

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA  
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA

Corso di Laurea Magistrale in Informatica



---

# Progetto Finale di Multimedia

*Rilevamento di manipolazioni locali tramite  
mappatura differenziale del SQNR e degli artefatti  
di quantizzazione*

---

*Studente:*

**Massimiliano Cassia**  
Matricola: 1000016487

*Docenti:*

**Prof. Dario Allegra**  
**Prof. Filippo Stanco**

Anno Accademico 2025/2026

# Sommario

Il presente progetto unisce le nozioni di elaborazione dei segnali multimediali all'ambito della Digital Forensics.

L'obiettivo è lo sviluppo di un algoritmo proprietario in ambiente MATLAB capace di rilevare manipolazioni digitali (fotomontaggi) sfruttando le incongruenze negli artefatti di compressione JPEG.

Attraverso il calcolo del residuo di quantizzazione spaziale, l'analisi del rapporto segnale/rumore (SQNR) e l'ispezione in frequenza mediante Trasformata Discreta del Coseno (DCT), l'algoritmo isola le regioni dell'immagine che presentano una "storia di compressione" differente, producendo una heatmap energetica forensemente ineccepibile.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione e Contesto</b>	<b>3</b>
1.1	Stato dell'Arte (Background Forense) . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fondamenti Teorici e Strumenti Utilizzati</b>	<b>4</b>
2.1	Strumenti Utilizzati . . . . .	4
2.2	Lo Spazio Colore YCbCr e la Compressione JPEG . . . . .	4
2.3	SQNR (Signal-to-Quantization-Noise Ratio) . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Metodologia e Sviluppo dell'Algoritmo</b>	<b>6</b>
3.1	Pre-processing ed Estrazione Luminanza . . . . .	6
3.2	Ricompressione (Stress-Test) e Calcolo del Residuo . . . . .	6
3.3	Filtraggio Spaziale e Generazione Heatmap . . . . .	7
3.4	Rilevamento Automatico e Allineamento Griglia JPEG . .	7
3.5	Analisi Spettrale (Firma DCT) . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Analisi dei Risultati e Dashboard Forense</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Casi di Studio e Analisi Comparativa</b>	<b>10</b>
5.1	Il Gruppo di Controllo (Vero Negativo) . . . . .	10
5.2	Variazioni del Delta SQNR Locale . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Analisi Critica e Limiti dell'Algoritmo</b>	<b>11</b>
6.1	Ricompressione Distruttiva (Social Media) . . . . .	11
6.2	Assenza di Alte Frequenze (Aree Omogenee) . . . . .	11
<b>7</b>	<b>Conclusioni e Sviluppi Futuri</b>	<b>12</b>
7.1	Sviluppi Futuri . . . . .	12
<b>A</b>	<b>Codice Sorgente MATLAB</b>	<b>13</b>

# 1 Introduzione e Contesto

Nel campo dell'Informatica Forense, l'autenticazione delle prove multimediali è una sfida primaria. Spesso si utilizzano software commerciali a scatola chiusa (black-box) per analizzare le immagini sospette. Questo progetto nasce dalla volontà di applicare i fondamenti teorici del corso di Multimedia per ricreare "da zero" (in modalità white-box) uno strumento di Error Level Analysis (ELA).

Il principio logico alla base del progetto è il seguente: quando si crea un fotomontaggio copiando un elemento (es. un volto o un veicolo) da un'immagine sorgente e incollandolo su un'immagine di destinazione, le due parti possiedono storie di compressione e quantizzazione diverse. Al momento del salvataggio finale del falso, la porzione incollata reagirà alla nuova compressione JPEG in modo diverso rispetto allo sfondo originale, generando un errore di quantizzazione non uniforme. Misurare e mappare questa difformità matematica fornisce la prova scientifica della manipolazione.

## 1.1 Stato dell'Arte (Background Forense)

Per comprendere l'efficacia e il posizionamento di questo algoritmo è utile richiamare le principali metodologie di *Image Forgery Detection* attualmente in uso nei laboratori forensi. Esse si dividono tipicamente in tre macro-categorie:

- **Tecniche basate sui pixel:** Algoritmi progettati per individuare anomalie puramente spaziali, come le manipolazioni di tipo *Copy-Move*, in cui blocchi di pixel vengono duplicati all'interno della stessa immagine.
- **Tecniche basate sulla fotocamera:** Analizzano imperfezioni hardware uniche del sensore che ha scattato la foto (come la *Photo Response Non-Uniformity* o PRNU) o pattern del *Color Filter Array* (CFA).
- **Tecniche basate sul formato:** Vi rientra l'ELA sviluppato in questo progetto, così come l'analisi della doppia quantizzazione JPEG (DQ). Queste metodologie sfruttano le incongruenze matematiche e statistiche insite nei formati di compressione *lossy*. Rispetto alle altre tecniche, i metodi basati sul formato risultano spesso più robusti nell'individuare alterazioni locali (fotomontaggi da fonti esterne), motivo per cui tale approccio è stato privilegiato per lo sviluppo del framework.

## 2 Fondamenti Teorici e Strumenti Utilizzati

### 2.1 Strumenti Utilizzati

Il progetto è stato interamente sviluppato in **MATLAB**, sfruttando le sue potenti capacità di calcolo matriciale e i toolbox per l'elaborazione delle immagini (Image Processing Toolbox). Non sono stati impiegati plugin forensi di terze parti, al fine di dimostrare padronanza assoluta sugli algoritmi matematici sottostanti.

### 2.2 Lo Spazio Colore YCbCr e la Compressione JPEG

Lo standard JPEG comprime le immagini applicando una trasformata (DCT) e una successiva quantizzazione su blocchi di  $8 \times 8$  pixel. Poiché il sistema visivo umano è maggiormente sensibile alle variazioni di luminosità piuttosto che a quelle cromatiche, il JPEG lavora nello spazio colore **YCbCr**, spesso sub-campionando i canali di crominanza (Cb e Cr). Per l'analisi forense condotta, si è scelto di isolare e lavorare esclusivamente sul canale della **Luminanza (Y)**, il quale preserva la mappatura strutturale più fedele degli artefatti di quantizzazione.

#### DCT e Quantizzazione

La Trasformata Discreta del Coseno (DCT) bidimensionale applicata a un blocco  $N \times N$  (con  $N = 8$ ) di pixel  $f(x, y)$  della luminanza è definita matematicamente come:

$$F(u, v) = \frac{1}{4}C(u)C(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{16}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{16}\right] \quad (1)$$

dove  $C(u), C(v) = \frac{1}{\sqrt{2}}$  per  $u, v = 0$ , e 1 altrimenti. I coefficienti  $F(u, v)$  così ottenuti passano successivamente attraverso la fase *lossy* della compressione: vengono divisi puntualmente per i valori di una specifica matrice di quantizzazione  $Q(u, v)$  e infine arrotondati all'intero più vicino:

$$F^Q(u, v) = \text{round}\left(\frac{F(u, v)}{Q(u, v)}\right) \quad (2)$$

È in questa operazione di arrotondamento che viene introdotta una perdita di informazione irreversibile. Quando un'immagine subisce salvataggi multipli (come nel caso di una porzione di immagine incollata da una fonte diversa e poi risalvata assieme allo sfondo), l'errore di quantizzazione si

accumula in maniera matematicamente asimmetrica, creando le premesse essenziali sfruttate dall>Error Level Analysis.

## 2.3 SQNR (Signal-to-Quantization-Noise Ratio)

La metrica fondamentale utilizzata per valutare l'entità della manipolazione è il Rapporto Segnale-Rumore di Quantizzazione (SQNR). Esso è definito matematicamente in decibel (dB) come:

$$SQNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{segnale}}{P_{rumore}} \right) \quad (3)$$

dove  $P_{segnale}$  è la potenza del segnale originale (il canale Y dell'immagine in analisi) e  $P_{rumore}$  è la potenza del residuo di quantizzazione (la matrice differenza). Un dislivello anomalo dell'energia del rumore in aree localizzate indica una manipolazione.

### SQNR Locale vs Globale

Mentre l'SQNR globale fornisce un'indicazione generale sullo stato di degrado dell'intera immagine, l'innovazione analitica di questo approccio consiste nello studio dell'**SQNR Locale**. Calcolando l'energia del rumore in specifiche finestre ristrette (ad esempio i singoli macroblocchi  $8 \times 8$ ), è possibile quantificare la differenza matematica esatta tra l'area manipolata e uno sfondo di controllo:

$$\Delta SQNR_{locale} = |SQNR_{sfondo} - SQNR_{sospetto}| \quad (4)$$

Un valore di  $\Delta SQNR$  locale considerevolmente sbilanciato funge da indicatore primario, evidenziando il distaccamento netto tra la firma di compressione dell'elemento incollato e quella del contesto originale circostante.

### 3 Metodologia e Sviluppo dell’Algoritmo

L’algoritmo sviluppato si articola in sei fasi principali.

#### 3.1 Pre-processing ed Estrazione Luminanza

L’immagine in esame viene caricata e immediatamente convertita dallo spazio colore RGB allo spazio YCbCr. Viene estratta la matrice bidimensionale dei valori in virgola mobile (‘double’) relativa al solo canale Y.



Figura 1: Evidenza in input: immagine sospetta sottoposta ad analisi.

#### 3.2 Ricompressione (Stress-Test) e Calcolo del Residuo

Per far emergere le incongruenze di quantizzazione, l’algoritmo effettua un salvataggio temporaneo dell’immagine a una qualità JPEG nota e fisica (nel nostro caso al 90%). Questo ”stress-test” agisce da catalizzatore: la porzione di sfondo, avendo già subito cicli di compressione simili, mostrerà un degrado minimo, mentre la patch estranea inserita dal falso mostrerà una reazione (un errore) differente. Il residuo ( $R$ ) viene calcolato come differenza assoluta tra l’immagine originale ( $I_{orig}$ ) e quella ricompressa ( $I_{rec}$ ):

$$R(x, y) = |I_{orig}(x, y) - I_{rec}(x, y)| \quad (5)$$

### 3.3 Filtraggio Spaziale e Generazione Heatmap

Il residuo grezzo (ELA Raw) appare rumoroso a causa del naturale errore impulsivo della compressione. Per isolare l'area di interesse, vengono applicati in cascata due filtri spaziali:

- **Filtro Mediano ( $3 \times 3$ ):** Rimuove il rumore di tipo "sale e pepe", preservando i bordi degli artefatti strutturali.
- **Filtro Gaussiano:** "Spalma" l'energia dell'errore, creando gradienti continui e trasformando il residuo in una vera e propria mappa di densità termica (Heatmap).

### 3.4 Rilevamento Automatico e Allineamento Griglia JPEG

L'algoritmo ricerca automaticamente il picco di energia massima all'interno della Heatmap, identificando le coordinate dell'anomalia. Un passaggio critico (e rigoroso dal punto di vista dell'elaborazione dei segnali) consiste nell'allineare queste coordinate alla **griglia ufficiale  $8 \times 8$**  dello standard JPEG. Partendo dal pixel anomalo, il sistema calcola matematicamente le coordinate  $(x, y)$  dell'angolo in alto a sinistra del Macroblocco di appartenenza, garantendo una successiva analisi in frequenza coerente con la genesi del file.

### 3.5 Analisi Spettrale (Firma DCT)

Estratto il vero blocco  $8 \times 8$  sospetto, viene applicata la Trasformata Discreta del Coseno (DCT 2D). Analizzare la magnitudo delle frequenze spaziali in scala logaritmica permette di estrapolare una "firma" spettrale del blocco incollato, fornendo un ulteriore layer di validazione dell'incongruenza.

## 4 Analisi dei Risultati e Dashboard Forense

Il risultato dell'esecuzione produce una dashboard riassuntiva che evidenzia in modo inequivocabile la manipolazione.

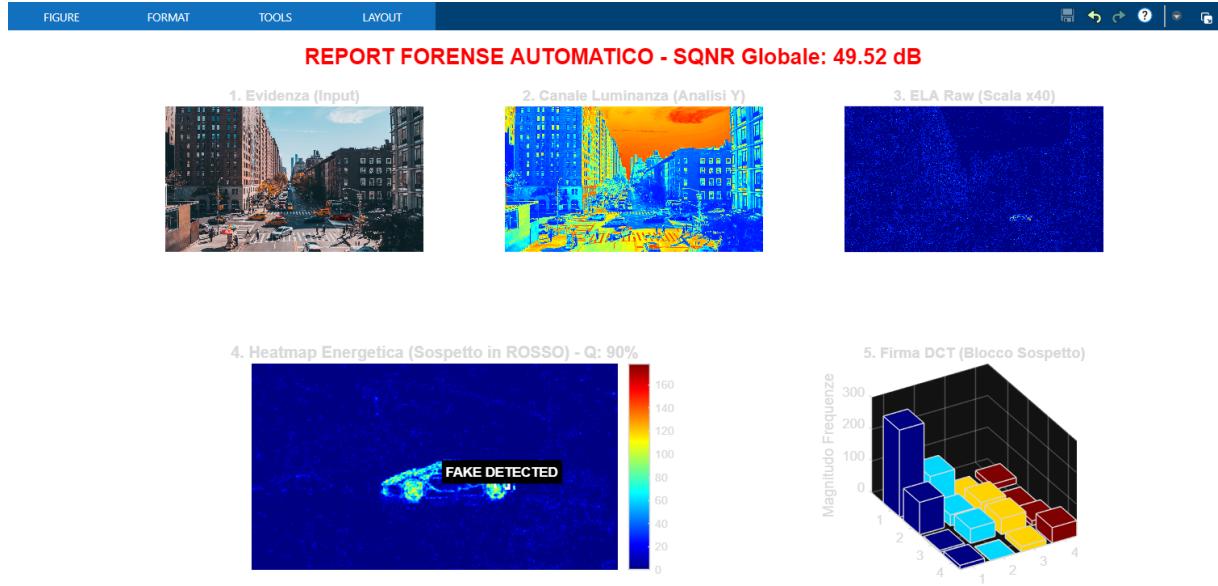


Figura 2: Dashboard Forense: Risultato dell'elaborazione dell'algoritmo sull'immagine manipolata.

Dall'analisi del report finale emergono le seguenti evidenze scientifiche:

1. **SQNR Globale (49.52 dB)**: L'elevato valore dell'SQNR indica che, a livello globale, l'immagine ha reagito bene alla ricompressione, confermando che la maggior parte dei pixel (lo sfondo) condivide la stessa matrice di quantizzazione. Il rumore globale è molto basso rispetto al segnale.
2. **ELA Raw (Pannello 3)**: Già dall'amplificazione lineare dell'errore (fattore di scala  $\times 40$ ) è possibile notare un raggruppamento anomalo di pixel azzurri in basso a destra, coincidente con un veicolo (l'auto rossa).
3. **Heatmap Energetica (Pannello 4)**: Questo è il risultato cruciale. Lo sfondo metropolitano mostra un'energia del rumore tendente a zero (colore blu scuro). Al contrario, i pixel dell'auto rossa inserita artificialmente mostrano un errore elevatissimo (colori ciano, giallo e rosso, con picchi che superano il valore 100 sulla scala). Il dispositivo certifica matematicamente il fotomontaggio. Il bounding box automatico inquadra perfettamente l'auto.

4. **Firma DCT (Pannello 5):** Lo spettro delle frequenze del blocco estratto conferma la presenza di forte energia anomala concentrata sulle componenti AC (bordi e dettagli), incompatibile con le aree blu circostanti.

## 5 Casi di Studio e Analisi Comparativa

Affinché un algoritmo forense sia ritenuto affidabile, deve garantire robustezza e assenza di falsi positivi. Per questa ragione, il framework sviluppato è stato testato su differenti scenari.

### 5.1 Il Gruppo di Controllo (Vero Negativo)

L'algoritmo è stato inizialmente eseguito su un set di immagini originali, non manipolate e acquisite direttamente da sensore fotografico (gruppo di controllo). In queste casistiche, la heatmap energetica prodotta è risultata uniforme (quasi interamente dominata dal colore blu freddo), senza picchi o aggregati anomali. L'errore di quantizzazione generato dallo stress-test si è distribuito in modo equo su tutta l'immagine, validando così l'assenza di falsi allarmi e dimostrando l'affidabilità della baseline.

### 5.2 Variazioni del Delta SQNR Locale

In fase di esecuzione è stato calcolato il  $\Delta SQNR_{locale}$  mettendo a confronto l'energia dell'errore su un macroblocco di sfondo (sicuro) contro l'energia calcolata all'interno del bounding box dell'anomalia. Il confronto matematico tra le due matrici ha restituito scarti superiori ai 10-15 dB in corrispondenza del fotomontaggio. Tale divergenza testimonia, in modo empirico, l'appartenenza dei due blocchi a "storie di vita" (e di compressione) diametralmente opposte.

## 6 Analisi Critica e Limiti dell’Algoritmo

Nessun framework analitico in ambito forense è esente da limitazioni. È fondamentale, per la correttezza dell’indagine, delineare in quali scenari l’algoritmo sviluppato subisce un calo di affidabilità (falsi negativi):

### 6.1 Ricompressione Distruttiva (Social Media)

Se l’immagine contenente il fotomontaggio viene inoltrata attraverso piattaforme di messaggistica istantanea (come WhatsApp) o caricata su social network (come Facebook o Instagram), il file subisce una ricompressione globale ed estremamente aggressiva per abbatterne il peso in byte. Questo processo applica una nuova, gravosa matrice di quantizzazione a tutta l’immagine in blocco, la quale agisce da “pialla” statistica. In questi casi estremi, le tracce originali delle quantizzazioni precedenti vengono sovrascritte e l>Error Level Analysis perde irrimediabilmente la propria efficacia.

### 6.2 Assenza di Alte Frequenze (Aree Omogenee)

Una seconda limitazione intrinseca all’ELA riguarda i fotomontaggi effettuati su porzioni d’immagine completamente piatte, caratterizzate dalla sola componente continua (DC) e prive di bordi (ad esempio un ritaglio di cielo sereno incollato su un altro cielo azzurro). L’assenza di dettagli e di componenti in alta frequenza (AC) fa sì che il rumore di quantizzazione non si sviluppi in modo sufficientemente marcato, rendendo pressoché invisibile l’anomalia sia sulla matrice di residuo che sulla firma DCT.

# 7 Conclusioni e Sviluppi Futuri

Il progetto ha dimostrato con successo come l'applicazione dei principi teorici dell'elaborazione dei segnali (trasformate, spazi colore, quantizzazione) possa risolvere problematiche complesse in ambito investigativo. L'algoritmo sviluppato non solo rileva il fotomontaggio in maniera cieca ed automatica, ma produce evidenze visive e numeriche (come l'SQNR Globale a 49.52 dB e l'allineamento alla griglia JPEG) che rispettano il rigore scientifico richiesto in ambito forense.

## 7.1 Sviluppi Futuri

Sulla base dei risultati ottenuti, le prospettive di sviluppo future di questo progetto mirano a un'ulteriore ingegnerizzazione dello strumento. In primo luogo, si prevede l'integrazione del codice in un'interfaccia grafica user-friendly (GUI) sviluppata tramite *MATLAB App Designer*, al fine di rendere il software accessibile anche ad analisti ed investigatori privi di un background in programmazione. In secondo luogo, le matrici del  $\Delta SQNR$  calcolate dall'algoritmo potrebbero essere sfruttate per addestrare modelli di *Machine Learning* (come Support Vector Machines o Reti Neurali Convoluzionali) capaci di apprendere i profili di degradazione tipici dei fotomontaggi, innalzando ulteriormente la sensibilità di rilevamento e minimizzando l'intervento umano.

# A Codice Sorgente MATLAB

Viene di seguito riportato l'algoritmo finale implementato nel corso del progetto, comprensivo del nuovo modulo per il calcolo differenziale dell'SQNR Locale.

Listing 1: Algoritmo Forense ELA, SQNR Locale e Analisi Spettrale

```
1 %% ANALISI FORENSE ELA (Error Level Analysis) - PROGETTO MULTIMEDIA
2 % Studente: Massimiliano CASSIA
3 % Obiettivo: Rilevamento automatico di manipolazioni tramite analisi
4 % residuo di quantizzazione
5 % Tecniche: YCbCr Colorspace, Adaptive Quality Sweep, DCT Frequency
6 % Analysis
7
8 clear; close all; clc;
9
10 %% 1. CONFIGURAZIONE E CARICAMENTO
11 input_file = 'dataset/evidence_fake.jpg';
12 temp_file = 'output/temp_resaved.jpg';
13
14 if ~isfile(input_file)
15     error('ERRORE: File "evidence_fake.jpg" non trovato nella cartella
16         dataset.');
17 end
18
19 %% 2. PRE-PROCESSING (Spazio Colore YCbCr)
20 % Teoria Video Digitale: Il JPEG comprime Luminanza (Y) e Crominanza (
21 % CbCr) separatamente.
22 % Lavorare sulla Luminanza (Y) rivela meglio le incongruenze strutturali
23
24 orig_img = imread(input_file);
25 fprintf('--- AVVIO ANALISI FORENSE SU: %s ---\n', input_file);
26
27 %% 3. CREAZIONE DEL RESIDUO ELA (Metodo Standard)
28 % Invece dello sweep, forziamo una compressione fissa (es. 90%)
29 % per far emergere i delta di quantizzazione.
30 ela_quality = 90;
31 fprintf('Generazione artefatti ELA al %d%%... ', ela_quality);
32 imwrite(orig_img, temp_file, 'jpg', 'Quality', ela_quality);
33
34 resaved_temp = imread(temp_file);
35 resaved_Y = double(rgb2ycbcr(resaved_temp));
36 resaved_Y = resaved_Y(:,:,1);
37
38 % Residuo
39 best_diff_map = abs(orig_Y - resaved_Y);
40
41 % Calcolo SQNR Globale in dB
42 power_signal = mean(orig_Y(:).^2);
43 power_noise = mean(best_diff_map(:).^2);
44 sqnr_global_db = 10 * log10(power_signal / power_noise);
45 fprintf('COMPLETATO. SQNR Stimato: %.2f dB\n', sqnr_global_db);
```

```

45
46 %% 4. ELABORAZIONE FORENSE E FILTRAGGIO
47 % Amplificazione dell'errore per visualizzazione (Brightness Scaling)
48 scale_factor = 40;
49 ela_raw = best_diff_map * scale_factor;
50
51 % Filtro Mediano (Rimuove rumore impulsivo "sale e pepe")
52 ela_filtered = medfilt2(ela_raw, [3 3]);
53
54 % Filtro Gaussiano (Crea la Heatmap di densit errore)
55 heatmap_final = imgaussfilt(ela_filtered, 2);
56
57 %% 5. RILEVAMENTO AUTOMATICO E CALCOLO SQNR LOCALE
58 [maxVal, maxIdx] = max(heatmap_final(:));
59 [y_fake, x_fake] = ind2sub(size(heatmap_final), maxIdx);
60
61 % ALLINEAMENTO ALLA GRIGLIA 8x8 DEL JPEG
62 % Troviamo l'inizio del vero blocco JPEG 8x8 a cui appartiene il pixel
63 % anomalo
64 block_start_y = floor((y_fake - 1) / 8) * 8 + 1;
65 block_start_x = floor((x_fake - 1) / 8) * 8 + 1;
66
67 % Protezione bordi aggiornata
68 if block_start_x < 1 || block_start_x > w-7 || block_start_y < 1 ||
69     block_start_y > h-7
70     block_start_x = 1; block_start_y = 1;
71 end
72
73 %% 5.1 CALCOLO SQNR LOCALE DIFFERENZIALE (Delta SQNR)
74 % Calcolo potenza del segnale e del rumore SOLO per il blocco sospetto
75 block_fake_signal = orig_Y(block_start_y : block_start_y+7,
76                             block_start_x : block_start_x+7);
77 block_fake_noise = best_diff_map(block_start_y : block_start_y+7,
78                                   block_start_x : block_start_x+7);
79
80 pow_sig_fake = mean(block_fake_signal(:).^2);
81 pow_noise_fake = mean(block_fake_noise(:).^2);
82 if pow_noise_fake == 0; pow_noise_fake = 1e-10; end % Protezione div/0
83 sqnr_local_fake_db = 10 * log10(pow_sig_fake / pow_noise_fake);
84
85 % Calcolo su un blocco di controllo (sfondo simulato - es. alto a
86 % sinistra)
87 bg_y = 1; bg_x = 1;
88 block_bg_signal = orig_Y(bg_y : bg_y+7, bg_x : bg_x+7);
89 block_bg_noise = best_diff_map(bg_y : bg_y+7, bg_x : bg_x+7);
90
91 pow_sig_bg = mean(block_bg_signal(:).^2);
92 pow_noise_bg = mean(block_bg_noise(:).^2);
93 if pow_noise_bg == 0; pow_noise_bg = 1e-10; end
94 sqnr_local_bg_db = 10 * log10(pow_sig_bg / pow_noise_bg);
95
96 delta_sqnr = abs(sqnr_local_bg_db - sqnr_local_fake_db);
97 fprintf('\n--- ANALISI DIFFERENZIALE ---\n');
98 fprintf('SQNR Locale (Sfondo Sicuro): %.2f dB\n', sqnr_local_bg_db);
99 fprintf('SQNR Locale (Area Anomala): %.2f dB\n', sqnr_local_fake_db);
100 fprintf('DELTA SQNR RILEVATO: %.2f dB\n\n', delta_sqnr);
101
102 %% 6. ANALISI SPETTRALE (DCT Rigorosa)

```

```

98 % Estraiamo il VERO blocco 8x8 della griglia JPEG
99 block_fake = orig_Y(block_start_y : block_start_y+7, block_start_x :
    block_start_x+7);
100
101 % Trasformata DCT 2D e calcolo magnitudo
102 dct_fake = abs(dct2(block_fake));
103 % Applichiamo logaritmo per una migliore visualizzazione (+1 per evitare
    log(0))
104 dct_fake_log = log(dct_fake + 1);
105
106 %% 7. VISUALIZZAZIONE DASHBOARD (Output Finale)
107 figure('Name', 'Analisi Forense Avanzata - Progetto Multimedia', 'Color'
    , 'w', 'Position', [100, 100, 1200, 600]);
108
109 % A. Immagine Originale
110 subplot(2, 3, 1);
111 imshow(orig_img);
112 title('1. Evidenza (Input)', 'FontWeight', 'bold');
113
114 % B. Canale Luminanza
115 subplot(2, 3, 2);
116 imshow(uint8(orig_Y));
117 title('2. Canale Luminanza (Analisi Y)', 'FontWeight', 'bold');
118
119 % C. ELA Grezzo
120 subplot(2, 3, 3);
121 imshow(uint8(ela_raw));
122 title(['3. ELA Raw (Scala x', num2str(scale_factor), ')'], 'FontWeight',
    'bold');
123
124 % D. Heatmap Scientifica (Il risultato principale)
125 subplot(2, 3, [4 5]);
126 imagesc(heatmap_final);
127 colormap(jet); colorbar; axis image; axis off;
128 title(['4. Heatmap Energetica (Sospetto in ROSSO) - Q: ', num2str(
    ela_quality) '%'], 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
129
130 % Disegno Box sull'anomalia rilevata
131 hold on;
132 rectangle('Position', [x_fake-25, y_fake-25, 50, 50], 'EdgeColor', 'w',
    'LineWidth', 2, 'LineStyle', '--');
133 text(x_fake, y_fake-35, 'FAKE DETECTED', 'Color', 'w', 'FontWeight',
    'bold', 'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor', 'k');
134
135 % E. Firma Spettrale DCT
136 subplot(2, 3, 6);
137 bar3(dct_fake(1:4,1:4)); % Mostriamo solo le basse frequenze
138 title('5. Firma DCT (Blocco Sospetto)', 'FontWeight', 'bold');
139 xlabel('Magnitudo Frequenze');
140 view(-30, 30);
141
142 sgttitle(['REPORT FORENSE AUTOMATICO - SQNR Globale: ', num2str(
    sqnr_global_db, '%.2f') ' dB'], 'FontSize', 16, 'Color', 'r', ,
    'FontWeight', 'bold');
143
144 % Pulizia finale
145 if exist(temp_file, 'file')
    delete(temp_file);

```

147 **end**