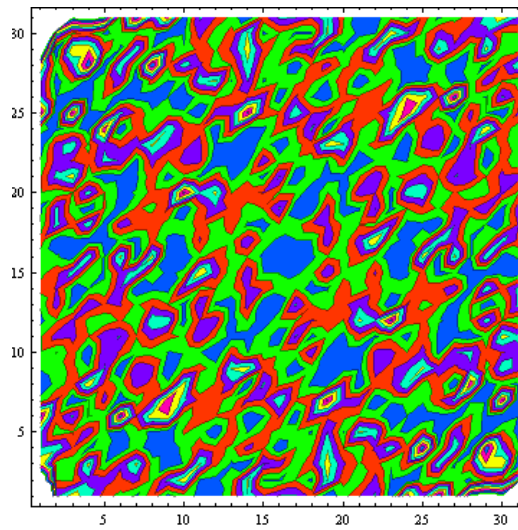
Ricostruzione 3D dell'anfora. Al centro il punto centrale di colore bianco è artificiale.

### 8.1.1. Metodo del baricentro



Identificazione del contorno mediante la tecnica del baricentro .

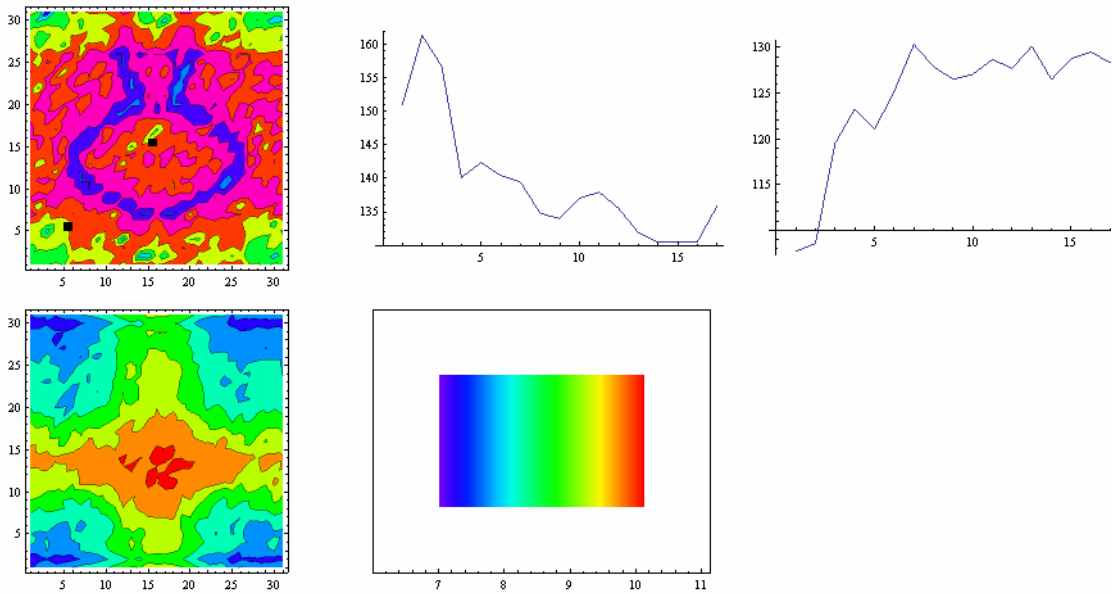
### 8.1.2. Metodo del cepstrum



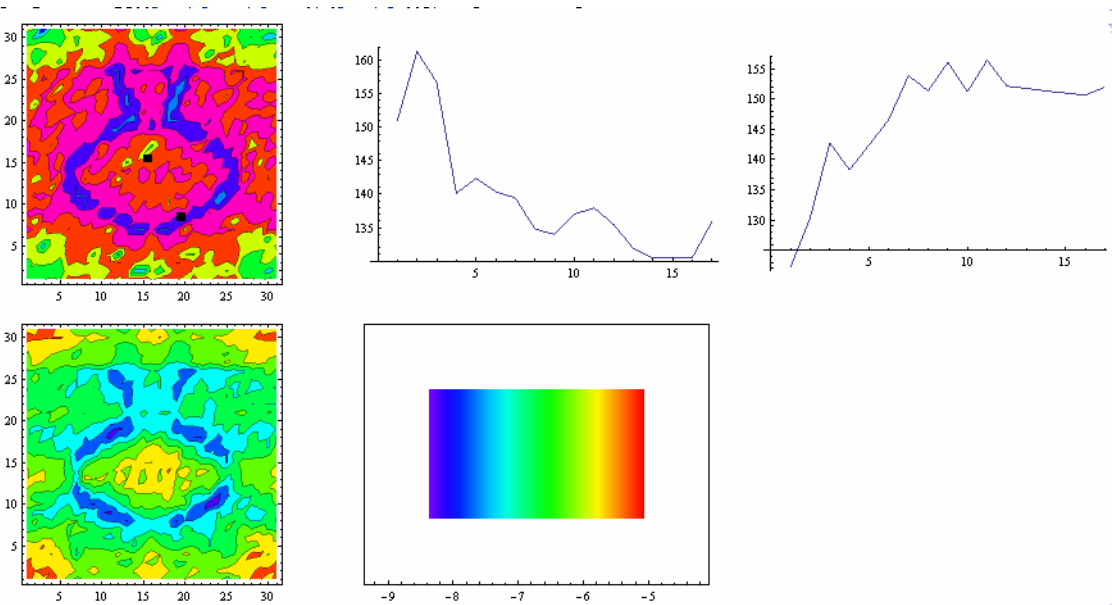
La tecnica del cepstrum non fornisce alcuna informazione utile alla classificazione.



### 8.1.3. SVM



In questo caso di è scelto due classi di appartenenza, interno esterno (quadrati neri e spettri a fianco) e sia è classificato mediante tecnica SVM. La classificazione mostra aree distinte.



Classificazione mediante le classi bordo ed esterno. Anche in questo caso distinguiamo il bordo, il centro e quello che non appartiene a nessuno

## 8.2. Campione CIL1

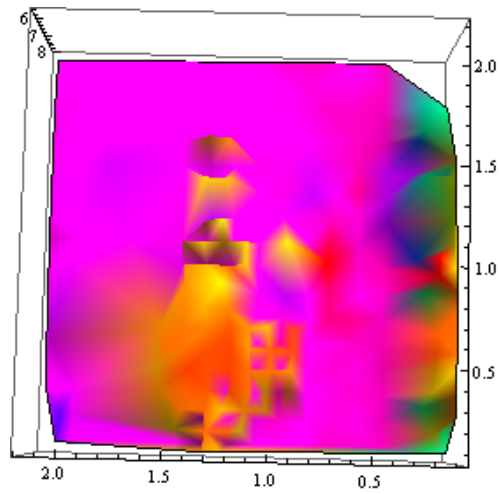
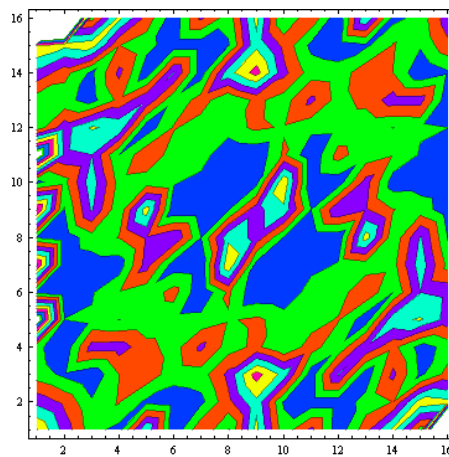


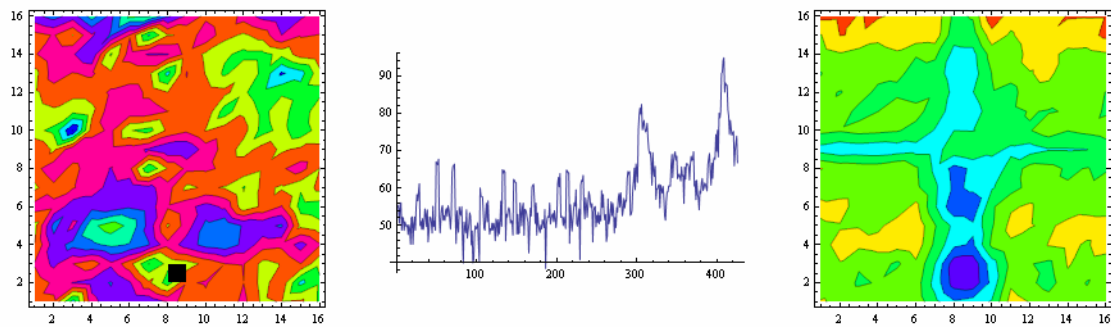
Immagine in falsi colori 3D del cilindro con coni sovrapposti.

### 8.2.1. Cepstrum



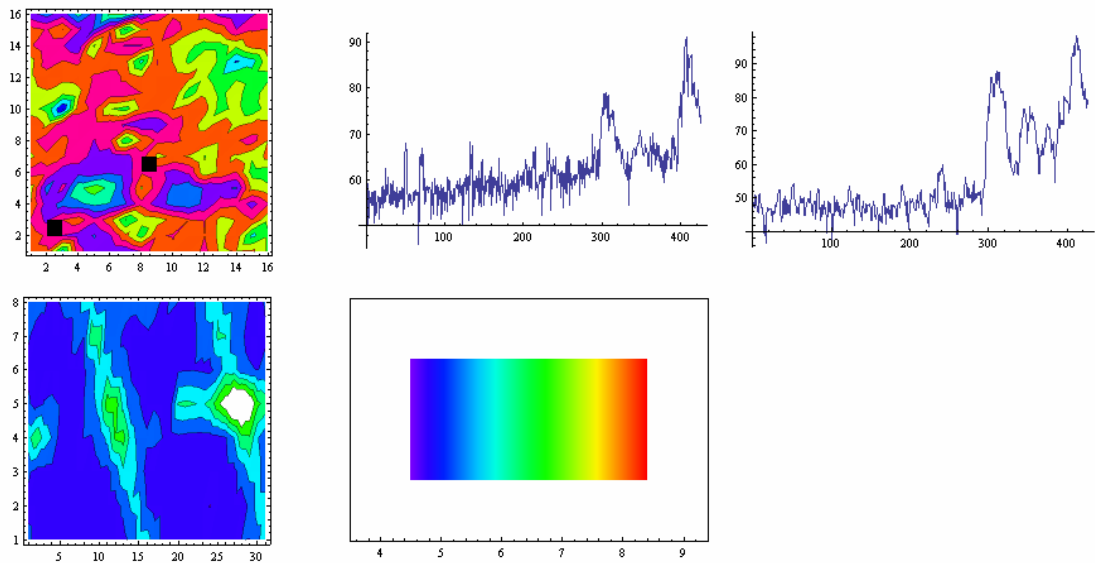
La tecnica del cepstrum non fornisce alcuna informazione utile alla classificazione.

### 8.2.2. SAM



Classificazione mediante tecnica SAM; il quadrato nero rappresenta lo spettro (medio) di riferimento, al centro. Vaghe le indicazioni di appartenenza.

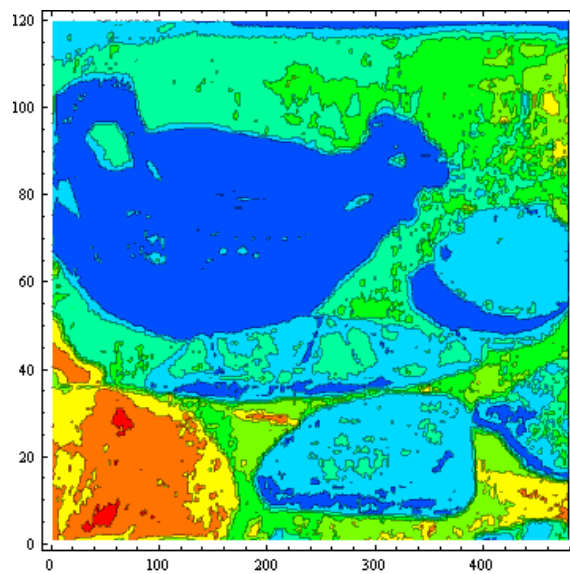
### 8.2.3. SVM



Classificazione mediante tecnica SVM; nessuna indicazione di appartenenza.

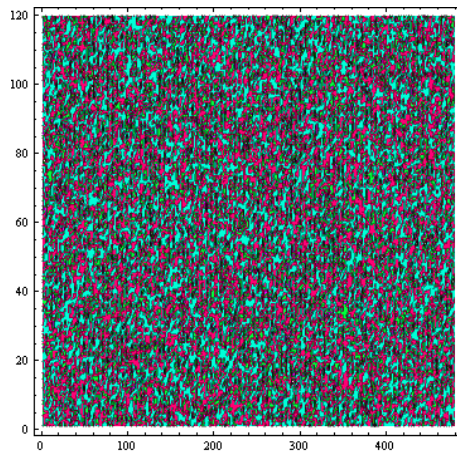
## 8.3. Campione FERE

### 8.3.1. Metodo del baricentro



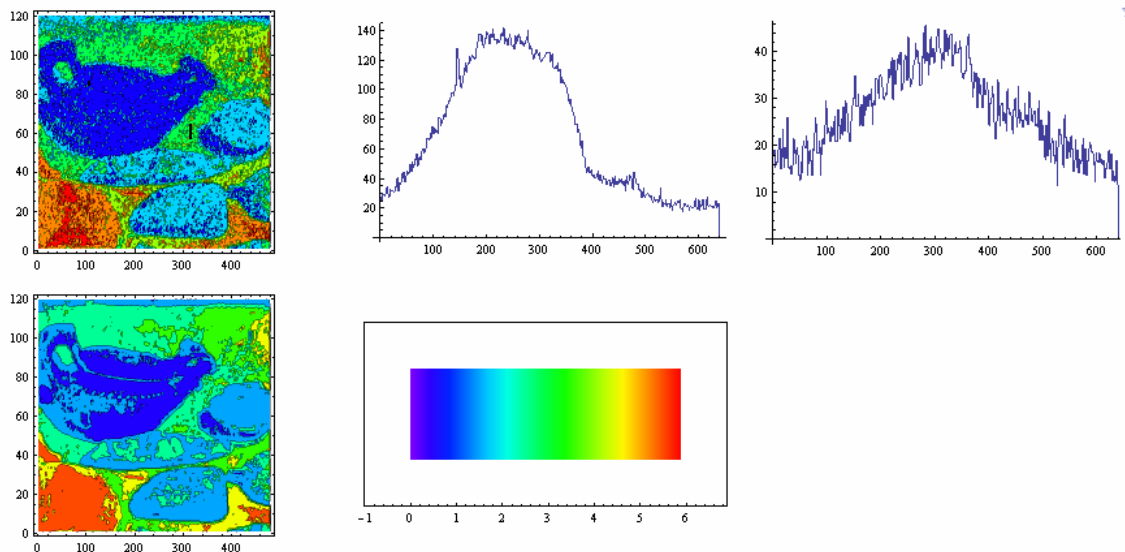
La tecnica del baricentro mostra classi distinte con colori distinti.

### 8.3.2. Cepstrum

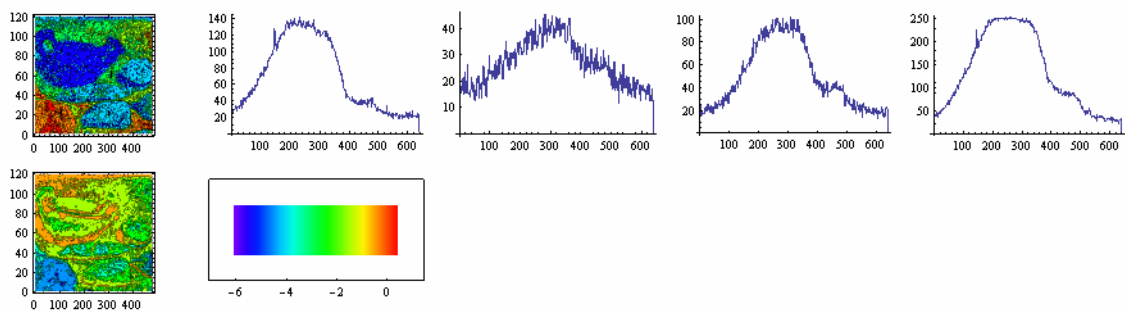


La tecnica del cepstrum non fornisce alcuna informazione utile alla classificazione.

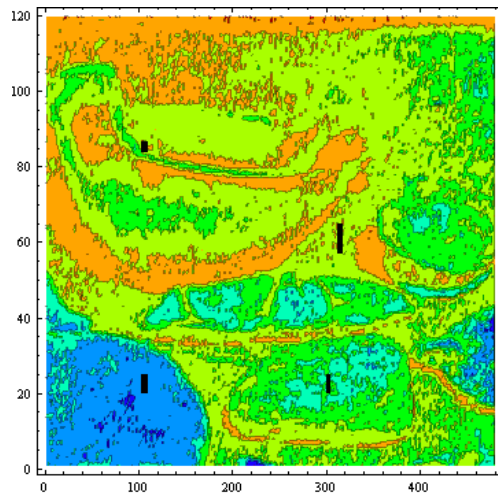
### 8.3.3. SVM



Anche le SVM distinguono le classi (si noti la differenza tra le tipologie degli spettri) ma, in questo caso, confondono una parte dello sfondo con una parte dei manufatti



In quest'ultima immagine effettuiamo una SVM con quattro classi; si distinguono due tipi di sfondo (azzurro e verde marcio) e due tipi di manufatti (celeste e arancione).



SVM a quattro classi con le quattro superfici di riferimento



Edito dall' **ENEA**  
Funzione Centrale Relazioni Esterne  
Unità Comunicazione  
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma  
*www.enea.it*  
Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati  
Finito di stampare nel mese di dicembre 2009