



DIP/FPUNA

**MEJORA DEL CONTRASTE DE IMÁGENES A COLOR
UTILIZANDO UN FRAMEWORK DE OPTIMIZACIÓN
MULTIOBJETIVO**

Luis Guillermo Moré Rodríguez

Orientador: Prof. Diego Pedro Pinto Roa, Dr.

Tesis presentada a la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del Grado de Máster en Ciencias de la Computación.

ASUNCIÓN - PARAGUAY

Diciembre - 2017

**MEJORA DEL CONTRASTE DE IMÁGENES A COLOR
UTILIZANDO UN FRAMEWORK DE OPTIMIZACIÓN
MULTIOBJETIVO**

Luis Guillermo Moré Rodríguez

Aprobado en Diciembre de 2017 por:

,

Datos internacionales de Catalogación en la Publicación (CIP)
DE BIBLIOTECA CENTRAL DE LA UNA

Moré Rodríguez, Luis Guillermo

Mejora del contraste de imágenes a color utilizando un framework de optimización multiobjetivo/Luis Guillermo Moré Rodríguez. – Asunción, 2017.
72 p. : il.

Tesis (Maestría en Ciencias de la Computación) – Facultad Politécnica ,
2017.

Bibliografía.

1. Mejora de contraste. 2. Optimización Por Ejambre de Partículas. 3.
Imágenes a color. I. Título.

CDD 519.4

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios y a la Virgen María por todas las gracias que me han brindado, entre ellas mi gran familia, amigos, orientadores, profesores y colaboradores que hicieron posible este trabajo.

Agradezco al NIDTEC por brindarme la oportunidad.

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada.

MEJORA DEL CONTRASTE DE IMÁGENES A COLOR UTILIZANDO UN FRAMEWORK DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

Autor: Luis Guillermo Moré
Rodríguez

Orientador: Diego Pedro Pinto Roa, Dr.

RESUMEN

La mejora del contraste es una función de transformación aplicada a una imagen digital cuya finalidad es la de obtener una imagen cuyas características de contraste sean más adecuadas para una aplicación posterior de procesamiento. Existen diversas técnicas de Mejora del contraste de imágenes, de entre las que resaltan las técnicas basadas en enfoques Metaheurísticos; los mismos fueron probados extensivamente en la literatura, para imágenes en escala de grises. La finalidad es la de obtener parámetros de un algoritmo de mejora del contraste que sean adecuados para la imagen digital cuyo problema de mejora del contraste se está abordando. Sin embargo, aparecen nuevas dificultades cuando se trabaja con imágenes digitales a color, en el contexto de la Mejora del Contraste basada en Metaheurísticas puras: no solamente es necesario mejorar el contraste de uno o más objetos con respecto al fondo, sino que además es necesario considerar la información de color que también se ve afectada.

Este trabajo aborda el problema de Mejora del Contraste en imágenes a color con un enfoque multiobjetivo puro. El algoritmo propuesto aplica una Metaheurística bien conocida a los parámetros de un algoritmo de mejora del contraste, lo cual resulta en imágenes potencialmente adecuadas para ser consideradas como soluciones. Éstas se evalúan teniendo en cuenta el balance entre contraste obtenido y distorsión de la información contenida dentro de la imágenes (en términos de intensidad y de información de color). Los resultados obtenidos muestran imágenes con el contraste mejorado, pero cuyos coeficientes de métrica no dominados muestran una relación inversa de compromiso entre contraste y similaridad estructural (distorsión).

CONTRAST ENHANCEMENT OF COLOR IMAGES USING A MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FRAMEWORK

Author: Luis Guillermo Moré Rodríguez

Advisor: Diego Pedro Pinto Roa, Dr.

SUMMARY

Contrast Enhancement is a transformation function applied over a digital image, with the aim to obtain another image whose characteristics of contrast are more suitable for further image processing steps. There are several techniques for Contrast Enhancement of Digital Images, among them stand out the techniques of Contrast Enhancement based on Metaheuristics; those are well proven methods for grayscale images. The main objective is to obtain parameters for a contrast enhancement algorithm which are suitable for a digital image, whose contrast problem is being addressed. Nevertheless, new difficulties arise when working with colored digital images, in the context of Contrast Enhancement based in pure Metaheuristics: not only is necessary to achieve better contrast of one or more object in regard of the background, but also is necessary to consider color information, which is also affected.

This work addresses the problem of Contrast Enhancement of color images based in an pure Multiobjective approach. The proposal applies a well-known Metaheuristic to the input parameters of a Contrast Enhancement Algorithm, which results in images potentially suitable as solutions of the problem. Those are evaluated taking into account balance between contrast achieved and distortion of information within images (in terms of intensity and color information). The results obtained show images with better contrast, and non-dominated metric coefficients that show an inverse relation between contrast and structural similarity (distortion).

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Estructura de la tesis	3
2 MARCO TEÓRICO	4
2.1 Ecuación del Histograma	4
2.1.1 Implementación Básica	5
2.1.2 Ejemplo de aplicación	5
2.2 Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) . .	10
2.2.1 Adaptive Histogram Equalization	10
2.2.2 Contrast Limited AHE	11
2.3 Espacios de Color Adoptados	12
2.3.1 El espacio de colores <i>Red, Green, Blue</i>	12
2.3.2 El espacio de colores <i>YCbCr</i>	13
2.4 Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)	14
2.5 Métricas de Optimización	17
2.5.1 Entropía de la imagen	17
2.5.2 Índice de Similitud Estructural	18

3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
3.1	Formulación del problema planteado	20
3.2	Propuesta	21
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1	Ambiente de Pruebas experimentales	24
4.2	Descripción de resultados obtenidos	24
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS	
	FUTUROS	28
5.1	Trabajos futuros	29
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
A.0	Imagen de prueba calhouse_230.jpg	34
A.2	Imagen de prueba calhouse_231.jpg	38
A.4	Imagen de prueba calhouse_232.jpg	43
A.6	Imagen de prueba calhouse_233.jpg	52
A.8	Imagen de prueba calhouse_234.jpg	57
A.10	Imagen de prueba calhouse_236.jpg	63
A.12	Imagen de prueba calhouse_237.jpg	70

LISTA DE FIGURAS

1.1	Imagen en escala de grises e imagen con contraste mejorado para posterior utilización.	2
2.1	Mapa de intensidades de una imagen de nivel de gris de ejemplo. .	6
2.2	Imagen original representada en la matriz de intensidades.	6
2.3	Mapa de intensidades luego del proceso de ecualización.	8
2.4	Imágenes original y ecualizada, al final del proceso de ecualización.	8
2.5	Imágenes original y resultante luego de la aplicación de la ecualización del histograma. A la izquierda de cada una se observa el histograma y el CDF respectivo a cada imagen.	9
2.6	Redistribución de niveles de intensidad dentro del histograma de una región de una imagen, como paso previo al cálculo del CDF . Ésto tiene como efecto la suaviación del proceso de mejora del contraste.	11
2.7	Diagrama esquemático del cubo que representa al espacio de colores RGB . Se pueden apreciar algunos colores notables.	13
2.8	Imagen de ejemplo con las representaciones de intensidad (Y) y de color (Cb, Cr). Nótese que el mapa de intensidades Y es una representación en escala de grises de la imagen digital.	14
2.9	Comportamiento de partículas en PSO Monobjetivo a través de la serie de iteraciones. Nótese que las equis (x) indican un punto o solución potencial que se mueve sobre la superficie donde los colores más fríos son mejores soluciones.	16
2.10	Datos de \mathcal{H} para una imagen de ejemplo. En (a) $\mathcal{H} = 7,053228$, en (b) $\mathcal{H} = 7,953866$	18
2.11	Datos de $SSIM$ para una imagen de ejemplo. En (a) $SSIM_R = 1$, $SSIM_G = 1$, $SSIM_B = 1$ en (b) $SSIM_R = 0,484719$, $SSIM_G = 0,525963$, $SSIM_B = 0,533241$	19

3.1	Proceso de evaluación de una solución potencial, para una iteración t del Algoritmo 1.	22
4.1	Imágenes original y resultantes para la imagen de prueba <code>calhouse_230.jpg</code>	26
4.2	Frente Pareto dibujado utilizando datos de referencia métricas de la imagen de prueba <code>calhouse_230.jpg</code>	27
A.1.1	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.1.	37
A.2.2	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.1.	38
A.3.3	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.3.	42
A.4.4	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.3.	43
A.5.5	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.5.	51
A.6.6	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.5.	52
A.7.7	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.7.	56
A.8.8	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.7.	57
A.9.9	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.9.	62
A.10.10	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.9.	63

A.11.	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.9.	69
A.12.	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.11.	70
A.13.	Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante <i>CMOPSO</i> – <i>CLAHE</i> . Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.13.	71
A.14.	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.13.	72

LISTA DE TABLAS

2.2	Proceso de ecualización de histograma básica. Se omiten los niveles de intensidad cuyo conteo es cero.	7
4.1	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	25
4.2	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	26
A.1	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-230.jpg</i>	36
A.2	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	38
A.3	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-231.jpg</i>	41
A.4	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	43
A.5	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-232.jpg</i>	50
A.6	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	52
A.7	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-233.jpg</i>	56
A.8	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	57
A.9	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-234.jpg</i>	61
A.10	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	63
A.11	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-236.jpg</i>	68
A.12	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	70
A.13	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-237.jpg</i>	70

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Imagen original	20
T	Imagen con contraste mejorado	21
I_y	Canal Y del espacio $YCbCr$ de la imagen original	21
T_y	Canal Y del espacio $YCbCr$ de la imagen contrastada	21
I_R	Canal R del espacio RGB de la imagen original	21
T_R	Canal R del espacio RGB de la imagen contrastada	21
I_G	Canal G del espacio RGB de la imagen original	21
T_G	Canal G del espacio RGB de la imagen contrastada	21
I_B	Canal B del espacio RGB de la imagen original	21
T_B	Canal B del espacio RGB de la imagen contrastada	21
\mathcal{H}	Entropía de la imagen digital	18
$SSIM$	Índice de Similaridad Estructural	19
μ_{I_x}	Promedio de intensidad de I en el canal x	19
μ_{T_y}	Promedio de intensidad de T en el canal y	19
σ_{I_x}	Varianza de intensidad de I en el canal x	??
σ_{T_y}	Varianza de intensidad de T en el canal y	19
$\sigma_{I_x T_y}$	Covarianza de intensidades de I y T en el canal y	19
\vec{x}	Partícula componente de $MOPSO$	14
\vec{v}	Componente de velocidad de $MOPSO$	15
χ	Constricción de velocidad de $MOPSO$	15
φ	Variable de denominador de χ	17
\mathcal{X}	Conjunto de soluciones no dominadas del algoritmo $CMOPSO$ – $CLAHE$	23
Ω	Cantidad de partículas que componen una iteración de la meta- heurística $MOPSO$	22
\mathcal{R}_x	Parámetro de ventana x de $CLAHE$	21
\mathcal{R}_y	Parámetro de ventana y de $CLAHE$	21
\mathcal{C}	Parámetro de <i>Clip Limit</i> de $CLAHE$	11

LISTA DE ABREVIATURAS

RGB: Espacio de color RGB.

$YCbCr$: Espacio de color $YCbCr$.

CDF: Función de Distribución Acumulativa.

CLAHE: *Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization*.

SSIM: *Índice de Similitud Estructural*.

L: Niveles de intensidad representados en la imagen.

$SSIM_R$: *Índice de Similitud Estructural* medido sobre el canal R .

$SSIM_G$: *Índice de Similitud Estructural* medido sobre el canal G .

$SSIM_B$: *Índice de Similitud Estructural* medido sobre el canal B .

MPHE: *MultiPeak Histogram Equalization*.

MBOBHE: *Multipurpose Beta Optimized Bihistogram Equalization*.

PSO: *Particle Swarm Optimization*.

MOPSO: *Multi-Objective Particle Swarm Optimization*.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

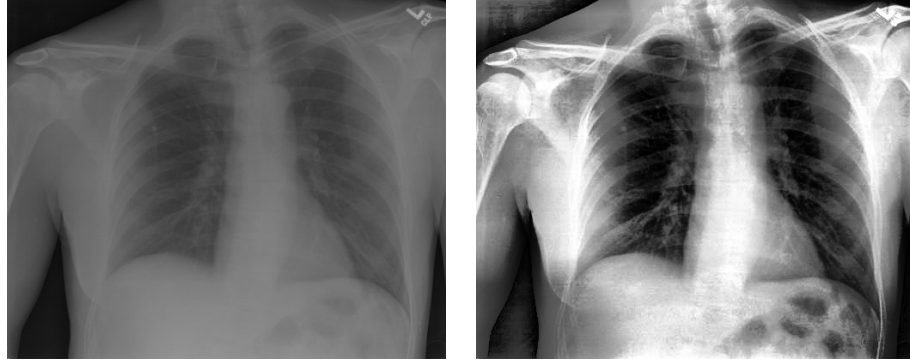
En el Procesamiento Digital de Imágenes, la Mejora del Contraste es un proceso que consiste en la transformación de píxeles de una imagen, con la finalidad de realizar cambios de manera tal a resaltar uno o más objetos dentro de la imagen tratada. El objetivo principal del proceso de Mejora del Contraste es la de obtener una nueva imagen cuyo Contraste sea más adecuado para la aplicación específica que se utilizará después [GW02a].

La Mejora del Contraste es un paso de preprocesamiento fundamental para varias aplicaciones. Algunas de las aplicaciones que más se benefician de éste proceso se detallan a continuación:

- Imágenes Médicas (como ejemplos es posible tomar: el Diagnóstico Asistido por Computadora [Doi07], Imágenes de Tomografía Computarizada [EW93], y otros).
- Sensoreamiento Remoto [LKC14],
- Imágenes satelitales [DOA10],
- Imágenes astronómicas [Mal81],
- Imágenes biométricas[BP11],
- Otras[BN89].

Las técnicas basadas en Ecualización del Histograma se mostraron extensivamente válidas para enfocar los problemas de Mejora del Contraste [PAA⁺87, Zui94, Kim97]. Varias Meta-Heurísticas en contextos de Optimización Mono-Objetivo, y también Optimización Multi-Objetivo fueron testeadas satisfactoriamente de manera a resolver problemas de Mejora del Contraste en imágenes

en escala de grises [MB14, MBA⁺15, Sai99, HS13]. Sin embargo, la Optimización Multi-Objetivo aplicada a la Mejora del Contraste en imágenes a color supone dificultades adicionales, debido a que es necesario preservar la información de color presente dentro de dichas imágenes.



(a) Imagen Original

(b) Imagen con contraste mejorado

Figura 1.1: Imagen en escala de grises e imagen con contraste mejorado para posterior utilización.

Esta propuesta consiste en realizar pruebas de Mejora del Contraste con imágenes a color transformadas desde el espacio de colores RGB al espacio de colores $YCbCr$ de manera a realizar la Mejora de Contraste basada en Optimización Multi-Objetivo. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) se aplica sobre el canal Y de la imagen de prueba, de manera a modificar el contraste, y la imagen resultante se transforma nuevamente a RGB de forma a evaluar la Mejora del Contraste lograda, además de la similaridad entre canales de color.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar un algoritmo de mejora de contraste para imágenes a color, utilizando un enfoque de Metaheurística Multi-Objetiva pura. El mismo debe de entrenar al algoritmo de Mejora del Contraste para la obtención de variables de decisión que logren mejorar el contraste de imágenes digitales.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un nuevo algoritmo de Mejora del Contraste de imágenes a color basado en Metaheurísticas Multi-Objetivo.

- Demostrar la factibilidad del enfoque de Mejora de Contraste de imágenes a color basado en Metaheurísticas Multi-Objetivo puras.
- Entrenar al algoritmo de Mejora del contraste para la obtención de variables de decisión para un conjunto de imágenes de prueba tipo.
- Encontrar alternativas de implementación que ayuden a subsanar problemas inherentes a los enfoques basados en Metaheurísticas Multi-Objetivo, cuando la cantidad de objetivos sobrepasa a tres.

1.2 Estructura de la tesis

El trabajo, en las secciones siguientes se organiza de la siguiente manera: en el capítulo 2, los conceptos fundamentales de éste trabajo se presentan; en el capítulo 3.2 se presenta el problema de Mejora de Contraste, y el enfoque de éste trabajo se muestra; en el capítulo 4 se discute en detalle los resultados obtenidos, y finalmente en el capítulo 5 se hacen algunos comentarios finales.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

Éste capítulo presenta una introducción a los conceptos principales utilizados en éste trabajo. Solamente se busca presentar los conceptos fundamentales, necesarios para comprender los detalles técnicos del mismo.

Primeramente se muestran conceptos relacionados al procesamiento de la imagen, y luego se enfoca en los conceptos fundamentales necesarios para comprender la metaheurística asociada.

2.1 Ecualización del Histograma

La Ecualización del Histograma es un método de transformación de los píxeles de la imagen digital, cuya finalidad es ajustar el contraste de la misma. Hablando en términos generales, la implementación básica de la Ecualización del Histograma toma todos los píxeles de la imagen, realiza una transformación del histograma de intensidades, e incrementa el contraste global de manera a tener una mejor distribución de intensidades dentro de la imagen. Una ventaja importante de esta técnica es que es una transformación directa y además un operador invertible; además los cálculos necesarios no son intensivos en el sentido computacional.

Existen modificaciones de la técnica básica, que abordan el problema utilizando múltiples histogramas (llamados subhistogramas), cuyo efecto importante es que logran mejoras en el contraste a nivel local. Algunos de los ejemplos más importantes hallados en la literatura son *Adaptive Histogram Equalization* [PAA⁺87], *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* [Zui94], MultiPeak Histogram Equalization (MPHE) [WKC⁺98], y *Multipurpose Beta Optimized Bi-histogram Equalization (MBOBHE)* [HLMS14]. Con éstos algoritmos se busca principalmente la mejora en el contraste sin que ocurra desplazamiento en el brillo medio o artefactos que produzcan pérdidas en detalles a consecuencia de

las transformaciones ocurridas.

2.1.1 Implementación Básica

Si se considera una imagen digital discreta en escala de grises I , sea la probabilidad de ocurrencia de un nivel de gris i_k dentro de la imagen una aproximación de la forma:

$$p_r(i_k) = \frac{n_k}{M \times N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, L - 1 \quad (2.1)$$

donde $M \times N$ es el número total de pixeles de la imagen, n_k es el número de pixeles que poseen el nivel de gris i_k , y L es número de pixeles representables en la imagen. Se busca una función de transformación de los niveles de intensidad de los pixeles de la forma:

$$\begin{aligned} CDF(i_k) &= \sum_{j=0}^k p_r(i_j) \\ &= \sum_{j=0}^k \frac{i_j}{M \times N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, L - 1 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Entonces, una imagen resultante se obtiene a partir del mapeo de cada pixel de nivel de intensidad i_k de la imagen de entrada con un pixel correspondiente de nivel de intensidad i'_k utilizando la ecuación 2.2. Nótese que $CDF(i_k)$ es la *Función de Distribución Acumulada* (CDF , por sus siglas en inglés) de la función de distribución de probabilidades $p_r(i_j)$.

Finalmente, el nuevo valor de intensidad i'_k correspondiente a la imagen digital transformada se obtiene multiplicando $CDF(i_k)$ por $L - 1$, es decir:

$$i'_k = \lceil CDF(i_k) \times (L - 1) \rceil \quad (2.3)$$

con $i'_k \leq L - 1$.

2.1.2 Ejemplo de aplicación

Mediante un ejemplo es posible clarificar el concepto presentado arriba. Por lo tanto, si asumimos una imagen digital de 64 pixeles con $L = 256$ niveles de gris, con el mapa de intensidades que se muestra abajo, y su respectiva representación visual:

$$\begin{bmatrix} 52 & 55 & 61 & 59 & 70 & 61 & 76 & 61 \\ 62 & 59 & 55 & 10 & 94 & 85 & 59 & 71 \\ 63 & 65 & 66 & 113 & 144 & 104 & 63 & 72 \\ 64 & 70 & 70 & 126 & 154 & 109 & 71 & 69 \\ 67 & 73 & 68 & 106 & 122 & 88 & 68 & 68 \\ 68 & 79 & 60 & 79 & 77 & 66 & 58 & 75 \\ 69 & 85 & 64 & 58 & 55 & 61 & 65 & 83 \\ 70 & 87 & 69 & 68 & 65 & 73 & 78 & 90 \end{bmatrix}$$

Figura 2.1: Mapa de intensidades de una imagen de nivel de gris de ejemplo.

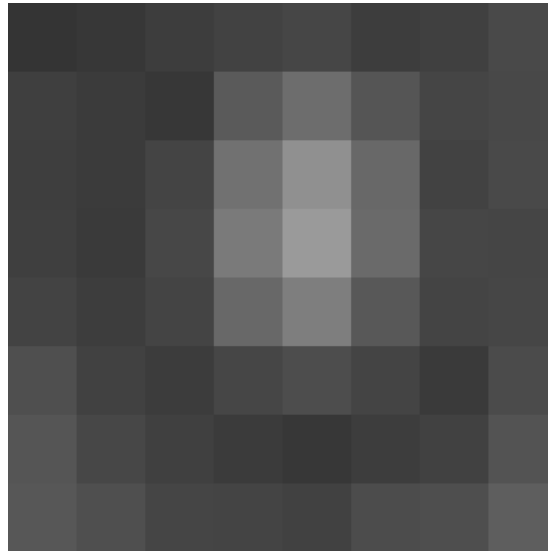


Figura 2.2: Imagen original representada en la matriz de intensidades.

La tabla siguiente muestra de manera resumida el proceso correspondiente a la ecualización del histograma básica, para la imagen de ejemplo:

	i_k	n_k	$n_k/(M \times N)$	$CDF(i_k)$	i'_k	
	52	1	0,00390625	0,02	4	
	55	3	0,015625	0,06	16	
	58	2	0,0234375	0,09	24	
	59	3	0,03515625	0,14	36	
	60	1	0,0390625	0,16	40	
	61	4	0,0546875	0,22	56	
	62	1	0,05859375	0,23	60	
	63	2	0,06640625	0,27	68	
	64	2	0,07421875	0,30	76	
	65	3	0,0859375	0,34	88	
	66	2	0,09375	0,38	96	
	67	1	0,09765625	0,39	100	
	68	5	0,1171875	0,47	120	
	69	3	0,12890625	0,52	131	
	70	4	0,14453125	0,58	147	
	71	2	0,15234375	0,61	155	
	72	1	0,15625	0,63	159	
	73	2	0,1640625	0,66	167	
	75	1	0,16796875	0,67	171	
	76	1	0,171875	0,69	175	
	77	1	0,17578125	0,70	179	
	78	1	0,1796875	0,72	183	
	79	2	0,1875	0,75	191	
	83	1	0,19140625	0,77	195	
	85	2	0,19921875	0,80	203	
	87	1	0,203125	0,81	207	
	88	1	0,20703125	0,83	211	
	90	1	0,2109375	0,84	215	
	94	1	0,21484375	0,86	219	
	104	2	0,22265625	0,89	227	
	106	1	0,2265625	0,91	231	
	109	1	0,23046875	0,92	235	
	113	1	0,234375	0,94	239	
	122	1	0,23828125	0,95	243	
	126	1	0,2421875	0,97	247	
	144	1	0,24609375	0,98	251	
	154	1	0,25	1,00	255	

Tabla 2.2: Proceso de ecualización de histograma básica. Se omiten los niveles de intensidad cuyo conteo es cero.

La Tabla 2.2 muestra el proceso de ecualización de la imagen de ejemplo. Si se representa una imagen digital con 8 bits (lo cual permite representar 256 niveles de intensidad en la imagen digital), y se tiene el conteo de pixeles para cada nivel como se muestra en la columna n_k , entonces el proceso de normalización será como se ve en la columna $n_k/(M \times N)$, el CDF se calcula como se muestra en la columna $CDF(i_k)$ y finalmente el nivel de gris mapeado será el que se muestra en la columna i'_k .

Éste proceso arroja un nuevo mapa de intensidades, que se obtiene a partir del reemplazo de los valores i_k por i'_k en el mapa original, como se muestra abajo:

4	16	56	36	147	56	175	56
60	36	16	227	219	203	36	155
68	88	96	239	251	227	68	159
76	147	147	247	255	235	155	131
100	167	120	231	243	211	120	120
120	191	40	191	179	96	24	171
131	203	76	24	16	56	88	195
147	207	131	120	88	167	183	215

Figura 2.3: Mapa de intensidades luego del proceso de ecualización.

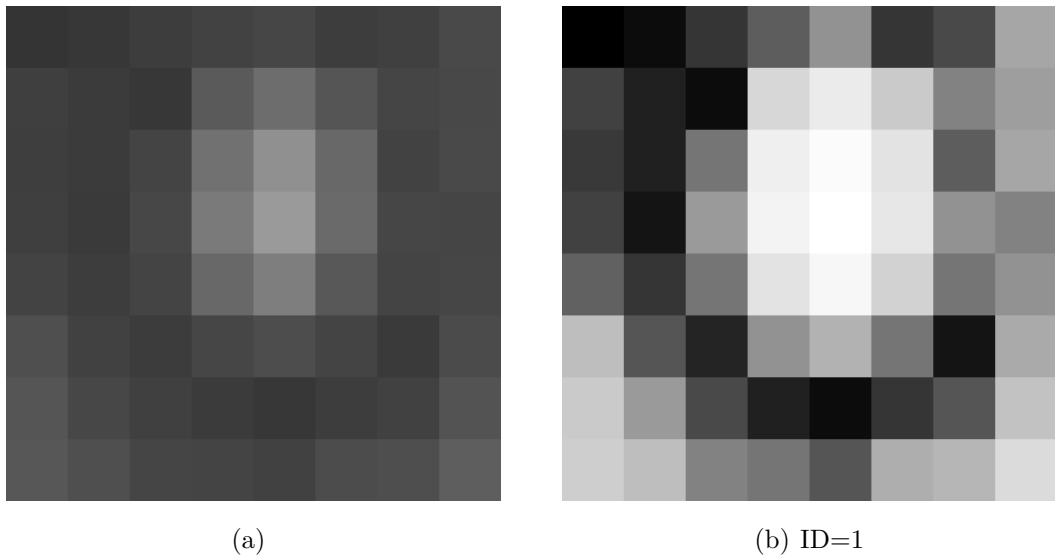
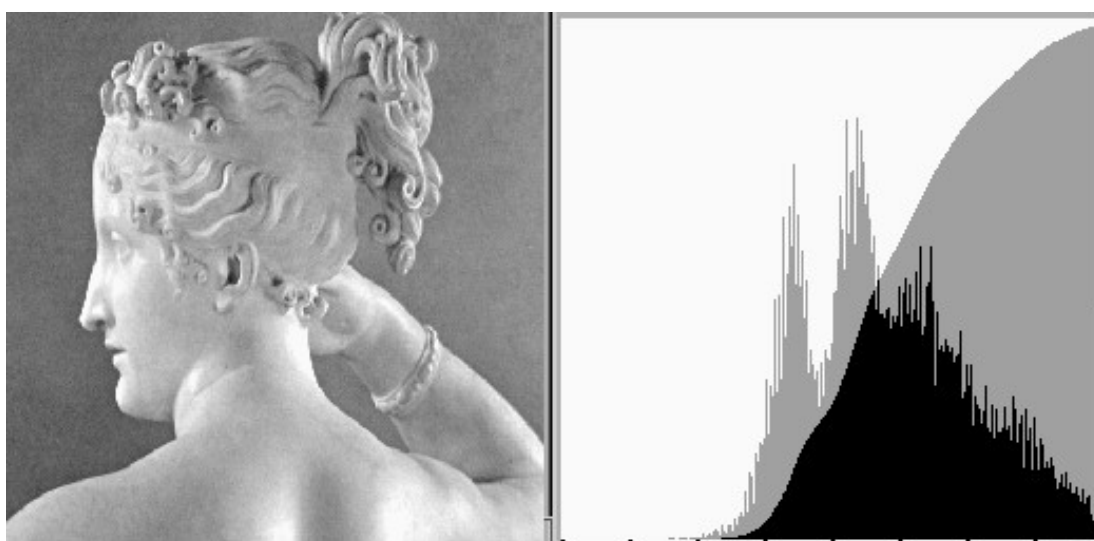
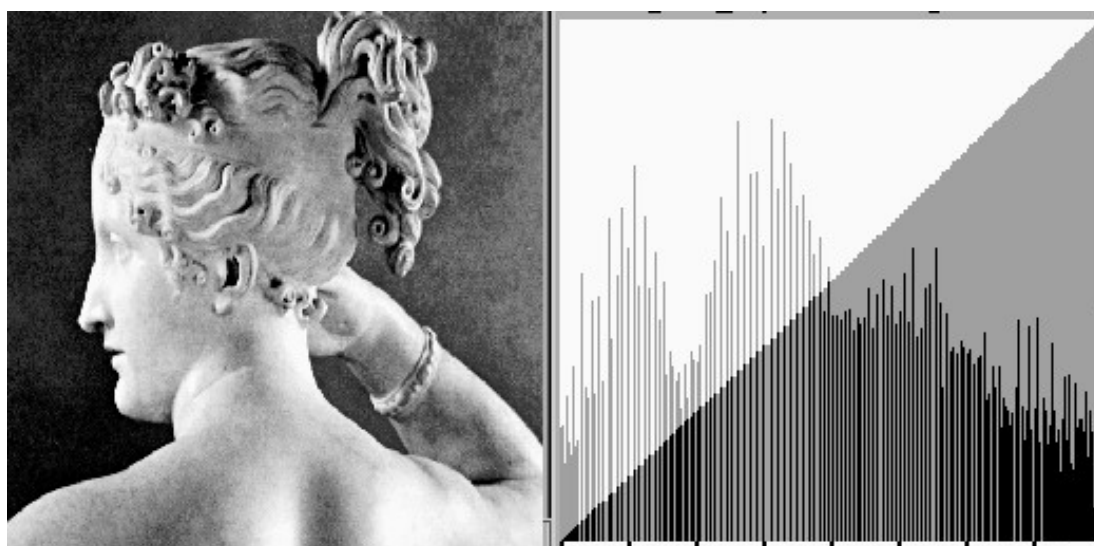


Figura 2.4: Imágenes original y ecualizada, al final del proceso de ecualización.



(a)



(b)

Figura 2.5: Imágenes original y resultante luego de la aplicación de la ecualización del histograma. A la izquierda de cada una se observa el histograma y el CDF respectivo a cada imagen.

La Figura 2.5(a) muestra una imagen sin procesar, con su correspondiente histograma y CDF previos al proceso de ecualización; en la Figura 2.5(b) se muestra la imagen obtenida luego de aplicar el proceso de ecualización, y los correspondientes histograma y CDF resultantes luego de éste proceso.

2.2 Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)

El algoritmo presentado en la sección anterior toma la imagen completa para realizar la tarea de ecualización del histograma. Ésto en general no es adecuado cuando se trabaja con imágenes cuyos detalles contenidos son cruciales para la posterior utilidad de la imagen transformada (imágenes aéreas, médicas, biométricas, y otras); es por éste motivo que se estudian (y en éste trabajo en particular se adoptan) algoritmos de mejora de contraste basados en ecualización del histograma por regiones, o algoritmos de ecualización locales.

En particular, *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE) [Zui94] es un algoritmo bien conocido para la Mejora del Contraste, diseñado para ser aplicado de manera amplia en el contexto del procesamiento digital de imágenes. CLAHE es una variación del algoritmo de Mejora del Contraste denominado *Adaptive Histogram Equalization* (AHE) [PAA⁺87]. Ambas técnicas se explican en las subsecciones siguientes debido a la cercanía existente por la similitud en cuanto a la implementación.

2.2.1 Adaptive Histogram Equalization

El problema con la ecualización del histograma ordinaria, es que la imagen digital podría tener regiones significativamente más oscuras o claras que el resto de la imagen, por lo que el contraste en esas regiones podría no mejorar significativamente.

En AHE, una imagen es procesada transformando cada pixel utilizando una función basada en el histograma de los pixeles que lo rodean; en principio éste algoritmo se desarrolló para su uso en displays de cabina de aviones de guerra [KLW74]. En su forma más simple, cada pixel se transforma en base al histograma de la región que envuelve al pixel. La derivación de las funciones de transformación de los histogramas locales es exactamente el mismo que en la ecualización del histograma ordinaria: La función de transformación es proporcional a la función de distribución acumulativa *CDF* de los valores de pixeles de la vecindad.

Propiedades de AHE

- El tamaño de la región de vecindad es un parámetro del método.

- Cuando una región de la imagen que contiene a un vecindario de píxeles es relativamente homogénea en cuanto a intensidades, el histograma resultante posee picos fuertes, y la función de transformación mapea un rango de intensidades corto a todo el rango de la imagen resultante. Ésto causa que *AHE* amplifique porciones pequeñas de ruido en regiones de la imagen con intensidades homogéneas.

2.2.2 Contrast Limited AHE

Contrast Limited *AHE* (*CLAHE*) es diferente a la ecualización adaptativa del histograma descrita arriba debido al esquema de limitación del contraste impuesto. *CLAHE* se desarrolló para prevenir la sobre-amplificación de ruido que se percibe en *AHE*.

Éste problema se supera limitando la mejora del contraste realizada por *AHE*. La amplificación del contraste en la vecindad de un pixel de intensidad dada está relacionada a la pendiente de la función de transformación. Ésto significa que la amplificación es proporcional a la pendiente de la *CDF* del vecindario y por tanto al valor del histograma a partir de ese valor de pixel. *CLAHE* limita la amplificación recortando el histograma de acuerdo a un coeficiente predefinido, denominado *Clip Limit* antes de computar el *CDF*. Ésto limita la pendiente del *CDF* y por tanto la función de transformación.

Es importante no descartar la parte del histograma que excede a *Clip Limit* sino que se redistribuye de manera igualitaria entre todas las columnas del histograma, como se muestra en la Figura 2.6.

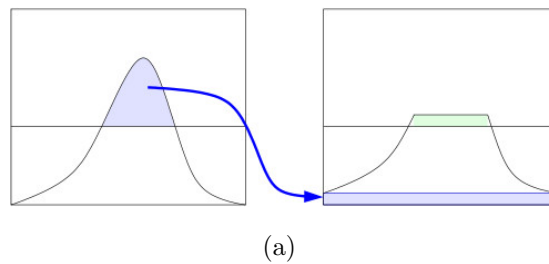


Figura 2.6: Redistribución de niveles de intensidad dentro del histograma de una región de una imagen, como paso previo al cálculo del *CDF*. Ésto tiene como efecto la suavización del proceso de mejora del contraste.

2.3 Espacios de Color Adoptados

Los Espacios de Color [GW02a] son representaciones de color de las imágenes digitales, que por lo general se aceptan mediante convención o por estándar de hecho. Por lo general, los Espacios de Color consisten en sistemas de coordenadas donde cada punto es un color representable dentro del Espacio.

En éste trabajo se utilizan dos espacios de color importantes encontrados en la literatura, los cuales son analizados en las subsecciones siguientes: *RGB* y *YCbCr*.

2.3.1 El espacio de colores *Red, Green, Blue*

El primer espacio importante a analizar en este trabajo es *RGB* (del inglés *Red, Green, Blue*). *RGB* es un modelo de color aditivo en el cual las luces de color *rojo*, *verde*, y *azul* se agregan de varias maneras de forma a reproducir un conjunto amplio de colores. El propósito principal de éste modelo es la percepción, representación y muestra de imágenes en sistemas electrónicos tales como televisores y computadoras, a pesar de que también se utilizó en la fotografía convencional.

En el modelo *RGB*, cada color aparece como un componente primario del *Rojo, Verde y Azul*. Éste modelo sencillo se basa en el sistema de coordenadas Cartesianas. En la Figura 2.7 se pueden apreciar algunos colores notables representados en el espacio *RGB*: por ejemplo, el azul puro se representa como $(0, 0, 1)$, el verde puro como $(0, 1, 0)$ y el rojo puro como $(1, 0, 0)$; mientras que el negro se representa como $(0, 0, 0)$ y el blanco como $(1, 1, 1)$. Se puede apreciar la ventaja de usar ese sistema de representación de colores, el cual es sencillo. Se asume un sistema de coordenadas normalizado.

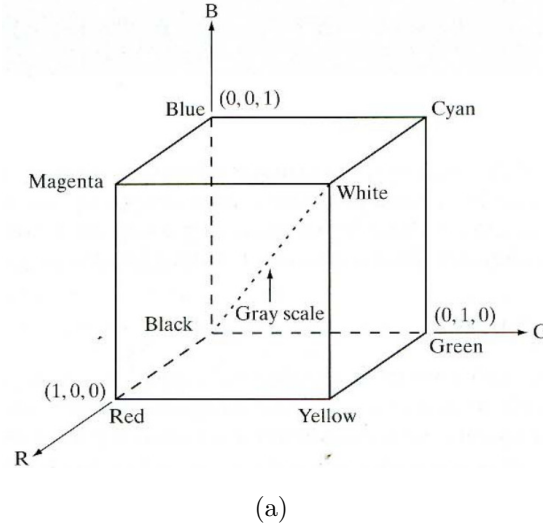


Figura 2.7: Diagrama esquemático del cubo que representa al espacio de colores *RGB*. Se pueden apreciar algunos colores notables.

En este trabajo, las imágenes originales se representan utilizando el espacio de colores *RGB*; en éste caso se tiene un arreglo de pixeles de color de tamaño $N \times M \times 3$. Cada pixel de color está representado por un elemento $[z_r \ z_g \ z_b]$ del arreglo previamente mencionado, donde z_r, z_g, z_b son los componentes rojo, verde y azul de un pixel de color en una ubicación específica.

2.3.2 El espacio de colores *YCbCr*

Las imágenes originales son luego transformadas al espacio de colores *YCbCr* [GW02b], el cual es una representación ampliamente utilizada en el video digital. En esta representación *Y* representa la información de luminancia de la imagen, mientras que el componente *Cb* representa la diferencia entre el componente azul y un valor de referencia, mientras que el componente *Cr* es la diferencia entre el componente rojo y un valor de referencia. Otra ventaja importante de ésta representación es que la conversión desde *RGB*, y nuevamente hacia *RGB* es directa:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65.481 & 128.553 & 24.966 \\ -37.797 & -74.203 & 112.000 \\ 112.000 & -93.786 & -18.214 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y + 1.402 \cdot (C_r - 128) \\ Y - 0.34414 \cdot (C_b - 128) - 0.71414 \cdot (C_r - 128) \\ Y + 1.772 \cdot (C_b - 128) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

En la Figura 2.8 se muestra cómo se separan los planos de Y (intensidad) de los planos de color Cb y Cr respectivamente. Ésta separación pone en evidencia la conveniencia de ésta representación de colores, considerando que utilizar un canal de intensidades es adecuado para el algoritmo de mejora de contraste descrito en la Sección 2.2.



Figura 2.8: Imagen de ejemplo con las representaciones de intensidad (Y) y de color (Cb, Cr). Nótese que el mapa de intensidades Y es una representación en escala de grises de la imagen digital.

2.4 Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

En este trabajo se aplica un enfoque Metaheurístico al problema de encontrar parámetros adecuados para el algoritmo de Mejora del Contraste, con miras a lograr una buena correlación entre objetivos de contraste y distorsión.

Particle Swarm Optimization (PSO) [KE95] es una Metaheurística computacional que optimiza un problema buscando mejorar soluciones candidatas de manera iterativa, moviendo las partículas dentro de un espacio de búsqueda definido por los parámetros de entrada del algoritmo sobre el que se aplica, y moviendo las partículas de acuerdo a fórmulas matemáticas simples de velocidad y posición.

PSO se atribuye originalmente a Kennedy, Eberhart y Shi [SE98].

En la Figura 2.9 se puede ver como unas soluciones candidatas se mueven dentro de un espacio de búsqueda, de manera de optimizar un objetivo.

En *PSO*, cada solución potencial del problema que se trata se denomina *particle* y la población actual de soluciones se llama *swarm*. Cada partícula \vec{x} realiza una búsqueda dentro de un espacio de búsqueda Ω , y para cada generación t , cada solución \vec{x} se actualiza de acuerdo a:

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (2.6)$$

Aquí, \vec{v} es un factor conocido como la velocidad, y está dado por:

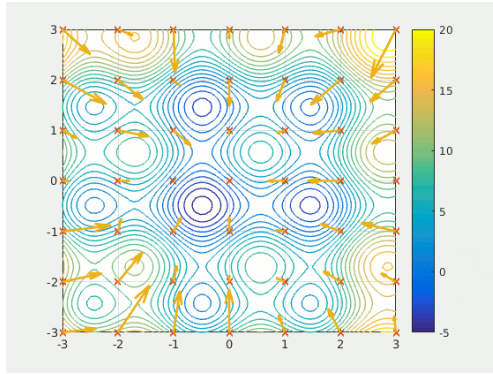
$$\vec{v}_i(t) = w \cdot (t - 1) + C_1 \cdot r_1 \cdot (\vec{x}_{p_i} - \vec{x}_i) + C_2 \cdot r_2 \cdot (\vec{x}_{g_i} - \vec{x}_i), \quad (2.7)$$

donde \vec{x}_{p_i} es la mejor solución que \vec{x}_i encontró hasta la iteración $t - 1$, \vec{x}_{g_i} es la mejor solución que el enjambre completo encontró durante la iteración $t - 1$, w es un coeficiente conocido como el *peso de la inercia*, que controla la tasa de velocidad de la búsqueda de *PSO*; r_1 y r_2 son números aleatorios entre $[0, 1]$. Finalmente, C_1 y C_2 son los coeficientes que controlan la ponderación entre partículas globales y locales durante la búsqueda.

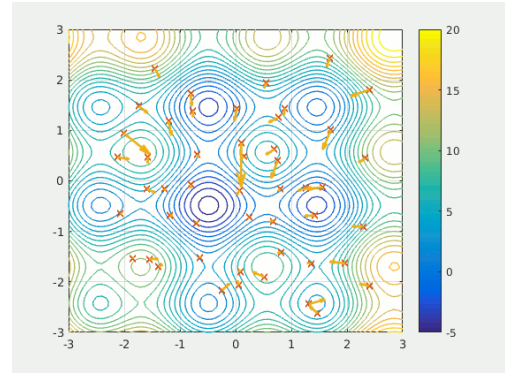
Multi-Objective Particle Swarm Optimization (*MOPSO*) [NDGN⁺09] es la versión de *PSO* para enfoques de optimización con más de un objetivo. Se añaden determinadas características para lograr cierta eficiencia durante el proceso de optimización definido arriba, y se basa en el concepto de *Dominancia Pareto* [Voo03] para determinar las soluciones que se proponen como óptimas en el contexto de optimización Multi-Objetivo. Se dice que una solución potencial domina a otra (se escribe $a \succ b$) cuando todos los objetivos son menores o iguales, y al menos un objetivo es estrictamente menor.

En *MOPSO* se añaden algunas características a *PSO*, a saber: un *coeficiente de constricción* χ se adopta de manera a controlar la velocidad de la partícula, como se describe abajo:

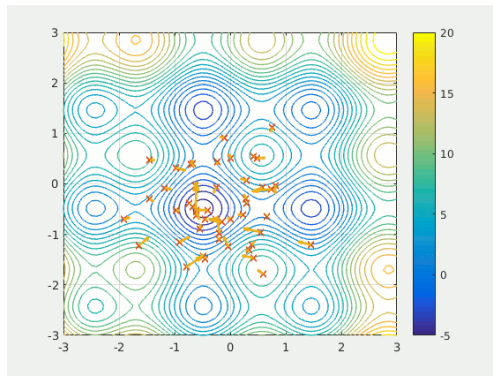
$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (2.8)$$



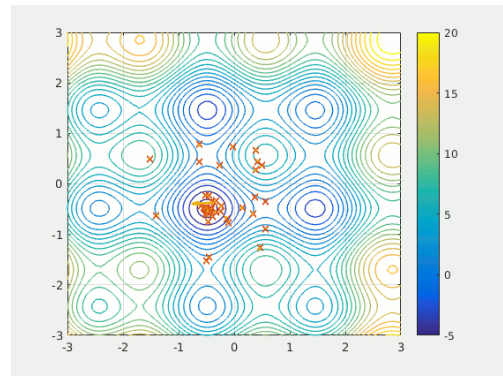
(a)



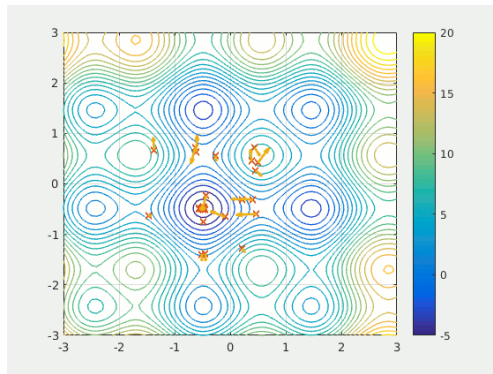
(b)



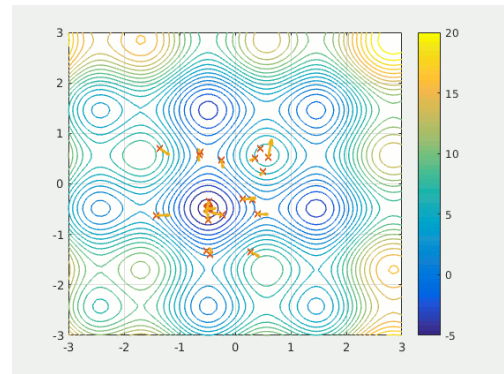
(c)



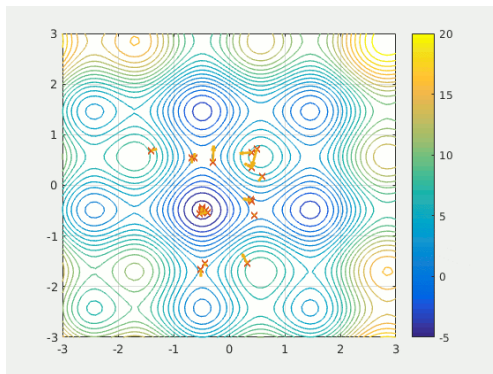
(d)



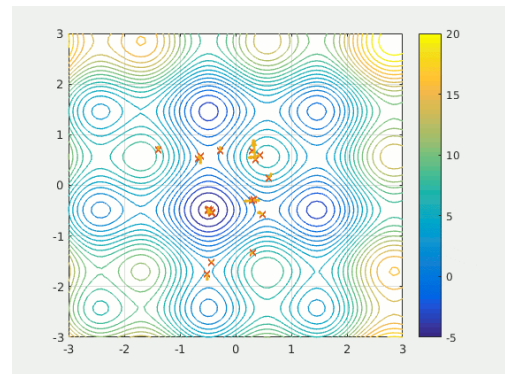
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 2.9: Comportamiento de partículas en *PSO* Monobjetivo a través de la serie de iteraciones. Nótese que las equis (x) indican un punto o solución potencial que se mueve sobre la superficie donde los colores más fríos son mejores soluciones.

donde φ

$$\varphi = \begin{cases} C_1 + C_2 & \text{if } C_1 + C_2 > 4 \\ 0, & \text{if } C_1 + C_2 \leq 4 \end{cases} \quad (2.9)$$

Además, la velocidad en *MOPSO* se acota con la siguiente ecuación de restricción de velocidad:

$$v_{i,j}(t) = \begin{cases} \text{delta}_j & \text{if } v_{i,j}(t) > \text{delta}_j \\ -\text{delta}_j, & \text{if } v_{i,j}(t) \leq -\text{delta}_j \\ v_{i,j}(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.10)$$

donde

$$\text{delta}_j = \frac{\text{upper_limit}_j - \text{lower_limit}_j}{2} \quad (2.11)$$

upper_limit_j y lower_limit_j son coeficientes definidos para la restricción de velocidad.

2.5 Métricas de Optimización

Las soluciones potenciales obtenidas mediante el proceso descrito en éste trabajo deben ser evaluadas para determinar las mejores soluciones en términos de las características descritas en secciones anteriores. Una solución se considera de mejor calidad que otra cuando se tienen mejores valores de *Entropía* (Contraste de la imagen obtenida) y *Índice de Similitud Estructural (SSIM)*. Éstas *Métricas de evaluación* guían el proceso de búsqueda *MOPSO* descrito en la sección anterior.

2.5.1 Entropía de la imagen

La entropía de la imagen [KBD91] es una métrica que mide cuánta información está representada dentro de la imagen. La entropía y el contraste se relacionan de manera muy cercana a la distribución de intensidad de las imágenes, por lo que esta métrica es capaz de verificar las variaciones de contraste como consecuencia de las transformaciones de la imagen.

Primero, es necesario definir el *Histograma* de intensidades de una imagen H como sigue: Sea n_1, n_2, \dots, n_L el conteo de píxeles con intensidades i_1, i_2, \dots, i_L

respectivamente, y sea también:

$$p_k = \frac{n_k}{M \times N}, \quad \sum_{k=1}^L n_k = M \times N, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (2.12)$$

donde $M \times N$ es la suma total de píxeles mostrados en una imagen I y k es cada nivel de intensidad representable por el espacio de colores de I . Entonces, H se define como la distribución de probabilidad en el que cada p_k representa la probabilidad de ocurrencia de una intensidad k . Entonces, la Entropía de la Imagen se define de la siguiente manera:

$$\mathcal{H} = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2(p_i) \quad \mathcal{H} \in \{0, \dots, \log_2(L)\} \quad (2.13)$$



(a)



(b)

Figura 2.10: Datos de \mathcal{H} para una imagen de ejemplo. En (a) $\mathcal{H} = 7,053228$, en (b) $\mathcal{H} = 7,953866$

En la Figura 2.10 se puede notar el efecto que tiene el proceso de Mejora del Contraste en el coeficiente \mathcal{H} . En éste caso, la imagen resultante tiene un valor mayor de \mathcal{H} debido a que logra mayor contraste; tódo esto se evalúa sobre el canal Y de las representaciones $YCbCr$ de las imágenes.

2.5.2 Índice de Similitud Estructural

El *Índice de Similitud Estructural* (*SSIM*) [WBSS04] es una métrica bien conocida que mide atributos importantes de la imagen tales como la *Luminancia*, *Contraste* y la *Estructura*. *SSIM* tiene como objetivo principal medir la

distorsión agregada a la imagen como consecuencia del proceso de Mejora del Contraste. $SSIM$ es calculado por regiones, por lo tanto, dadas dos imágenes I_x y T_y que representan una imagen original y una mejorada, respectivamente, el índice $SSIM$ se define como se muestra abajo:

$$SSIM(I, T) = \frac{(2\mu_{I_x}\mu_{T_y} + E_1)(2\sigma_{I_x T_y} + E_2)}{(\mu_{I_x}^2 + \mu_{T_y}^2 + E_1)(\sigma_{I_x}^2 + \sigma_{T_y}^2 + E_2)} \quad SSIM \in [0, 1] \quad (2.14)$$

donde μ_{I_x} , μ_{T_y} son los promedios de intensidad de I_x y T_y , respectivamente; $\sigma_{I_x}^2$ y $\sigma_{T_y}^2$ son las varianzas de intensidad para I_x y T_y , respectivamente; $\sigma_{I_x T_y}$ es la covarianza entre las intensidades I_x y T_y . $E_1 = (K_1 L^2)$, donde L es el rango dinámico de intensidades de los pixeles de la imagen, y $0 < K_1 \ll 1$ es una constante pequeña; $E_2 = (K_2 L)^2$, y $0 < K_2 \ll 1$; tanto E_1 como E_2 son constantes utilizadas para estabilizar la división cuando el denominador se acerca a cero.



(a)

(b)

Figura 2.11: Datos de $SSIM$ para una imagen de ejemplo. En (a) $SSIM_R = 1$, $SSIM_G = 1$, $SSIM_B = 1$ en (b) $SSIM_R = 0,484719$, $SSIM_G = 0,525963$, $SSIM_B = 0,533241$

En la Figura 2.11 se pueden apreciar dos detalles importantes: primeramente, $SSIM$ se aplica sobre cada canal de la representación RGB de las imágenes; además, cuando se evalúa una imagen contra sí misma, los valores de $SSIM$ arrojan el valor 1, lo que indica que las imágenes son iguales.

Capítulo 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de Mejora de Contraste es considerado como un Problema de Optimización Multiobjetivo, el cual tiene las siguientes funciones objetivo consideradas en éste trabajo a optimizar:

1. La entropía del canal Y de la imagen resultante, en su representación $YCbCr$,
2. El Índice de Similitud Estructural $SSIM$ medido para los canales R de las imágenes original y resultante, ambos en representación de colores RGB ,
3. El Índice de Similitud Estructural $SSIM$ medido para los canales G de las imágenes original y resultante, ambos en representación de colores RGB ,
4. El Índice de Similitud Estructural $SSIM$ medido para los canales B de las imágenes original y resultante, ambos en representación de colores RGB .

Sujeto a la restricción siguiente: las ventanas representables serán desde 2×2 hasta $M/2 \times N/2$, donde M y N son la cantidad de filas y columnas de píxeles de la imagen digital. Ésta restricción se plantea debido a que no se considera relevante realizar pruebas con ventanas más grandes.

3.1 Formulación del problema planteado

Dada una imagen a color I , con $M \times N$ píxeles, y el algoritmo de Mejora de Contraste $CLAHE$, se busca calcular un conjunto de soluciones no dominadas $\mathcal{X} = \{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_\Omega\}$ que simultáneamente maximicen las funciones objetivo

f_1, f_2, f_3, f_4 en el contexto Pareto; donde cada vector $\vec{x}_i = (\mathcal{R}_x, \mathcal{R}_y, \mathcal{C})$ (\mathcal{R}_x y \mathcal{R}_y son regiones contextuales y \mathcal{C} es el *Clip Limit*):

$$\begin{aligned} \mathcal{P} = (\{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_\Omega\}) \longrightarrow \max[f_1(T_y), f_2(I_R, T_R), f_3(I_G, T_G), f_4(I_B, T_B)]; \\ f_1, f_2, f_3, f_4 \in [0, 1] \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde:

- I es la imagen a la que se aplica el proceso de Mejora del Contraste, y T es una de las imágenes resultantes del proceso,
- T_y es el mapa de intensidades mejoradas, al aplicar \vec{x} a I_y ; ésto es: $T_y = CLAHE(\vec{x}, I_y)$. T_y e I_y son los canales Y de la representación $YCbCr$ de las imágenes I y T , respectivamente,
- $f_1(T_y) = \frac{\mathcal{H}(T_y)}{\log_2 L}$ es la Entropía Normalizada del mapa de intensidades mejoradas T_y , como se describió arriba,
- $f_2(I_R, T_R) = SSIM(I_R, T_R)$ es la medición del $SSIM$ entre I_R y T_R . I_R y T_R son los canales R de las representaciones RGB de I y T , respectivamente,
- $f_3(I_G, T_G) = SSIM(I_G, T_G)$ es la medición del $SSIM$ entre I_G y T_G . I_G y T_G son los canales G de las representaciones RGB de I y T , respectivamente,
- $f_4(I_B, T_B) = SSIM(I_B, T_B)$ es la medición del $SSIM$ entre I_B y T_B . I_B y T_B son los canales B de las representaciones RGB de I y T , respectivamente,

Acotados por:

- $\mathcal{R}_x \in [2, \dots, M]$ dentro de \mathbb{N} ,
- $\mathcal{R}_y \in [2, \dots, N]$ dentro de \mathbb{N} ,
- $\mathcal{C} \in (0, \dots, 1]$ dentro \mathbb{R} .

3.2 Propuesta

En éste trabajo se propone abordar el problema planteado utilizando la Meta-heurística *MOPSO* que sintoniza los parámetros de *CLAHE*. La propuesta se describe en el **Algoritmo 1**:

Algorithm 1 MOPSO-CLAHE

Require: Imagen de entrada I , cantidad de partículas Ω , iteraciones t_{max}

```

1: Inicializar  $\omega$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $t = 0$ ,  $lower\_limit_1$ ,  $lower\_limit_2$ ,  $lower\_limit_3$ ,  $upper\_limit_1$ ,  $upper\_limit_2$ ,  $upper\_limit_3$ ,  $\mathcal{R}$ 
2: while  $t < t_{max}$  do
3:   for cada  $i$ -ésima partícula do
4:     Calcular nuevas velocidades  $\vec{v}_i^t$  de partículas utilizando las ecuaciones (2.7) and (2.10)
5:     Calcular nuevas posiciones de partículas  $\vec{x}_i^t$  en base a la expresión (2.6)
6:      $I_{RGB} \rightarrow I_{YCbCr}$ 
7:      $T_{(y,i)} = \text{CLAHE}(\vec{x}_i^t, I_y)$ 
8:      $f_i^t = f_1(T_{(y,i)}), f_2(I_{(R,i)}), f_3(I_{(G,i)}), f_4(I_{(B,i)})$ 
9:     if  $\vec{x}_i^t \succ \vec{x}_{p_i}^t$  then
10:      replace  $\vec{x}_{p_i}^t$  by  $\vec{x}_i^t$ 
11:     end if
12:     if  $\vec{x}_i^t \succ \vec{x}_{g_i}^t$  then
13:       Update the Pareto set  $\mathcal{R}$ 
14:     end if
15:      $t = t + 1$ 
16:   end for
17: end while
Ensure:  $\mathcal{R}$ 

```

La Figura 3.1 muestra cómo interactúan los elementos de la propuesta descrita, la cual se detalla abajo.

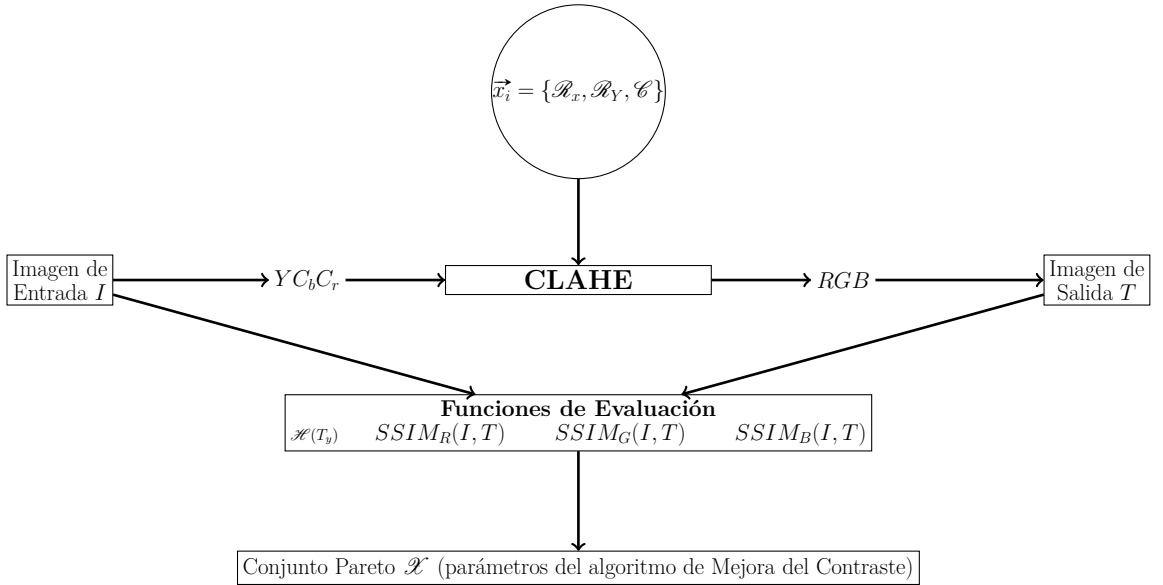


Figura 3.1: Proceso de evaluación de una solución potencial, para una iteración t del Algoritmo 1.

Los parámetros recibidos por *CLAHE* son almacenados por un conjunto de partículas $(\{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_\Omega\}) = (\mathcal{R}_x, \mathcal{R}_y, \mathcal{C})$, las cuales representan soluciones candidatas al problema de Mejora de Contraste; la imagen original I se transforma a su representación $YCrCb$, y $(\{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_\Omega\})$ son aplicados al canal Y

de la imagen digital original, de manera a obtener un grupo de mapas de intensidades $T(y, i)$, el cual es utilizado para realizar la transformación inversa hacia RGB , para así obtener un conjunto de imágenes resultantes T_i . Las imágenes resultantes son evaluadas de acuerdo a las métricas $\mathcal{H}(T_y)$, $SSIM_R$, $SSIM_G$, $SSIM_B$, que son la entropía de las imágenes resultantes medidas en el canal Y de la representación $YCrCb$ de dichas imágenes, y $SSIM_R, SSIM_G, SSIM_B$ son las medidas $SSIM$ de las imágenes original y resultantes utilizando los canales R, G, B de las representaciones RGB de las imágenes. Éstas evaluaciones determinan cuáles soluciones candidatas se pueden considerar no dominadas con respecto al conjunto completo Ω de soluciones obtenidas en una iteración del enfoque Metahuerístico. Las soluciones no dominadas se almacenan finalmente en el conjunto Pareto. El proceso de $CMOPSO - CLAHE$ se repite hasta que se alcanza un criterio de parada.

El resultado final del proceso es un conjunto de parámetros de $CLAHE$ no dominados entre sí \mathcal{X} , los cuales aplicados sobre la imagen deben dar imágenes con distintos niveles de compromiso entre contraste obtenido y distorsión producida por el algoritmo de Mejora del Contraste.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En éste apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentas, y las características más resaltantes que pudieron analizarse a partir de la serie de pruebas.

4.1 Ambiente de Pruebas experimentales

El conjunto de pruebas se realizó sobre el siguiente hardware disponible: Una PC HP Proliant ML 110 Gen9 con las siguientes características:

- Procesador Xeon E7 v3/Xeon E5 v3/Core i7,
- 8GB de memoria del sistema,
- Disco duro de 2TB MB2000GCWDA,
- Sistema Operativo CentOS 7 (centos-release-7-3.1611.el7.centos.x86_64).

4.2 Descripción de resultados obtenidos

Se realizaron pruebas utilizando 8 imágenes a color a partir del conjunto de datos disponible en <http://www.vision.caltech.edu/archive.html>. La tabla 4.1 muestra cómo *SMPSO* fué configurada para la ejecución de prueba experimentales. Los detalles de implementación de *SMPSO* está disponible en [DNA10], mientras que los detalles de implementación para *CLAHE*, \mathcal{H} y *SSIM* están disponibles en [Bra00].

Tabla 4.1: Parámetros de entrada iniciales para CMOPSO-CLAHE.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
L	256		
M	256	N	163
$lower_limit_{\mathcal{R}_x}$	2	$upper_limit_{\mathcal{R}_x}$	$M/2$
$lower_limit_{\mathcal{R}_y}$	2	$upper_limit_{\mathcal{R}_y}$	$N/2$
$lower_limit_{\mathcal{C}}$	0	$upper_limit_{\mathcal{C}}$	0.5
Ω	100	t_{max}	100
$c_1\ min$	1.5	$c_1\ max$	2.5
$c_2\ min$	1.5	$c_2\ max$	2.5
$r_1\ min$	0.0	$r_1\ max$	1.0
$r_2\ min$	0.0	$r_2\ max$	1.0

Para cada imagen de prueba, se realizaron 50 ejecuciones, y en promedio se encontraron 100 soluciones no dominadas. De la Figura 4.1 se puede verificar que es notable la manera en que las variables de decisión entrenadas logran la Mejora del Contraste en las imágenes de prueba; además de que se puede evidenciar también la existencia una relación de compromiso con respecto a la variación de coeficientes entre \mathcal{H} y $SSIM_R, SSIM_G, SSIM_B$. Es también notable a partir de la Figura (4.1)(c) cómo los valores más altos de \mathcal{H} degradan severamente a la imagen, mientras que los valores altos de $SSIM_R, SSIM_G, SSIM_B$ no logran el Contraste suficiente, en ocasiones siendo apenas perceptible; por lo que es necesario encontrar el balance correcto entre \mathcal{H} y $SSIM_R, SSIM_G, SSIM_B$.

En el Anexo A se puede apreciar el detalle de coeficientes obtenidos para las métricas utilizadas en el trabajo.



(a) Imagen Original. $\mathcal{H}_y = 0.207231$, $SSIM_R = 1$, $SSIM_G = 1$, $SSIM_B = 1$



(b) Imagen mejorada. $\mathcal{H}_y = 0.611275$, $SSIM_R = 0.00897331$, $SSIM_G = 0.00823064$, $SSIM_B = 0.00851013$



(c) Imagen mejorada. $\mathcal{H}_y = 0.0350595$, $SSIM_R = 0.416776$, $SSIM_G = 0.403636$, $SSIM_B = 0.417654$



(d) Imagen mejorada. $\mathcal{H}_y = 0.788927$, $SSIM_R = 0.000204143$, $SSIM_G = 0.0000526475$, $SSIM_B = 0.0000518143$

Figura 4.1: Imágenes original y resultantes para la imagen de prueba `calhouse_230.jpg`

Tabla 4.2: Tabla de correlación entre métricas. Los datos fueron tomados de la Tabla de Anexo para la imagen `calhouse_230.jpg`

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,8613	1		
$SSIM_G$	-0,8563	0.9999	1	
$SSIM_B$	-0,8565	0,9998	0.9999	1

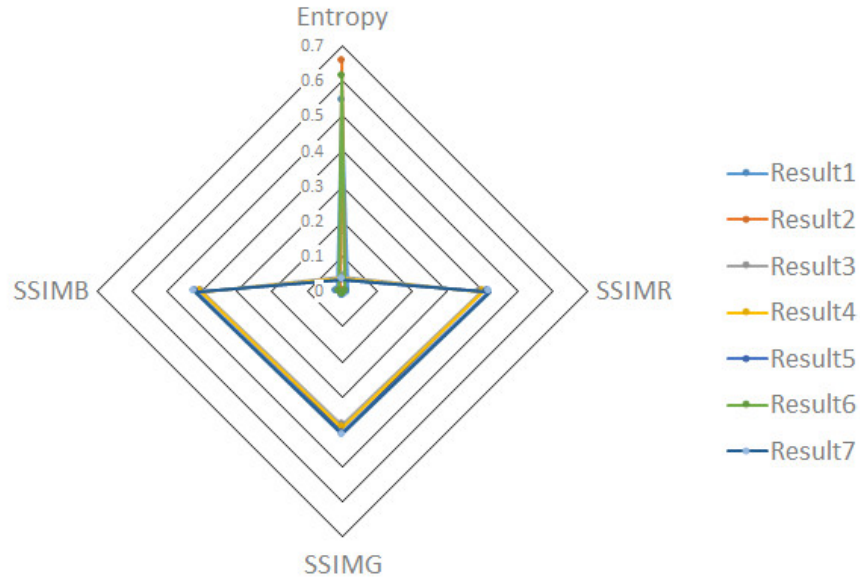


Figura 4.2: Frente Pareto dibujado utilizando datos de referencia métricas de la imagen de prueba `calhouse_230.jpg`

La Figura (4.2) muestra el Frente pareto creado a partir de los datos de coeficientes de métricas de la imagen de prueba `calhouse_230.jpg`, y también la Tabla A.12 muestra la correlación entre métricas, analizadas a partir de los resultados de coeficientes de métricas de dicha imagen. Es notable cómo hay una correlación positiva muy fuerte entre $SSIM_R$, $SSIM_G$ y $SSIM_B$; también existe una correlación negativa entre las métricas previamente mencionadas y \mathcal{H}_y . Éstas correlaciones indican que los canales R, G, B de las imágenes se ven afectadas directamente por el proceso que modifica el canal Y (véase el Algoritmo (1)). Ésto también indica que la Mejora del Contraste de las imágenes a color se puede plantear como un problema de optimización bi-objetivo, utilizando simplemente \mathcal{H}_y y $SSIM$ aplicados sobre el canal Y , o posiblemente tomando como métrica de distorsión alguna métrica relacionada a la medición de variación de color.

Finalmente, se puede mencionar que los tiempos de ejecución de las pruebas (las cuales se detallan en el Anexo), muestran que es temporalmente factible realizar entrenamientos que posibilitan la obtención de variables de decisión adecuadas para el algoritmo de Mejora del Contraste, cuya aplicación posterior garantiza la posibilidad de resaltar distintos detalles de la imagen de acuerdo al contraste aplicado.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se presentó un enfoque de Mejora de Contraste Basada en Optimización Multi-objetivo, el cual toma en cuenta la intensidad y la información de color como métricas Multi-Objetivo. Éste enfoque logra un grupo de imágenes resultantes, con diferentes niveles de compromiso entre contraste y similaridad estructural, de manera a maximizar la información disponible para el análisis posterior.

Se realizó una comparación de la propuesta con una implementación Mono-Objetivo similar del estado del arte, basado solamente en la optimización del canal de intensidades de la imagen, como si se tratara de una imagen en escala de grises. Se puede verificar que el enfoque Mono-Objetivo es insuficiente debido a que no provee información adecuada para obtener variables de decisión útiles para la Mejora del Contraste en Imágenes a Color.

Se demostró de manera satisfactoria la factibilidad del enfoque, con vistas a obtener variables de decisión adecuadas para la Mejora del Contraste de imágenes a color. Futuros experimentos podrían demostrar que las variables de decisión obtenidas son adecuadas para la mejora del contraste en imágenes de cierta categoría, además de encontrar aproximaciones de tiempo de entrenamiento más eficientes.

Los principales aportes encontrados en este trabajo de Maestría pueden resumirse en lo siguiente:

- Se demostró la factibilidad de la aplicación de Metaheurísticas para la obtención de variables de decisión adecuadas para la Mejora del Contraste de Imágenes a Color que permitan contrastar imágenes con distintos niveles de compromiso entre contraste y distorsión por introducción de ruido,
- Se muestra una forma de cambiar el enfoque de la metaheurística de manera

a reducir la cantidad de objetivos utilizados sin comprometer los resultados de los entrenamientos de Mejora del Contraste.

El presente trabajo se presentó en los siguientes congresos, para la necesaria revisión por pares:

- 4th Conference of Computational Interdisciplinary Science (CCIS 2016).
<http://www.epacis.net/ccis2016/en/>
- MICAI 2017: Mexican International Conference on Artificial Intelligence.
<https://www.micai.org/2017/>

5.1 Trabajos futuros

Los trabajos futuros considerados a partir de los resultados obtenidos se detallan a continuación.

- Utilizar métricas más adecuadas para la Mejora del Contraste, considerando que se tienen en cuenta imágenes a color,
- Considerar experimentos utilizando solamente dos objetivos basados en el canal de luminancia de la imagen a color, considerando algún canal que separe la información de intensidad de la información de color de la imagen,
- Considerar experimentos con Metaheurísticas diferentes y métricas diferentes, de manera a realizar comparaciones con la finalidad de alcanzar una posible generalización del trabajo de Mejora de Contraste basada en Metaheurísticas,
- Considerar restricciones de tiempo, cantidad de resultados no dominados, e inclusive considerar información de soluciones no dominadas entre corridas, de manera a buscar mejorar la eficiencia de tiempo y recursos de los enfoques de Mejora del Contraste basados en Metaheurísticas,
- Realizar experimentos relacionados a implementaciones de Metaheurísticas Robustas para la Mejoras de Contraste para imágenes a color,
- Considerar otras categorías de imágenes para realizar experimentos, además de buscar enfoques adecuados para el entrenamiento de variables de decisión, considerando imágenes de tamaño relativamente grande,

- Buscar algoritmos de mejora del contraste que entrenados con Metaheurísticas eviten el efecto ‘halo’ que se aprecia en algunas imágenes resultantes no dominadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [BN89] Azeddine Beghdadi and Alain Le Negrate. Contrast enhancement technique based on local detection of edges. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 46(2):162 – 174, 1989.
- [BP11] D Bennet and Dr S Arumuga Perumal. Fingerprint: Dwt, svd based enhancement and significant contrast for ridges and valleys using fuzzy measures. *arXiv preprint arXiv:1106.5737*, 2011.
- [Bra00] Gary Bradski. The opencv library. *Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer*, 25(11):120–123, 2000.
- [DNA10] Juan J Durillo, Antonio J Nebro, and Enrique Alba. The jmetal framework for multi-objective optimization: Design and architecture. In *Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [DOA10] Hasan Demirel, Cagri Ozcinar, and Gholamreza Anbarjafari. Satellite image contrast enhancement using discrete wavelet transform and singular value decomposition. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 7(2):333–337, 2010.
- [Doi07] Kunio Doi. Computer-aided diagnosis in medical imaging: historical review, current status and future potential. *Computerized medical imaging and graphics*, 31(4):198–211, 2007.
- [EW93] Robert R Edelman and Steven Warach. Magnetic resonance imaging. *New England Journal of Medicine*, 328(10):708–716, 1993. PMID: 8433731.
- [GW02a] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. *Digital Image Processing (2nd Ed)*. Prentice Hall, 2002.
- [GW02b] Rafael C Gonzalez and Richard E Woods. *Processing*, 2002.
- [HLMS14] Yan Chai Hum, Khin Wee Lai, and Maheza Irna Mohamad Salim. Multiobjectives bihistogram equalization for image contrast enhancement. *Complexity*, 20(2):22–36, 2014.

- [HS13] Pourya Hoseini and Mahrokh G. Shayesteh. Efficient contrast enhancement of images using hybrid ant colony optimisation, genetic algorithm, and simulated annealing. *Digital Signal Processing*, 23(3):879 – 893, 2013.
- [KBD91] A. Khellaf, A. Beghdadi, and H. Dupoisot. Entropic contrast enhancement. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 10(4):589–592, Dec 1991.
- [KE95] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, volume 4, pages 1942–1948 vol.4, Nov 1995.
- [Kim97] Yeong-Taeg Kim. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 43(1):1–8, Feb 1997.
- [KLW74] David J Ketcham, Roger W Lowe, and J William Weber. Image enhancement techniques for cockpit displays. Technical report, HUGHES AIRCRAFT CO CULVER CITY CA DISPLAY SYSTEMS LAB, 1974.
- [LKC14] Thomas Lillesand, Ralph W Kiefer, and Jonathan Chipman. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, 2014.
- [Mal81] David Malin. Direct photographic image enhancement in astronomy. *The Journal of Photographic Science*, 29(5):199–205, 1981.
- [MB14] LG Moré and MA Brizuela. Pso applied to parameter tuning of clahe based on entropy and structural similarity index. 2014.
- [MBA⁺15] Luis G More, Marcos A Brizuela, Horacio Legal Ayala, Diego P Pinto-Roa, and Jose Luis Vazquez Noguera. Parameter tuning of clahe based on multi-objective optimization to achieve different contrast levels in medical images. In *Image Processing (ICIP), 2015 IEEE International Conference on*, pages 4644–4648. IEEE, 2015.
- [NDGN⁺09] Antonio J Nebro, Juan José Durillo, Jose Garcia-Nieto, CA Coello Coello, Francisco Luna, and Enrique Alba. Smpso: A new pso-based metaheuristic for multi-objective optimization. In *Computational intelligence in multi-criteria decision-making, 2009. mcdm'09. iee symposium on*, pages 66–73. IEEE, 2009.

- [PAA⁺87] Stephen M Pizer, E Philip Amburn, John D Austin, Robert Cromartie, Ari Geselowitz, Trey Greer, Bart ter Haar Romeny, John B Zimmerman, and Karel Zuiderveld. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer vision, graphics, and image processing*, 39(3):355–368, 1987.
- [Sai99] F. Saitoh. Image contrast enhancement using genetic algorithm. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 899–904 vol.4, 1999.
- [SE98] Y. Shi and R. Eberhart. A modified particle swarm optimizer. In *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, pages 69–73, May 1998.
- [tim] *time(1) - Linux User's Manual*.
- [Voo03] Mark Voorneveld. Characterization of pareto dominance. *Operations Research Letters*, 31(1):7–11, 2003.
- [WBSS04] Zhou Wang, Alan C Bovik, Hamid R Sheikh, and Eero P Simoncelli. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612, 2004.
- [WKC⁺98] K. Wongsritong, K. Kittayarusirawat, F. Cheevasuvit, K. Dejhan, and A. Somboonkaew. Contrast enhancement using multipeak histogram equalization with brightness preserving. In *IEEE. APC-CAS 1998. 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Microelectronics and Integrating Systems. Proceedings (Cat. No.98EX242)*, pages 455–458, Nov 1998.
- [Zui94] Karel Zuiderveld. Contrast limited adaptive histogram equalization. In *Graphics gems IV*, pages 474–485. Academic Press Professional, Inc., 1994.

ANEXO A: Resultados extendidos

En este capítulo se muestra el detalle numérico de las métricas componentes de *CMOPSO* – *CLAHE*. además de valores resultantes de las variables de decisión y tiempos de ejecución para las imágenes de prueba. para los resultados no dominados. Los tiempos de ejecución detallados corresponden a `time()` [tim].

En este Aéndice, se muestra un detalle de las soluciones no dominadas obtenid

A.0 Imagen de prueba calhouse_230.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
0	23	3	57,3732575144	7,9707623	0,574276	0,587276	0,573423
5986	20	3	0	7,9686737	0,575701	0,588698	0,574825
5979	19	3	0	7,9683237	0,575732	0,588719	0,574867
145	17	3	54,6437033238	7,9681134	0,578777	0,59216	0,577904
2493	23	3	26,7020862763	7,968101	0,578789	0,591116	0,577436
264	17	3	42,5351753326	7,9679313	0,578835	0,592214	0,577962
5609	16	3	0	7,9674325	0,581106	0,594012	0,579843
1595	20	3	26,2977861276	7,9667048	0,581119	0,593383	0,579647
9418	22	3	25,9019639599	7,9666138	0,582687	0,594934	0,581212
1918	21	3	24,5856829683	7,9660497	0,583738	0,595889	0,582219
4599	14	3	135,608779585	7,9649405	0,583224	0,596364	0,582346
5611	13	3	0	7,9638715	0,584117	0,597046	0,582787
5721	23	2	0	7,9630127	0,583501	0,597309	0,579096
5737	19	2	0	7,9621367	0,585272	0,59927	0,580874
5454	18	2	0	7,961762	0,58962	0,603406	0,585332
5442	10	3	0	7,9608788	0,589145	0,602398	0,588096
2484	18	2	19,0516006657	7,9606667	0,593198	0,60682	0,589289
5446	14	2	0	7,9602628	0,593104	0,607176	0,588748
5771	9	3	0	7,9580712	0,593755	0,606781	0,592406
5434	9	2	0	7,9574285	0,605344	0,619333	0,60158
5394	9	2	21,2886087681	7,957396	0,606898	0,62081	0,60328
9463	9	2	17,0958484873	7,9547124	0,610174	0,623927	0,606777
5401	8	2	0	7,9511137	0,610432	0,624602	0,607004
5408	7	2	0	7,9480658	0,610593	0,625021	0,607145
5574	2	9	0	7,9430399	0,607409	0,620884	0,610546
5403	6	2	0	7,9429536	0,61935	0,633897	0,616332
5407	5	2	0	7,9418044	0,629153	0,644146	0,627303
8466	7	3	11,6828893986	7,9381695	0,640197	0,652367	0,639632
4183	2	8	18,4779575341	7,9377537	0,644923	0,659314	0,650465
8454	2	8	18,2059843904	7,9377127	0,646001	0,660365	0,651577
252	2	8	17,6230811316	7,9372554	0,648353	0,662732	0,654177
1389	2	8	17,574467687	7,936986	0,648542	0,662942	0,654437
1703	18	2	8,26414873708	7,9366145	0,651784	0,664221	0,652532
1775	2	8	17,0313851773	7,936543	0,650584	0,664992	0,656523
2796	2	8	16,9293045267	7,9364409	0,651072	0,665459	0,657001

1391	2	9	16,3773168064	7,9363842	0,653266	0,666645	0,658871
2749	2	8	15,9730162374	7,935781	0,655772	0,67005	0,661832
3590	2	9	15,4377922176	7,9353571	0,658285	0,671581	0,664214
675	2	6	15,8882552359	7,9353056	0,661122	0,676269	0,666061
8464	2	6	15,832130214	7,9352112	0,661401	0,676557	0,666369
842	2	6	14,9422383356	7,9349566	0,665506	0,680598	0,670711
5415	2	5	0	7,9321666	0,667592	0,680584	0,670037
5400	2	4	0	7,916924	0,669693	0,684568	0,672467
5406	2	3	0	7,892234	0,699073	0,711435	0,697442
5402	2	2	0	7,869554	0,711326	0,725103	0,70818
73	2	3	3,25004004447	7,867032	0,838079	0,847559	0,841779
127	2	3	3,22486879942	7,866257	0,839837	0,849272	0,843581
17	2	3	3,15511690905	7,864795	0,841821	0,851215	0,845605
106	2	3	3,11964708745	7,862013	0,84379	0,853069	0,847555
131	2	3	3,03190160963	7,858155	0,848814	0,857809	0,852466
86	2	3	2,9958936312	7,85414	0,850941	0,859882	0,854562
747	2	3	2,95322617574	7,853881	0,852395	0,861261	0,855985
78	2	3	2,89801274365	7,84991	0,854294	0,863108	0,857889
1430	2	3	2,87573536682	7,848588	0,856234	0,864927	0,859802
42	2	3	2,67749869778	7,848378	0,865466	0,873831	0,869016
122	2	3	2,64758257343	7,840483	0,866309	0,87466	0,869844
57	2	3	2,59888888505	7,839485	0,867943	0,876266	0,871479
138	2	3	2,55647560654	7,831674	0,869766	0,878003	0,873241
68	2	3	2,5461703968	7,829627	0,871235	0,879477	0,874759
55	2	3	2,45672191039	7,82651	0,875467	0,883519	0,878875
411	2	3	2,43629302451	7,821331	0,877399	0,885408	0,880789
23	2	3	2,37596020068	7,820079	0,879363	0,887308	0,882741
84	2	3	2,36363878304	7,811224	0,88181	0,889661	0,88519
19	2	3	2,27289241865	7,801374	0,886151	0,893717	0,889492
5093	2	4	2,13239424035	7,786325	0,889211	0,896873	0,892837
2999	3	3	2,11601292102	7,778555	0,890504	0,898139	0,894021
4985	2	5	2,06667462995	7,773982	0,891276	0,898978	0,894844
4597	3	3	2,05571040309	7,77077	0,893705	0,9013849	0,897278
185	4	3	1,92864636694	7,77002	0,894431	0,9022998	0,898023
1493	2	3	2,09626899083	7,769317	0,895636	0,9028828	0,898839
778	2	3	2,05250835305	7,765968	0,897392	0,9045877	0,9005585
53	2	3	1,99410562164	7,765592	0,9003517	0,9074375	0,903463
58	2	4	1,88120768276	7,759604	0,9036347	0,9105038	0,9068618
3459	2	3	1,94544004573	7,755533	0,9038909	0,9107512	0,9070089
3491	2	3	1,85337567927	7,745447	0,9077827	0,9145273	0,9108265
4018	2	4	1,78431580215	7,739966	0,9097526	0,916429	0,9128539
31	2	3	1,73836884281	7,735026	0,9135785	0,9202107	0,9165312
3433	2	3	1,67507321418	7,727737	0,9182328	0,9245745	0,9211017
3422	2	2	1,65472693388	7,716482	0,9191815	0,9256417	0,9218481
6	2	2	1,58883205633	7,712879	0,9230774	0,9293531	0,9256312
1780	2	3	1,59397677176	7,711806	0,9229507	0,9291523	0,9257424
5436	40	4	0,5	7,611526	0,9203986	0,9284443	0,9262089
5417	45	3	0,134478415565	7,579684	0,9428715	0,9491203	0,9457931
3322	2	2	1,04283655271	7,5682	0,9588871	0,9627122	0,9603932
28	2	3	0,962874904331	7,558804	0,9641033	0,9673708	0,9655153
49	2	3	0,911749739956	7,547683	0,9665194	0,9694702	0,9678522
64	2	3	0,886742609153	7,539718	0,9686061	0,9714407	0,9698108
35	2	3	0,841926825957	7,527259	0,9711307	0,9737374	0,9722536
296	2	2	0,850876965902	7,509026	0,9728273	0,9752587	0,9737289
2816	2	2	0,820494976185	7,495245	0,9738857	0,9763423	0,9747864
48	2	3	0,728620775766	7,494844	0,9783408	0,9803137	0,9791086
12	2	3	0,683879333277	7,483468	0,9798157	0,9816295	0,9805837

4548	2	2	0,680082830177	7,460943	0,980568	0,9823826	0,9812052
8	2	2	0,67282423446	7,444627	0,982659	0,9842605	0,9832342
3731	2	2	0,604550714913	7,430658	0,9848878	0,9863231	0,9853844
3499	2	4	0,582003864168	7,423016	0,9863837	0,9876501	0,9868971
9042	2	5	0,515759554529	7,406934	0,988566	0,9895023	0,9889828
3734	2	2	0,484792166382	7,391111	0,99001457	0,99098984	0,99032467
5364	3	3	0,502825121269	7,386523	0,99094357	0,99165662	0,99139437
8453	2	2	0,446944655324	7,378062	0,99200808	0,992792	0,99225605
720	2	3	0,398756230509	7,371611	0,99349167	0,99411034	0,99378885
29	2	4	0,387786121852	7,368867	0,99418953	0,99471852	0,99443213
197	2	2	0,357960602073	7,341423	0,99448887	0,99505806	0,99470544
899	2	6	0,353321285556	7,33847	0,9953068	0,99572219	0,99559816
279	3	4	0,3207766409	7,320856	0,99528584	0,99573917	0,99562465
1597	2	2	0,344065750078	7,320015	0,99528562	0,99580575	0,99551665
8364	2	2	0,307152212999	7,308112	0,99620204	0,99664532	0,99642902
4794	2	9	0,321349341953	7,305835	0,99663236	0,99699638	0,99691003
6493	4	3	0,288094475476	7,304715	0,99707914	0,99736706	0,99728377
8745	2	5	0,253077576136	7,296765	0,99729597	0,99762793	0,99755041
209	2	3	0,190721779561	7,291971	0,99835406	0,9985865	0,99851765
1404	2	2	0,182240734471	7,265226	0,99844149	0,99869035	0,99862009
3476	2	5	0,180664144796	7,249112	0,99859583	0,99885939	0,99882743
9268	4	3	0,114794118205	7,241878	0,99874541	0,999035696	0,99897683
2072	2	2	0,147263674525	7,236385	0,999322099	0,999476548	0,999445298
299	2	7	0,0924395774583	7,225595	0,999329413	0,999513697	0,999498163
9166	2	3	0,0835964700162	7,223316	0,999551395	0,999724974	0,999708041
1707	3	3	0,0190421177168	7,213582	0,999676711	0,999856865	0,999817768
30	2	2	0,00496512848939	7,211073	0,999795857	0,9999473525	0,9999481857
Tiempos de ejecución: real:70m10.567s.user:207m55.583s.sys:95m37.939s							

Tabla A.1: Resultados no dominados para la imagen de prueba `calhouse_230.jpg`



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.1.1: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.1.

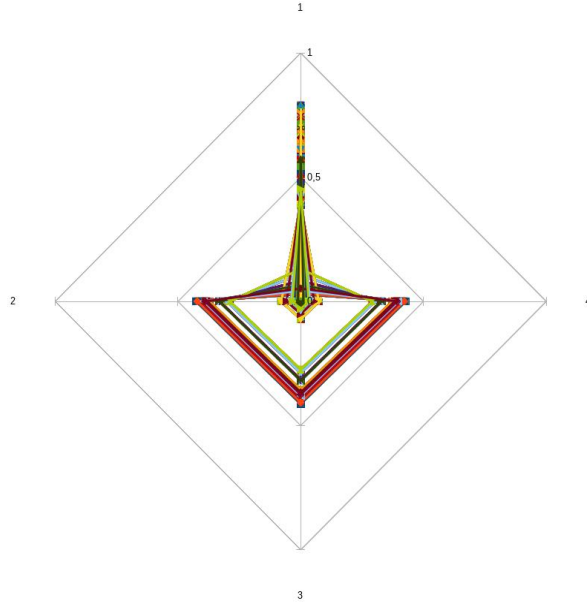


Figura A.2.2: Frente Pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.1.

Tabla A.2: Tabla de correlación entre métricas para la imagen calhouse_230.jpg

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,8613	1		
$SSIM_G$	-0,8563	0.9999	1	
$SSIM_B$	-0,8565	0,9998	0.9999	1

A.2 Imagen de prueba calhouse_231.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
1939	20	3	0	7,99088001	0,732775	0,738008	0,733055
9196	19	3	24,1379046541	7,9907155	0,733325	0,738555	0,733625
4872	18	3	0	7,9899096	0,733672	0,738898	0,734001
1108	11	3	24,5506968888	7,9898934	0,743454	0,748937	0,743951
6462	11	3	23,8007060585	7,9898758	0,743547	0,74903	0,744049
6772	11	3	23,5207501895	7,9898558	0,743556	0,749038	0,744058
7893	11	3	23,4574438289	7,9898524	0,743566	0,749049	0,744069
7590	11	3	23,1341120722	7,9897971	0,743592	0,749074	0,744095
9273	11	3	22,8755566887	7,9897776	0,743609	0,749091	0,744114
6567	11	3	22,5607059227	7,989665	0,743641	0,749122	0,744148
9689	11	3	18,3937736006	7,9896412	0,744032	0,749506	0,744554
283	10	3	80,4722386905	7,9895787	0,744642	0,749944	0,744896
9342	11	3	13,1120140613	7,9894428	0,744806	0,75029	0,745338

502	9	3	174,993030756	7,9893956	0,746753	0,751991	0,747044
9310	9	3	20,4747209268	7,9892273	0,746785	0,752023	0,747079
652	9	3	13,8772745447	7,9891992	0,74747	0,752712	0,747819
4	8	3	0	7,9891148	0,751106	0,756479	0,751488
920	8	3	17,0575615429	7,9887166	0,751394	0,756768	0,751794
7047	8	3	11,9514238354	7,9885793	0,752017	0,757391	0,752457
7450	8	3	11,476032119	7,9885559	0,752128	0,757507	0,752575
7925	8	3	11,4008639471	7,9884	0,752155	0,757535	0,752604
88	8	3	11,0923861257	7,988378	0,752233	0,757619	0,75269
2	6	3	197,579506534	7,9883714	0,757145	0,76274	0,757537
7194	6	3	17,3172150076	7,9881816	0,757163	0,762762	0,757558
8366	6	3	16,6877267735	7,98804	0,757206	0,762806	0,757602
6714	6	3	16,3218509987	7,9879713	0,75725	0,762856	0,757651
8778	6	3	16,0158553851	7,9877419	0,757263	0,76287	0,757663
7486	6	3	15,7527719344	7,9876943	0,757275	0,762882	0,757676
1276	6	3	15,6413312625	7,9875441	0,757292	0,762899	0,757692
7915	6	3	15,6005789082	7,9875145	0,757315	0,762923	0,757717
100	36	2	156,680958258	7,9874144	0,795131	0,799929	0,79637
8108	36	2	44,7759169413	7,9873314	0,795262	0,800061	0,796511
915	38	2	38,9975234891	7,9872947	0,795643	0,80044	0,796923
4579	28	2	0	7,9872627	0,797781	0,802653	0,799087
4496	27	2	0	7,987186	0,799409	0,804221	0,80065
6750	18	2	26,1778177112	7,9871264	0,805975	0,810686	0,807106
637	18	2	21,1312850159	7,9870806	0,806651	0,811356	0,807817
1209	18	2	20,7629016114	7,9870138	0,806674	0,811378	0,807841
9239	18	2	20,2562102633	7,9869766	0,806753	0,811456	0,807923
44	13	2	22,2740165207	7,9869704	0,811981	0,816742	0,813242
6428	13	2	20,8308291345	7,9868336	0,812148	0,816905	0,813415
6469	13	2	20,6504887233	7,9868188	0,812164	0,816921	0,813431
6409	13	2	18,951297672	7,9867229	0,812461	0,817208	0,813735
667	11	2	0	7,9866095	0,814335	0,819124	0,815652
898	12	2	0	7,9863772	0,814675	0,819467	0,815929
7860	10	2	16,7366385638	7,9863172	0,816929	0,821599	0,818146
7983	12	2	12,9008578448	7,9859109	0,81687	0,821588	0,81815
7466	12	2	12,0318491788	7,9858656	0,817165	0,821886	0,818442
6723	10	2	15,5877493293	7,9857564	0,817171	0,821841	0,818394
939	10	2	15,3609723304	7,9857502	0,817178	0,821847	0,818401
532	10	2	14,4863887031	7,9857221	0,817455	0,822119	0,818681
9293	10	2	12,9978746331	7,9856448	0,817993	0,822639	0,819221
6696	8	2	0	7,9855862	0,821286	0,826149	0,822603
7662	8	2	9,58469703532	7,9849677	0,822861	0,827634	0,824158
676	8	2	9,52778546313	7,9848824	0,822887	0,827657	0,824183
8698	8	2	9,2422154867	7,9847331	0,822977	0,827745	0,824272
994	7	2	12,7971595587	7,9847293	0,823558	0,82866	0,825039
6698	8	2	8,22577299741	7,9844723	0,823605	0,828403	0,824916
599	7	2	10,8475919807	7,9840598	0,824129	0,829204	0,82561
132	6	2	0	7,9836984	0,825872	0,831097	0,827418
8192	6	2	13,2838056753	7,9834485	0,825891	0,831117	0,827437
6445	6	2	13,0883737388	7,9831347	0,825946	0,831168	0,827491
1184	6	2	12,9848807323	7,982976	0,825989	0,831211	0,827532
953	6	2	12,8454995802	7,9828753	0,826006	0,831227	0,827548
563	6	2	12,4782248002	7,9823356	0,82611	0,831332	0,827652
9388	6	2	8,86718246044	7,9822817	0,826966	0,832155	0,828492
6420	6	2	7,35656130461	7,9822674	0,827624	0,832839	0,829153
76	7	2	6,04384597885	7,9822598	0,829647	0,834635	0,831091
182	5	2	0	7,9822216	0,831926	0,837043	0,833509
6687	5	2	8,86554925928	7,981977	0,831952	0,837069	0,833535

7094	5	2	8,70532241423	7,9817395	0,831984	0,837102	0,833568
8498	6	2	5,69805334883	7,980979	0,832083	0,837192	0,833579
7888	6	2	5,58012612177	7,9806838	0,83224	0,837349	0,833733
670	5	2	7,29691089466	7,9806333	0,832713	0,837877	0,834314
6422	5	2	7,1186652089	7,9803677	0,832881	0,838054	0,834489
6472	5	2	6,82594374942	7,9801602	0,833	0,838171	0,834605
6986	6	2	5,34487470172	7,9795742	0,833232	0,838304	0,834708
6468	7	2	4,65050914923	7,9794273	0,83549	0,840301	0,83685
6997	7	2	4,53576718708	7,9790592	0,835754	0,84055	0,837111
1382	4	2	0	7,9773769	0,8364	0,840947	0,837632
6597	8	2	4,19913950611	7,9748635	0,838227	0,842637	0,839394
1358	3	2	0	7,973074	0,839795	0,843697	0,840616
6549	5	2	3,72117027649	7,9728212	0,849362	0,853936	0,850743
1194	5	2	3,63826529317	7,9721475	0,850232	0,854757	0,851591
689	5	2	3,61975704383	7,9712591	0,851097	0,855603	0,85246
6669	5	2	3,47127190035	7,9711394	0,85204	0,856527	0,853399
519	4	2	3,64200170752	7,9710107	0,852983	0,856892	0,85395
487	5	2	3,41892577144	7,9708762	0,852645	0,857098	0,853989
6879	4	2	3,62465808732	7,9697714	0,853511	0,857436	0,85449
9340	4	2	3,52640811225	7,9684887	0,853826	0,857749	0,854806
8252	4	2	3,52359497099	7,9680529	0,854321	0,858236	0,855297
951	6	2	3,20582468185	7,9650922	0,855448	0,859785	0,856776
6405	6	2	3,12571114902	7,9636035	0,857318	0,861598	0,858628
1295	4	2	3,09898598088	7,9613004	0,860914	0,864649	0,861927
1303	2	2	0	7,9568996	0,86135	0,863808	0,861352
6415	7	2	2,82377138755	7,9540286	0,864243	0,868191	0,865438
7882	3	2	2,99311131308	7,9536858	0,866459	0,869606	0,86709
991	3	2	2,86069123429	7,9525919	0,86871	0,871816	0,869357
926	2	2	3,74331947705	7,94871	0,868833	0,871197	0,868802
6599	64	2	2,77893133848	7,77534	0,867522	0,873474	0,869778
6598	79	2	1,76394421904	7,747998	0,88808	0,894677	0,891882
9921	4	18	1,33180457175	7,705573	0,9222513	0,9221849	0,9211138
9919	2	31	1,19091289793	7,685894	0,9342575	0,9343888	0,9338652
9922	2	42	1,09009310629	7,675417	0,9427372	0,9423498	0,9416836
9918	2	81	1,2109197769	7,615729	0,9689216	0,9685252	0,9680984
6416	5	3	0,665855107707	7,61054	0,9822183	0,9827442	0,9823582
959	15	2	0,570251203891	7,597243	0,9830756	0,9841368	0,9838131
6454	17	4	0,597411484865	7,587092	0,9834696	0,9840021	0,9836963
6401	23	2	0,743294453442	7,58562	0,9842204	0,985316	0,9848449
6406	16	2	0,771844697533	7,584492	0,9866152	0,9872657	0,987013
774	8	2	0,559960925276	7,582944	0,9876966	0,9882296	0,9879937
8437	4	2	0,544967487518	7,57487	0,9882842	0,9887695	0,988449
967	2	4	0,519898093151	7,56378	0,9883991	0,9888282	0,9884876
6477	2	2	0,49244407973	7,556829	0,9895893	0,99013827	0,9897143
6437	9	3	0,415498873094	7,532901	0,99133481	0,99184197	0,99165237
6438	2	10	0,401808451681	7,521432	0,99307987	0,99309809	0,99305889
6430	18	2	0,117481935337	7,514516	0,99444977	0,99479178	0,99468665
6436	12	3	0,264652766996	7,512872	0,99521133	0,99547246	0,99536718
95	3	2	0,332483126302	7,511238	0,99598402	0,99614711	0,99602878
1265	2	3	0,336717360335	7,508442	0,99609629	0,99626839	0,99612869
106	2	2	0,317834914588	7,506934	0,99622194	0,99639486	0,99627087
239	11	2	0,329291346786	7,505123	0,99653075	0,99665424	0,99659681
9736	2	2	0,277591516826	7,497007	0,99663448	0,99677444	0,99666899
6948	2	8	0,246701518147	7,488374	0,99752146	0,99755241	0,99751631
596	6	2	0,228145593487	7,486246	0,99799306	0,99812481	0,99809121
7293	2	5	0,228735652218	7,48023	0,99816545	0,9982233	0,9981924
572	2	2	0,214298641675	7,475863	0,99832633	0,99839941	0,99835664

2929	3	3	0,195882863766	7,471233	0,99843259	0,99852404	0,99850025
131	2	2	0,190379492305	7,47078	0,99864939	0,99872003	0,99869231
1076	4	2	0,163532753377	7,466865	0,99868197	0,99876341	0,99874294
77	2	3	0,16008789639	7,465481	0,99885363	0,99890933	0,99888968
5804	3	2	0,157006953774	7,462082	0,99885706	0,99892359	0,99890531
817	5	2	0,165840962712	7,458011	0,99884023	0,9989489	0,99892176
6893	7	2	0,0055338673976	7,456069	0,999136616	0,999204675	0,999187847
559	6	2	0,0903361212615	7,449473	0,999115985	0,999207177	0,999184374
985	7	3	0,221238316554	7,445449	0,999138594	0,999230103	0,999193055
671	3	5	0,0666271674467	7,44285	0,999546736	0,999571301	0,999567275
2390	5	3	0,12830529638	7,437533	0,999664104	0,999692989	0,999687882
528	3	2	0,0643555864377	7,435322	0,999732378	0,999760464	0,999754386
1314	2	3	0,0577348012518	7,434931	0,999810714	0,999834627	0,999832198
1364	3	3	0,0523409614263	7,426396	0,999832627	0,999863067	0,999855666
927	2	2	0,0723894111846	7,423254	0,999869109	0,999899871	0,999892322
8287	4	2	0,089231031913	7,4227	0,999868593	0,9999002154	0,999892503
Tiempos de ejecución: real:70m26.492s. user:209m3.921s. sys:95m37.357s							

Tabla A.3: Resultados no dominados para la imagen de prueba calhouse-231.jpg



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.3.3: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.3.

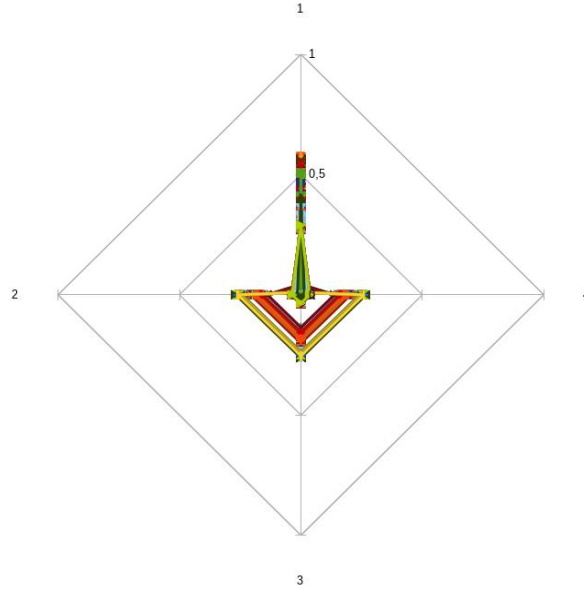


Figura A.4.4: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.3.

Tabla A.4: Tabla de correlación entre métricas para la imagen calhouse_231.jpg

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,9321	1		
$SSIM_G$	-0,9304	0,9999	1	
$SSIM_B$	-0,9305	0,9998	0,9999	1

A.4 Imagen de prueba calhouse_232.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{L}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
4439	4	15	78,4270926886	7,9760699	0,573699	0,582487	0,578536
4470	4	16	72,5920143847	7,9756665	0,575382	0,584122	0,580246
164	4	16	72,0775299795	7,9756069	0,575448	0,584191	0,580314
2405	4	14	77,4782746434	7,9736018	0,575495	0,584252	0,580274
1100	3	11	244,007931411	7,9734898	0,595851	0,608976	0,603105
2270	3	11	86,7312284074	7,9733248	0,596261	0,60935	0,603498
1898	4	10	70,6317791725	7,9728627	0,596436	0,6053	0,601725
4190	3	11	74,3912811525	7,9728551	0,59782	0,610786	0,605009
1101	2	13	256	7,9728074	0,587683	0,612941	0,60226
2600	2	13	88,2928742644	7,9727597	0,588174	0,61338	0,602763
4201	4	10	64,0825435898	7,9726558	0,598555	0,607377	0,603853
1825	4	10	59,7079346258	7,9724317	0,600042	0,608831	0,60533
1316	2	13	78,455271254	7,9724097	0,591579	0,616428	0,606303
1301	3	10	256	7,9724021	0,602252	0,615114	0,609489

1219	10	3	49,4496411532	7,9723754	0,64666	0,65819	0,654074
2959	13	3	37,3118151109	7,9723587	0,652986	0,664565	0,660809
2	16	2	143,02403247	7,9723544	0,66861	0,686908	0,679731
4271	16	2	85,3777368575	7,9718289	0,669861	0,6879	0,68083
2494	16	2	81,2772887424	7,9711285	0,670577	0,688448	0,681447
2489	14	2	85,2259142437	7,9703541	0,670229	0,688723	0,681422
4468	14	2	83,9781040775	7,9701228	0,670464	0,688899	0,681619
2741	14	2	83,936627933	7,9700274	0,670477	0,688914	0,681636
555	16	2	66,1485498097	7,9699588	0,673726	0,690957	0,684238
2238	16	2	61,0910981362	7,9699154	0,676393	0,693174	0,686708
1131	16	2	60,6920640601	7,9698243	0,676572	0,693318	0,686868
1110	4	3	30,0658748364	7,9698048	0,704462	0,714655	0,710672
827	4	3	29,9459647835	7,9697938	0,704498	0,714691	0,710708
932	4	3	29,0029300324	7,9697714	0,705411	0,7156	0,71162
1757	4	3	28,3242663973	7,9692369	0,706105	0,71629	0,712306
3057	4	3	26,5844871289	7,9689045	0,707707	0,717883	0,71389
594	4	3	26,5159076392	7,9688897	0,707708	0,717883	0,71389
393	4	3	26,4036875756	7,9688759	0,707725	0,7179	0,713909
974	4	3	25,9914071651	7,9684501	0,708003	0,718181	0,714181
1981	4	3	25,9041727657	7,9684391	0,7082	0,718385	0,714374
44	4	3	25,7706618226	7,9680834	0,708364	0,718553	0,714545
748	4	3	25,2770909541	7,9679756	0,70934	0,719501	0,715503
119	4	3	25,0919325411	7,9677601	0,709489	0,719649	0,715649
1899	4	3	25,0414732775	7,9674926	0,709562	0,719722	0,715724
1450	4	3	24,4251988789	7,9674845	0,710599	0,720739	0,716759
2517	4	3	24,2735967739	7,9674168	0,710784	0,720919	0,716942
1216	4	3	23,8316088496	7,9669728	0,711465	0,721583	0,717637
2276	4	3	22,7681535199	7,9667101	0,712987	0,723066	0,719181
599	4	3	21,2200961392	7,9665332	0,715939	0,726011	0,722094
1256	4	3	21,0675045261	7,9663887	0,716061	0,726131	0,722215
833	4	3	20,9543679546	7,9662991	0,716196	0,726261	0,722347
2381	4	3	20,8205960561	7,9660506	0,71664	0,726682	0,72277
3982	4	3	20,6281488121	7,9654088	0,71667	0,726729	0,722816
311	4	3	20,5155984247	7,9649954	0,717186	0,727233	0,72331
277	4	3	20,3601830832	7,9648848	0,717356	0,727398	0,72348
1373	4	3	20,2942799445	7,964828	0,717699	0,727745	0,723818
4932	4	3	20,2155396804	7,9644976	0,717977	0,728022	0,724094
1395	4	3	19,6456886955	7,9644556	0,719584	0,72959	0,725664
29	4	3	19,0714073075	7,9643097	0,720997	0,730987	0,727055
177	4	3	18,6480523247	7,964191	0,722399	0,732352	0,728419
985	4	3	18,5959465748	7,9641218	0,722605	0,732555	0,728623
1077	4	3	18,3899207259	7,963932	0,723288	0,733242	0,729307
4878	4	3	18,2953060626	7,9636941	0,723363	0,733313	0,729381
274	4	3	18,450508372	7,9633985	0,723465	0,733393	0,729456
445	4	3	17,7954490177	7,9628911	0,724788	0,734704	0,730768
1550	4	3	17,7647370763	7,962851	0,724949	0,73486	0,73092
1463	4	3	17,3033146927	7,9625778	0,726064	0,735964	0,732017
1119	4	3	17,2617311433	7,9625692	0,7261	0,735996	0,732052
903	4	3	17,3499284158	7,9624519	0,726329	0,736204	0,732251
588	4	3	17,0654197433	7,962389	0,726597	0,736488	0,732541
2395	4	2	60,1127458182	7,9619937	0,732584	0,747003	0,740345
1775	4	2	57,9279845706	7,9619207	0,733266	0,74768	0,741042
2142	4	2	57,541209294	7,961585	0,733434	0,747843	0,741207
1394	4	2	52,4449045083	7,9615726	0,737235	0,751133	0,744784
520	4	2	52,3178755758	7,961534	0,73726	0,751156	0,744808
3562	4	2	51,3685190913	7,9615064	0,737955	0,751815	0,745485
3236	4	2	51,3583906064	7,9614925	0,737959	0,751818	0,745489

3025	4	2	50,9944647747	7,9609938	0,738251	0,752104	0,745783
1174	4	2	50,7523692122	7,960968	0,7383	0,752153	0,745832
495	4	2	50,65346196	7,9605989	0,738475	0,752329	0,746014
855	4	2	48,6098188989	7,9605174	0,739625	0,753388	0,747163
2338	4	2	48,271505126	7,9604855	0,740125	0,753817	0,747632
4142	4	2	46,8795449966	7,9603806	0,741829	0,755255	0,74921
1195	4	2	46,2450414954	7,9596243	0,742245	0,755615	0,749587
2491	4	2	44,1865753766	7,959445	0,743779	0,757092	0,751088
1196	4	2	41,3776883814	7,9592605	0,746449	0,759541	0,753673
2414	4	2	39,7076424965	7,9592552	0,748367	0,761242	0,755466
2797	4	2	39,3778888271	7,9590836	0,748446	0,761309	0,755537
82	4	2	38,9251348411	7,9590049	0,748828	0,761674	0,755904
3485	4	2	38,8538812491	7,9583807	0,749044	0,761881	0,75612
2897	4	2	37,4805246264	7,958035	0,749888	0,762715	0,756959
4299	4	2	34,309392593	7,9576054	0,75312	0,765614	0,760022
4481	4	2	32,9238278682	7,9573841	0,75447	0,766847	0,761296
383	4	2	32,8750936053	7,9573226	0,754506	0,766881	0,76133
1162	4	2	30,2713527358	7,9567327	0,756405	0,768726	0,763189
4282	4	2	30,1464978932	7,9566579	0,756691	0,76902	0,763467
2866	4	2	29,9667681877	7,9566264	0,756691	0,76902	0,763468
96	4	2	29,9127342514	7,9566059	0,756701	0,769031	0,763479
1560	4	2	29,6646307383	7,9564009	0,756966	0,7693	0,763746
2954	4	2	29,6314537698	7,9563642	0,756971	0,769304	0,763751
4452	4	2	29,4103966027	7,9562473	0,757546	0,769839	0,764302
421	4	2	29,0881603206	7,9558206	0,757906	0,770142	0,764633
1663	4	2	28,7747247139	7,9557662	0,758239	0,770425	0,764943
1887	4	2	28,580553835	7,9557223	0,758412	0,770569	0,765107
210	4	2	28,5329749692	7,954669	0,758838	0,770975	0,765519
838	4	2	27,4988472336	7,9544969	0,760176	0,772166	0,766764
4714	4	2	27,4785344632	7,9544868	0,760194	0,772181	0,76678
2660	4	2	27,3170353403	7,954473	0,760273	0,772251	0,766853
185	4	2	26,6478162461	7,9540997	0,760838	0,772781	0,76738
2594	4	2	24,9847082999	7,9536023	0,76255	0,774449	0,769037
1161	4	2	23,4282150992	7,9532022	0,763503	0,775387	0,769967
2654	4	2	22,5141065338	7,9530411	0,764897	0,776663	0,771272
3282	4	2	22,0186526722	7,9526672	0,765831	0,777503	0,772157
2171	4	2	21,5946343573	7,9525275	0,766616	0,778203	0,772896
269	4	2	21,4781375925	7,9522262	0,766757	0,778328	0,773018
2330	4	2	21,3027930116	7,9521885	0,767137	0,778676	0,773366
4257	4	2	21,2442012329	7,9519792	0,76732	0,778855	0,773551
79	4	2	21,179990594	7,9519224	0,767348	0,778879	0,773576
600	4	2	21,126433092	7,9517479	0,767373	0,778898	0,773597
990	4	2	21,0522714194	7,9513106	0,767499	0,779027	0,773714
1485	4	2	20,0397291477	7,9511514	0,768933	0,780413	0,775089
451	4	2	19,7293634451	7,9511476	0,769175	0,780654	0,775331
2233	4	2	19,6036137848	7,9507022	0,769383	0,780863	0,775537
1296	4	2	19,2031533674	7,950458	0,769701	0,781185	0,775856
2901	4	2	19,0546255242	7,9504185	0,770031	0,781488	0,776163
4260	3	2	23,728930336	7,9497256	0,77012	0,782933	0,776717
4241	3	2	20,5007986332	7,9496651	0,778495	0,790639	0,784831
387	3	2	20,1466860699	7,9490528	0,778969	0,791126	0,785315
2289	3	2	19,9161953615	7,9486051	0,779771	0,791905	0,786083
1099	3	2	19,8576524517	7,9483657	0,779825	0,791959	0,786136
1452	3	2	19,4234349277	7,9482541	0,779923	0,792052	0,78624
2176	3	2	19,3980216161	7,9481521	0,779926	0,792052	0,786244
229	3	2	19,3685802685	7,9480033	0,779929	0,792053	0,786248
4499	3	2	19,3230792252	7,9477172	0,780201	0,792334	0,78652

2482	3	2	19,1170598809	7,94695	0,780653	0,792781	0,786994
3272	3	2	19,0692370836	7,9469357	0,780703	0,792822	0,787046
315	3	2	18,6876140507	7,9464598	0,782228	0,794269	0,788581
564	3	2	18,5759299284	7,9462733	0,782679	0,794687	0,789038
2291	3	2	18,2971404154	7,9457326	0,783851	0,795699	0,79016
3884	3	2	17,984856027	7,9453983	0,784943	0,796697	0,791211
967	3	2	17,1672655403	7,9452505	0,787431	0,79902	0,793609
683	3	2	16,9076373197	7,9446993	0,787724	0,799303	0,793892
3892	3	2	16,8807488949	7,9443231	0,787755	0,799333	0,793925
586	3	2	16,22868622	7,9442692	0,789711	0,801275	0,795855
633	3	2	16,1901962933	7,9440274	0,789869	0,801434	0,796008
2294	3	2	16,0599784292	7,9413004	0,790554	0,802103	0,796679
2251	3	2	14,8823889138	7,941133	0,794573	0,805869	0,800662
157	3	2	14,3186098887	7,9401798	0,796926	0,808057	0,802916
1712	3	2	14,2097260526	7,9390349	0,797322	0,808434	0,803304
4185	3	2	14,2549470375	7,9388332	0,797316	0,808435	0,803297
4629	3	2	14,1616920434	7,938767	0,797482	0,808588	0,803458
2295	3	2	14,1057650681	7,9383221	0,797839	0,808938	0,803812
97	3	2	13,5275034735	7,938282	0,799893	0,810917	0,805805
1873	3	2	13,3723960807	7,9378967	0,800403	0,811437	0,806319
1722	3	2	13,3458008628	7,9375167	0,800477	0,811515	0,806395
1031	3	2	13,2974730734	7,9372468	0,800567	0,811605	0,806484
1214	3	2	13,2407029042	7,9367585	0,8008	0,81184	0,806709
2236	3	2	13,177931907	7,9365602	0,800972	0,812021	0,80689
2149	3	2	13,1565218124	7,9365392	0,801048	0,8121	0,806967
4196	3	2	13,0004016053	7,9358869	0,801448	0,812504	0,807366
322	3	2	12,9473761386	7,9354625	0,801548	0,812609	0,807472
4486	3	2	12,8787233961	7,9353352	0,801617	0,812683	0,807547
484	3	2	12,8629537904	7,9352756	0,801682	0,812748	0,807612
723	3	2	12,8230729705	7,9345307	0,802149	0,813218	0,808069
878	3	2	12,6821845817	7,9325829	0,802459	0,813532	0,80838
284	3	2	12,5721140005	7,9324875	0,802465	0,813536	0,808385
1117	3	2	12,4993592832	7,9321184	0,802921	0,813993	0,80886
2781	3	2	12,4813904541	7,9320998	0,803014	0,814074	0,808956
1488	3	2	12,2536059097	7,9310694	0,804238	0,81526	0,81019
1620	3	2	12,1764745684	7,93049	0,804732	0,815708	0,810665
456	3	2	12,1149698772	7,9296064	0,804972	0,815926	0,810898
352	3	2	12,0272815372	7,9290109	0,805674	0,816572	0,81158
2536	3	2	11,9694787188	7,9288082	0,805915	0,816797	0,811826
1354	3	2	11,9375937601	7,9279122	0,806034	0,816895	0,811927
3565	3	2	11,662985294	7,927906	0,807364	0,818126	0,813234
581	3	2	11,6539902872	7,9277544	0,807579	0,818328	0,813439
4355	3	2	11,0880203089	7,9270077	0,809465	0,820156	0,815268
685	3	2	11,0394268319	7,9267631	0,809659	0,820326	0,815434
399	3	2	10,9175627875	7,9266152	0,810156	0,820835	0,815928
4787	3	2	10,8467828449	7,9255562	0,810671	0,821349	0,816439
2162	3	2	10,8224886575	7,9253631	0,810698	0,821377	0,816467
3793	3	2	10,736411256	7,9247718	0,810797	0,821485	0,816575
3995	3	2	10,7077892348	7,9246306	0,81106	0,821757	0,816848
211	3	2	10,6605602655	7,9243956	0,811089	0,821788	0,816879
589	3	2	10,5658048307	7,9222364	0,811488	0,822199	0,817276
717	3	2	10,5289368315	7,9215007	0,811608	0,822322	0,817401
1599	3	2	10,1055391779	7,9210672	0,813211	0,823915	0,818957
3289	3	2	9,75735164329	7,9190617	0,814898	0,825561	0,820627
744	3	2	9,65157236597	7,9189029	0,815267	0,825934	0,821018
2903	3	2	9,58663321531	7,9183917	0,815656	0,826302	0,821388
2618	3	2	9,40790651266	7,9172559	0,816847	0,827432	0,822534

2224	3	2	9,34162060182	7,9171014	0,81729	0,827861	0,822984
1104	3	2	9,26571815592	7,9169598	0,817677	0,828222	0,823376
713	3	2	9,17809972276	7,9133229	0,81794	0,828467	0,82362
93	3	2	9,03660402367	7,912931	0,818783	0,829302	0,824496
2048	3	2	8,90321218729	7,9127054	0,819477	0,829937	0,825155
1522	3	2	8,8554091586	7,9125724	0,819959	0,830417	0,82564
2748	3	2	8,83742581515	7,9114251	0,820131	0,830582	0,82581
1215	3	2	8,65324201979	7,9107909	0,820508	0,830946	0,82619
212	3	2	8,39427207219	7,9107151	0,821876	0,832289	0,827498
179	3	2	8,32822932357	7,910687	0,822004	0,832415	0,827622
4277	3	2	8,18238717692	7,9103475	0,822312	0,832764	0,827955
4478	3	2	8,14570926062	7,9095726	0,822652	0,83309	0,828277
2246	3	2	8,0039031982	7,9094887	0,82359	0,83403	0,829215
3038	3	2	7,93821312076	7,9091806	0,823646	0,834083	0,829275
3144	3	2	7,93432742092	7,9086919	0,823986	0,834426	0,829625
1088	2	2	11,118459589	7,9048548	0,822182	0,834624	0,828344
1582	2	2	10,5572677346	7,9018097	0,823652	0,835993	0,829744
561	3	2	7,16200732232	7,9008751	0,827897	0,838258	0,833501
1798	2	2	9,80363668798	7,899547	0,826099	0,838391	0,832128
1900	3	2	6,96697628909	7,899144	0,828745	0,839077	0,834326
225	2	2	9,17864368388	7,899035	0,829747	0,841725	0,835711
137	3	2	6,85652375805	7,898571	0,829848	0,840157	0,835429
1322	3	2	6,81971739931	7,89828	0,82995	0,84025	0,835532
2556	2	2	9,12468579133	7,89796	0,829957	0,841899	0,835915
3419	3	2	6,79723324398	7,897935	0,830153	0,840448	0,835745
424	2	2	9,09133492108	7,897395	0,830538	0,842436	0,836451
569	3	2	6,72653643099	7,8964	0,830584	0,84087	0,83619
2697	2	2	8,86420864144	7,896005	0,831711	0,843495	0,837554
2850	3	2	6,53689427944	7,894887	0,831959	0,842174	0,837534
796	3	2	6,45627091449	7,893388	0,832401	0,842587	0,837967
4994	2	2	8,63436354056	7,890989	0,832914	0,844684	0,838741
2593	2	2	8,58375405279	7,890514	0,833239	0,844969	0,839031
176	3	2	5,81276920023	7,889036	0,836127	0,846146	0,841641
1294	2	2	8,23346193729	7,885837	0,834485	0,846232	0,840292
1681	2	2	7,87574625607	7,884892	0,836923	0,848592	0,842721
2776	2	2	7,55431625711	7,884334	0,838476	0,850081	0,844251
1689	2	2	7,2884953199	7,880823	0,840031	0,851555	0,845797
4030	2	2	7,23312471907	7,878577	0,84054	0,852024	0,846287
1364	2	2	7,20829839065	7,87809	0,840592	0,852072	0,846342
11	2	2	7,03778213411	7,877783	0,841868	0,853273	0,847606
3515	2	2	7,00184734926	7,876818	0,84191	0,853306	0,847644
981	2	2	6,61027573544	7,876606	0,845129	0,856342	0,850785
0	2	2	6,45714299668	7,876292	0,84614	0,8573	0,851756
292	2	2	6,44449419649	7,876102	0,846296	0,857451	0,851908
2079	2	2	6,41806237247	7,87519	0,846389	0,857546	0,851998
1085	2	2	6,36026679129	7,875175	0,846551	0,857704	0,852157
2267	2	2	6,26428335548	7,872824	0,846541	0,857734	0,852188
3297	2	2	6,20240343781	7,870491	0,847014	0,858216	0,852678
1670	2	2	6,16246234359	7,868432	0,847333	0,858513	0,853007
804	2	2	6,12940296596	7,86784	0,847491	0,858662	0,85317
1039	2	2	6,08536048773	7,866211	0,848276	0,859427	0,853949
348	2	2	5,99686964358	7,865646	0,849106	0,860167	0,854737
291	2	2	5,98258270485	7,863833	0,849235	0,860279	0,854864
2035	2	2	5,96333206137	7,863075	0,849456	0,860495	0,855092
2841	2	2	5,91512386956	7,862658	0,849946	0,860967	0,855563
881	2	2	5,86824563188	7,858757	0,850069	0,861061	0,855672
3939	2	2	5,62724986394	7,855077	0,851525	0,862449	0,857077

4496	3	2	4,10375071996	7,852944	0,852644	0,862094	0,858017
783	3	2	4,04113122568	7,852027	0,853559	0,863044	0,858962
2684	2	2	5,42821846853	7,851548	0,853105	0,863998	0,858664
1492	2	2	5,200157208	7,848011	0,854095	0,864946	0,859671
2378	2	2	5,17427732039	7,847453	0,854363	0,865219	0,859946
3569	2	2	5,14954085394	7,845583	0,854575	0,865435	0,860167
3996	2	2	4,66933186071	7,844252	0,858316	0,868986	0,863855
1199	2	2	4,59798426846	7,843584	0,858734	0,869417	0,864287
2277	2	2	4,40918080215	7,840295	0,859495	0,870195	0,865055
65	2	2	4,27374588876	7,836115	0,861037	0,871699	0,866569
509	2	2	4,23604362212	7,835447	0,861216	0,87187	0,866754
372	2	2	4,2186834237	7,832528	0,861679	0,87233	0,867237
1568	3	2	3,33041479972	7,824639	0,866097	0,875239	0,871448
514	3	2	3,30073368338	7,824481	0,86684	0,876017	0,872235
121	2	2	3,89141020413	7,82401	0,866722	0,876974	0,872142
266	2	2	3,85461460537	7,823204	0,86686	0,877115	0,872287
1275	2	2	3,78146156627	7,819613	0,867554	0,877834	0,87299
671	2	2	3,52769433224	7,819394	0,870908	0,881146	0,87633
1585	3	3	2,46612776704	7,810868	0,871515	0,878003	0,875294
2221	2	2	3,52313864854	7,810023	0,871427	0,881631	0,876832
3809	3	2	3,1014223535	7,809397	0,871783	0,880742	0,877134
108	2	2	3,46900052305	7,808604	0,872481	0,882632	0,877884
289	2	2	3,44902733724	7,808034	0,87297	0,883035	0,878329
1421	2	2	3,37740684241	7,804186	0,874032	0,88402	0,879353
4575	2	2	3,26993347278	7,803964	0,875974	0,885968	0,881324
1549	2	2	3,22285395087	7,80274	0,876029	0,886024	0,88138
1715	2	2	3,11491965709	7,800256	0,878225	0,888115	0,88354
1233	2	2	2,98127348145	7,799719	0,881178	0,891013	0,886494
4698	3	2	2,64637550996	7,792361	0,882251	0,891079	0,887551
3210	2	2	2,87200321617	7,792256	0,8835	0,893265	0,888863
392	3	3	2,1593954493	7,788847	0,883724	0,89001	0,887398
150	2	2	2,80512509882	7,788096	0,885241	0,894903	0,890582
2548	3	2	2,56363912216	7,78454	0,885351	0,894087	0,890603
3925	3	2	2,53443555102	7,780847	0,886816	0,895532	0,892078
184	2	2	2,7091686463	7,780786	0,888468	0,897961	0,893751
4450	3	3	2,0260069093	7,774261	0,890803	0,896799	0,894327
3599	3	2	2,51621571681	7,774045	0,888436	0,897159	0,89376
611	2	2	2,63691288789	7,773755	0,890263	0,899798	0,89566
182	2	2	2,60707212716	7,77195	0,890789	0,9003039	0,896195
67	2	2	2,58985162609	7,768807	0,891291	0,9007607	0,89668
1054	3	3	1,98347551631	7,767499	0,893831	0,899813	0,897369
973	3	2	2,37836014153	7,767308	0,891564	0,9003806	0,89706
3094	2	2	2,54392053241	7,76641	0,891948	0,9013894	0,897309
491	2	2	2,48690823293	7,766307	0,893669	0,9031156	0,899051
2586	2	2	2,4591872837	7,764755	0,894155	0,9036266	0,899541
227	3	2	2,27614202788	7,760912	0,894641	0,9034691	0,9000736
467	3	3	1,92046249583	7,758517	0,897252	0,9032309	0,9008575
380	3	2	2,25374661724	7,755128	0,895907	0,9047471	0,9013047
2264	2	2	2,36729431935	7,747819	0,895193	0,9047687	0,9005961
4993	2	2	2,34747083956	7,744897	0,895505	0,905094	0,900915
296	6	3	1,82403881316	7,736247	0,898695	0,9037979	0,9020524
2565	3	2	2,0779545828	7,736154	0,9018221	0,9105559	0,9071888
2253	2	2	2,15186304905	7,735455	0,9012288	0,9107749	0,9066956
251	2	2	2,18542471682	7,734629	0,9013087	0,9108043	0,9067825
766	2	2	2,12822658506	7,732189	0,9018466	0,9113349	0,9072436
1748	4	3	1,7367480354	7,731308	0,9045729	0,9094245	0,9075497
2638	3	2	2,0297388132	7,7308	0,9050346	0,913694	0,9104569

1204	3	2	1,96242169082	7,730711	0,9057917	0,9145192	0,9112382
391	2	2	2,01775656225	7,717914	0,9068022	0,9160202	0,9121975
659	2	3	1,76434227453	7,716703	0,9093066	0,9158872	0,9133077
2996	2	2	1,98904469083	7,713391	0,9072036	0,9165388	0,9126685
1833	4	3	1,65102666226	7,713347	0,9124801	0,9174341	0,9155726
1224	2	2	1,9189051743	7,712179	0,9094661	0,9186975	0,914804
1584	2	3	1,72769060759	7,711269	0,9113042	0,9177241	0,9153194
587	2	2	1,90790088167	7,710059	0,9109266	0,9200299	0,9162852
1358	2	3	1,7141988629	7,705164	0,9129866	0,9193996	0,9169986
1636	2	2	1,87565982324	7,70424	0,9116416	0,9208753	0,9171024
761	3	2	1,78478502001	7,701798	0,9132633	0,9218917	0,9186282
601	2	3	1,67948373366	7,699415	0,9158544	0,9222389	0,9198205
2216	2	2	1,82594175554	7,699332	0,9129781	0,9222809	0,9184991
2908	4	2	1,68517520206	7,694745	0,9157393	0,9233136	0,920372
105	3	2	1,66895723969	7,691333	0,9172796	0,9258471	0,9224642
123	3	2	1,62692283564	7,684736	0,9196601	0,9280646	0,9248492
610	2	3	1,5478921085	7,682961	0,9224637	0,928472	0,9262926
987	3	2	1,6138060566	7,680905	0,9214653	0,9297786	0,9266352
486	4	3	1,42932663406	7,680026	0,9241977	0,928483	0,9268706
162	2	3	1,51178254662	7,677899	0,923674	0,929774	0,9275558
2235	5	3	1,48623804775	7,668275	0,9248075	0,9289769	0,9274336
2231	2	2	1,6155977465	7,661028	0,9210796	0,9300563	0,9265051
151	4	2	1,36792445669	7,658125	0,9298869	0,9368278	0,934154
1677	28	2	1,62345771515	7,652921	0,9305238	0,9359781	0,9346854
1952	2	3	1,37831093586	7,645973	0,9339558	0,9395463	0,9375901
826	24	3	1,36782845692	7,643331	0,9363353	0,9399776	0,9390647
3431	2	3	1,33006336751	7,641091	0,9352554	0,9407785	0,9387653
390	63	2	1,29515417793	7,640953	0,936947	0,9447372	0,943252
2626	2	3	1,30584449939	7,634447	0,9391747	0,9442669	0,942474
1487	5	3	1,28379508869	7,632545	0,9398662	0,9435471	0,9422309
4186	2	5	1,17178419063	7,632155	0,9398004	0,9437043	0,9424681
1740	2	3	1,26066191292	7,627352	0,9404293	0,9455333	0,9437446
1315	2	3	1,23064673521	7,625212	0,943473	0,9484022	0,9466224
3924	4	2	1,17715560975	7,605255	0,9438175	0,9496247	0,9474518
2693	2	5	1,03991499536	7,601722	0,9488042	0,9521189	0,9509731
999	15	2	1,12306985068	7,597966	0,9500374	0,9549133	0,9537798
1857	5	3	1,10908765939	7,597852	0,9504105	0,9537749	0,9526854
178	14	3	1,14897471822	7,588725	0,9514876	0,9543525	0,9537112
779	2	3	1,07605644275	7,578786	0,9534075	0,9576998	0,9562345
2194	9	3	1,01230355293	7,575317	0,9543968	0,9573147	0,956653
2480	2	4	1,0158731144	7,574753	0,9543677	0,9573389	0,9563821
781	8	2	1,08061482733	7,573838	0,9549296	0,9591171	0,9578734
2367	2	6	1,01148203304	7,573665	0,9553063	0,9582471	0,9573845
3160	13	3	1,22312788045	7,564421	0,9569471	0,9600127	0,9593334
832	2	6	0,893265317115	7,563849	0,9596051	0,9622182	0,9614317
3198	19	2	1,06021673939	7,559804	0,9587563	0,9624344	0,9615782
1474	2	7	0,927272943079	7,555268	0,9609841	0,9633622	0,9627085
1260	2	3	0,9463698642	7,549228	0,96248	0,9659359	0,9647355
2718	3	5	0,927516794867	7,547083	0,9637004	0,9651804	0,964727
319	2	3	0,909101185741	7,546496	0,9641453	0,9675902	0,9664819
1835	2	5	0,82597845086	7,53892	0,9661082	0,968124	0,967455
241	5	2	0,8742202515	7,53206	0,9645859	0,9683385	0,9671076
942	2	3	0,884145726698	7,525745	0,9671689	0,9702486	0,9692489
1643	28	2	0,742494372401	7,519525	0,9662912	0,9698428	0,9692578
2737	2	9	0,82082440709	7,513862	0,9687534	0,9705132	0,9699899
3470	2	4	0,793672374837	7,510085	0,9721252	0,9740676	0,9734077
1848	2	11	0,776706656495	7,508113	0,9722033	0,9738747	0,973521

1555	2	7	0,742856662232	7,505597	0,9742595	0,9759805	0,9755319
1932	19	2	0,945503895135	7,502	0,9719967	0,9760088	0,9753317
504	12	3	0,825620034547	7,500694	0,9749259	0,9766064	0,9762513
1729	2	4	0,744767272167	7,490773	0,976	0,9775838	0,9770819
1823	13	2	0,801313485155	7,47657	0,9757316	0,9782332	0,9777215
1761	5	5	0,723499926286	7,470899	0,9784352	0,9793396	0,9791142
1804	2	4	0,665082506616	7,468584	0,9790136	0,9805701	0,9800957
1173	21	2	0,753357442605	7,467655	0,9781106	0,9812394	0,9807783
3237	14	3	0,719635115196	7,466546	0,9783163	0,9805844	0,980199
684	8	3	0,706495157278	7,461306	0,9810926	0,9830899	0,9827158
1743	2	6	0,61106250397	7,457453	0,9811001	0,9823234	0,9819746
1237	2	8	0,615580978368	7,456767	0,9812867	0,9824564	0,9821526
4547	2	3	0,658427861179	7,443071	0,9816858	0,9835564	0,9830012
904	10	4	0,676068308375	7,441841	0,9837458	0,98477	0,9844999
3855	6	3	0,618890289065	7,432789	0,9851327	0,9864001	0,9861275
1472	7	2	0,552961241401	7,43133	0,9856189	0,9871161	0,9867512
2774	3	5	0,546796307229	7,397823	0,9874591	0,9879126	0,9877493
891	12	3	0,649218462666	7,393957	0,988239	0,99043845	0,9900378
1184	3	4	0,475419810954	7,39219	0,9899034	0,9905106	0,9903413
3838	9	2	0,49724465145	7,379595	0,9893872	0,99069304	0,99044796
4106	5	2	0,465996535122	7,373871	0,99033928	0,99134401	0,991065
1642	7	2	0,458259751574	7,371283	0,99086065	0,99195611	0,99173323
1968	2	6	0,414965130333	7,370328	0,99287774	0,99329956	0,99321951
2927	3	2	0,376333721647	7,368337	0,99274279	0,99352208	0,99325114
2479	3	8	0,38496155721	7,36517	0,99293705	0,99364632	0,99351053
791	3	3	0,392728559068	7,364266	0,99301934	0,99373044	0,99356046
298	2	5	0,321102803728	7,349637	0,99455478	0,99484206	0,99475693
2675	4	3	0,373679957643	7,349198	0,99469024	0,99523098	0,99513491
4577	4	4	0,371657669044	7,335283	0,99508523	0,99550936	0,99542327
3537	2	7	0,290784200192	7,327021	0,99514626	0,99555468	0,99549114
1246	7	3	0,377516437939	7,314891	0,99508484	0,99607489	0,99591978
4526	3	2	0,302786329983	7,309318	0,99597961	0,99641393	0,99629834
4194	7	2	0,290761652494	7,307175	0,99586326	0,99646514	0,99637293
777	6	3	0,297507259784	7,295922	0,99599046	0,99655819	0,99649726
2716	3	2	0,292293299322	7,292338	0,99654391	0,99689601	0,99679627
573	2	2	0,254613196047	7,289128	0,99692563	0,99723155	0,99713304
3873	3	2	0,252199877764	7,2796	0,99757211	0,99786267	0,99781033
619	2	2	0,21770681698	7,274721	0,99836746	0,9985281	0,99849646
953	4	2	0,191724354319	7,266406	0,99855673	0,99871596	0,99870078
2753	2	3	0,162804310917	7,262126	0,99885243	0,99897945	0,99895843
3333	2	12	0,203666097564	7,239714	0,99898869	0,999217974	0,999174617
3243	6	2	0,101122447941	7,235852	0,999094485	0,999290819	0,999267175
1280	3	2	0,131050258567	7,23326	0,999302376	0,999442592	0,999437699
181	4	2	0,126097443157	7,228255	0,999292301	0,999473177	0,999459047
1799	7	3	0,0515214611792	7,226775	0,999336604	0,999464223	0,999461191
394	3	5	0,163770849725	7,224849	0,999572761	0,999640342	0,999636213
1098	5	3	0,0250392198955	7,222188	0,999649782	0,999729861	0,999724174
1664	2	2	0,0756831330428	7,219639	0,999680183	0,999764665	0,999759136
1994	2	3	0,0873988524632	7,218188	0,999768528	0,999850162	0,999842975
753	2	3	0,0153395162955	7,216708	0,999792108	0,9998437	0,999847718
1065	2	2	0,0645800482652	7,211611	0,999793634	0,999851921	0,999853544
937	4	2	0,0929618881691	7,19497	0,999810132	0,999889083	0,999880218
Tiempos de ejecución: real:139m0.727s. user:401m5.670s. sys:192m58.898s							

Tabla A.5: Resultados no dominados para la imagen de prueba calhouse-232.jpg



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.5.5: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.5.

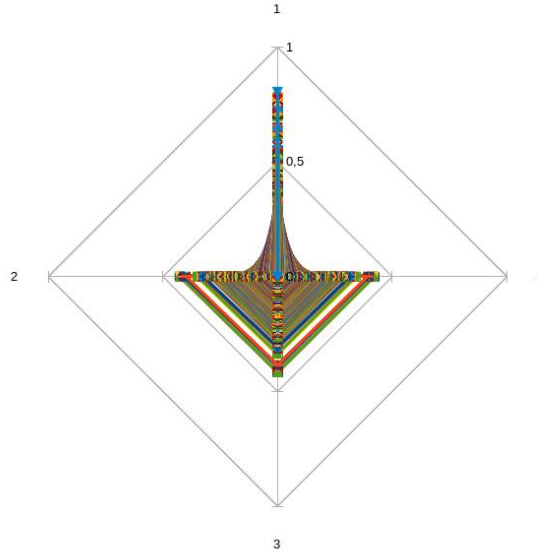


Figura A.6.6: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.5.

Tabla A.6: Tabla de correlación entre métricas para la imagen `calhouse_232.jpg`

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,8713	1		
$SSIM_G$	-0,8628	0,9996	1	
$SSIM_B$	-0,8676	0,9998	0,9999	1

A.6 Imagen de prueba `calhouse_233.jpg`

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
15368	2	17	60	7,9644179	0,48257	0,492483	0,477293
16	2	10	0	7,9640961	0,488278	0,497552	0,481149
15377	2	11	92	7,9638906	0,487972	0,4973	0,481293
10507	2	13	56	7,9628034	0,497258	0,506397	0,491662
30	2	9	0	7,9591303	0,500537	0,509243	0,492759
211	2	7	0	7,9555998	0,506787	0,515771	0,500243
15	2	6	0	7,9544954	0,529824	0,538253	0,52229
22	9	3	0	7,9537144	0,529878	0,543526	0,533478
107	8	3	0	7,9475708	0,533532	0,547254	0,536952
103	7	3	0	7,945128	0,537336	0,551222	0,540837
14595	6	3	38	7,9450827	0,570113	0,583556	0,574356
52	27	2	0	7,9400635	0,562968	0,582776	0,575417
11	11	2	0	7,9380255	0,581402	0,601586	0,593111

7	5	2	0	7,9370265	0,608505	0,62837	0,618644
9941	5	2	53	7,9362426	0,613193	0,632738	0,623218
9	4	2	0	7,9165883	0,616287	0,636639	0,626153
3	3	2	0	7,837657	0,63561	0,656051	0,64346
4	2	2	0	7,833251	0,64779	0,66812	0,652744
13720	5	2	12	7,830075	0,742645	0,755334	0,748677
9527	4	2	11	7,830056	0,74784	0,761016	0,753826
9041	4	2	11	7,82847	0,748216	0,761399	0,754185
8794	4	2	11	7,827614	0,748552	0,761723	0,754503
11299	4	2	11	7,826085	0,749716	0,762832	0,755637
9884	4	2	11	7,824258	0,750431	0,763503	0,75632
10696	5	2	11	7,820065	0,750583	0,76294	0,756341
9349	4	2	11	7,819668	0,752506	0,765435	0,758288
9558	4	2	11	7,81744	0,753234	0,766113	0,758958
9812	5	2	11	7,814829	0,754529	0,766779	0,760224
10697	5	2	11	7,813863	0,755283	0,767512	0,760966
14698	4	2	11	7,813821	0,757139	0,769868	0,762731
8511	4	2	10	7,812685	0,75809	0,770773	0,763624
10567	4	2	10	7,811888	0,758697	0,7714	0,764236
8797	4	2	10	7,811497	0,759611	0,772306	0,765153
11953	4	2	10	7,809104	0,760126	0,772814	0,765635
10684	4	2	10	7,807582	0,760418	0,773099	0,765912
11394	4	2	10	7,807375	0,76088	0,773558	0,766385
8896	4	2	10	7,807259	0,760977	0,773646	0,766477
9587	4	2	10	7,805585	0,761406	0,774083	0,766899
8484	4	2	10	7,804386	0,762107	0,774846	0,767663
9493	4	2	10	7,800407	0,762989	0,775688	0,768496
10255	4	2	10	7,798109	0,764081	0,776737	0,769556
8855	4	2	10	7,7978	0,764569	0,777203	0,770028
9310	4	2	10	7,794002	0,76567	0,778261	0,771123
11040	4	2	9	7,792649	0,768885	0,781259	0,774204
15147	4	2	9	7,792313	0,769376	0,781678	0,774644
12332	5	2	9	7,787515	0,770658	0,782326	0,775956
9015	5	2	9	7,786077	0,773068	0,784614	0,778288
11349	5	2	9	7,785051	0,773846	0,785366	0,779063
8448	5	2	9	7,784967	0,774517	0,786027	0,779733
15193	5	2	9	7,78404	0,775023	0,786535	0,780253
10823	5	2	9	7,783434	0,775712	0,787221	0,780955
10347	4	2	9	7,780568	0,775334	0,787366	0,780449
15738	5	2	9	7,779884	0,776257	0,787733	0,781475
10679	5	2	9	7,77921	0,777438	0,788907	0,782635
12085	5	2	8	7,777353	0,777926	0,789374	0,7831
9324	4	2	8	7,77718	0,777882	0,789848	0,782962
12713	2	2	10	7,772316	0,776692	0,789931	0,781681
10860	2	2	10	7,772291	0,778677	0,791843	0,783737
9659	5	2	8	7,77215	0,781407	0,792747	0,786491
13784	5	2	8	7,771165	0,782027	0,793369	0,787113
13735	2	2	9	7,764513	0,780593	0,793754	0,785731
14602	5	2	8	7,759579	0,786458	0,79766	0,791316
13805	5	2	8	7,758085	0,787918	0,79906	0,79273
16201	2	2	9	7,752721	0,789178	0,80196	0,794253
11255	2	2	8	7,750969	0,790761	0,803556	0,795904
10663	2	2	8	7,749425	0,791303	0,804061	0,796433
15633	2	2	8	7,745453	0,792582	0,805289	0,79773
10070	2	2	8	7,743456	0,796413	0,808954	0,801464
11197	2	2	8	7,742888	0,797158	0,809643	0,802171
9038	4	2	7	7,741746	0,797193	0,808583	0,802261

8772	4	2	7	7,739044	0,798362	0,809772	0,80343
15549	2	2	8	7,733381	0,798053	0,810522	0,803084
14453	4	2	6	7,732451	0,802657	0,813847	0,807668
8761	4	2	6	7,729936	0,803286	0,814427	0,808286
9890	4	2	6	7,727	0,804611	0,815701	0,809632
11415	4	2	6	7,720656	0,806782	0,817798	0,811789
10824	2	2	7	7,72059	0,806751	0,818888	0,811736
10656	4	2	6	7,715597	0,809696	0,820601	0,814667
13551	2	2	7	7,714301	0,808638	0,820669	0,813586
9582	4	2	6	7,711201	0,812386	0,823254	0,817314
8988	2	2	6	7,707901	0,812743	0,824638	0,817706
13619	4	2	6	7,706935	0,813481	0,824333	0,818408
12708	3	2	6	7,698737	0,814406	0,82553	0,818962
9095	2	2	6	7,69852	0,81794	0,829617	0,822801
14716	2	2	6	7,696791	0,818493	0,830143	0,823401
10624	2	2	6	7,692929	0,82089	0,832458	0,825781
8713	2	2	6	7,692648	0,821041	0,832601	0,825916
9071	2	2	5	7,692008	0,824254	0,835639	0,829059
9870	2	2	5	7,686544	0,824937	0,836291	0,829722
15712	2	2	5	7,679072	0,825182	0,836541	0,829987
16212	2	2	5	7,676153	0,827217	0,838521	0,832052
10876	2	2	5	7,66954	0,829413	0,840581	0,834165
10174	2	2	5	7,666376	0,831723	0,842743	0,836427
15172	2	2	5	7,66384	0,831863	0,842905	0,836629
11926	2	2	5	7,661119	0,833445	0,844472	0,838219
8909	2	2	5	7,660193	0,834606	0,845593	0,839361
10837	3	2	4	7,652023	0,834842	0,845208	0,839241
10152	4	2	4	7,651338	0,835062	0,844868	0,839747
9570	2	2	4	7,649695	0,837351	0,848186	0,842058
8848	2	2	4	7,644327	0,837898	0,848709	0,842601
10191	2	2	4	7,643588	0,840095	0,8508	0,844762
8955	2	2	4	7,640403	0,841373	0,852005	0,84603
14636	4	2	4	7,63663	0,841735	0,851157	0,846309
10832	2	3	3	7,635166	0,842287	0,849785	0,845057
11188	2	2	4	7,634642	0,841809	0,852419	0,84645
9105	4	2	4	7,631195	0,843212	0,852571	0,847752
8821	2	2	4	7,626431	0,844501	0,855032	0,849122
14195	2	2	4	7,620135	0,845963	0,85641	0,850556
9496	4	2	4	7,616235	0,847615	0,856894	0,852102
12807	2	2	4	7,616163	0,847591	0,857889	0,85213
13544	3	2	4	7,611934	0,848191	0,857878	0,85233
9319	4	2	4	7,611707	0,848696	0,857984	0,853183
10805	2	2	4	7,611495	0,849028	0,859212	0,853513
9982	4	2	4	7,610335	0,850772	0,859998	0,855213
9037	2	2	4	7,610197	0,850782	0,860807	0,855184
8748	2	3	3	7,606902	0,864033	0,870084	0,866298
14655	2	3	3	7,603369	0,865269	0,871292	0,867527
8543	2	3	3	7,597427	0,868709	0,87465	0,87092
8960	2	3	3	7,587586	0,871251	0,877111	0,873528
8778	2	3	3	7,58285	0,876473	0,881961	0,878671
12144	2	3	2	7,577989	0,878612	0,883966	0,880724
11361	2	3	2	7,577807	0,880238	0,885522	0,88231
12033	2	3	2	7,577801	0,881565	0,88678	0,883615
8976	2	3	2	7,575112	0,883544	0,88868	0,885561
8727	2	3	2	7,564366	0,888884	0,893758	0,890854
9294	2	3	2	7,556678	0,891679	0,896429	0,893632
8475	2	3	2	7,555342	0,89389	0,898607	0,895891

13625	2	3	2	7,545502	0,896277	0,900949	0,898225
8531	2	3	2	7,543633	0,9023158	0,9066553	0,9041415
8491	2	3	2	7,532021	0,9057158	0,9098648	0,9074941
8818	2	3	2	7,52354	0,9074636	0,9115528	0,909265
8498	2	3	2	7,520755	0,9136949	0,9176401	0,9154658
8485	2	3	2	7,5129	0,9169559	0,9207956	0,9187214
9937	2	3	2	7,496975	0,9212793	0,9249234	0,922952
21	40	4	0	7,414714	0,9208596	0,9275688	0,9255395
12774	3	3	1	7,393814	0,9531319	0,9555105	0,9545367
12397	4	3	1	7,381119	0,9594454	0,9615363	0,9607655
8537	2	3	1	7,374435	0,9641958	0,9664217	0,9654486
8861	2	3	1	7,372458	0,9660153	0,9681647	0,9672789
12465	6	3	1	7,349307	0,9665618	0,9684144	0,9677445
9278	2	4	1	7,339125	0,9672509	0,9685687	0,9679825
15249	2	4	1	7,313688	0,9694467	0,9706426	0,9701228
13525	2	5	1	7,311844	0,9703711	0,9715986	0,9711091
108	6	3	1	7,311819	0,972754	0,974634	0,9740992
53	3	3	1	7,311594	0,972814	0,9745881	0,9739576
8792	2	3	1	7,309666	0,9744618	0,9763361	0,9755835
43	3	3	1	7,305351	0,975211	0,9769658	0,9763349
1030	2	3	1	7,29925	0,9776889	0,9795442	0,9788617
1158	18	4	0	7,28302	0,9782476	0,9801592	0,9796357
260	2	4	1	7,282107	0,981067	0,981924	0,9815909
8780	2	3	1	7,277208	0,9803925	0,9819794	0,9813711
8500	3	3	1	7,272516	0,980988	0,9825277	0,9820322
9844	2	3	1	7,262352	0,9818983	0,9835175	0,9829542
9110	2	3	1	7,24647	0,9831212	0,9846524	0,9841126
11317	7	3	1	7,229477	0,9847826	0,9860763	0,9857461
45	2	4	1	7,221929	0,9884802	0,9891535	0,9889254
80	2	3	1	7,212861	0,9880853	0,9892831	0,9888887
102	3	3	1	7,208588	0,9882067	0,9893368	0,9890045
10905	6	3	1	7,185101	0,9883189	0,9894958	0,989166
10548	3	3	1	7,176522	0,99055158	0,99152546	0,99124684
9492	2	3	1	7,174779	0,99071913	0,99176714	0,99145965
8898	2	4	0	7,151854	0,99205773	0,99254353	0,99240415
9060	3	4	0	7,137148	0,99336865	0,99381741	0,9936796
15673	2	3	0	7,129786	0,99334874	0,99413979	0,99392521
12418	2	15	0	7,111277	0,99460581	0,99504103	0,99495866
9825	3	5	0	7,087425	0,99543166	0,99578058	0,99571162
23	2	4	0	7,080348	0,99651957	0,99683151	0,99677084
8738	2	3	0	7,075974	0,99644096	0,99696787	0,99685133
13064	3	3	0	7,050344	0,99665165	0,99713215	0,99703928
12118	3	2	0	7,003433	0,99719598	0,99755714	0,99745385
11066	3	5	0	7,00308	0,99776407	0,99799022	0,99796338
10578	3	3	0	7,001189	0,99808512	0,99836338	0,99830411
16196	2	4	0	6,99617	0,99811636	0,99831912	0,99828857
8894	2	8	0	6,99249	0,99802882	0,99838694	0,99831864
9316	2	3	0	6,99221	0,998622	0,99885807	0,99882422
10509	2	2	0	6,96884	0,99862593	0,99884974	0,99880018
11862	2	4	0	6,96407	0,99871826	0,99890137	0,99887607
8994	3	4	0	6,95846	0,99880854	0,999084451	0,999038287
8544	4	3	0	6,95787	0,9987736	0,999110063	0,999060397
12138	3	3	0	6,93739	0,999064643	0,999324337	0,999289298
9583	2	2	0	6,92372	0,999377762	0,999509595	0,999515629
13731	2	2	0	6,92314	0,999457595	0,999599281	0,999578553
9576	2	3	0	6,92253	0,999634701	0,999782354	0,99977587
12	3	2	0	6,91214	0,999670036	0,999815107	0,999800376

10	4	2	0	6,91036	0,999704311	0,999846607	0,999837752
9005	3	3	0	6,90694	0,999745078	0,999888117	0,999874137
8957	2	2	0	6,90641	0,999752612	0,999878282	0,999883554
Tiempos de ejecución: real:67m22.885s.user:207m13.352s.sys:94m57.439s							

Tabla A.7: Resultados no dominados para la imagen de prueba `calhouse_233.jpg`



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.7.7: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.7.

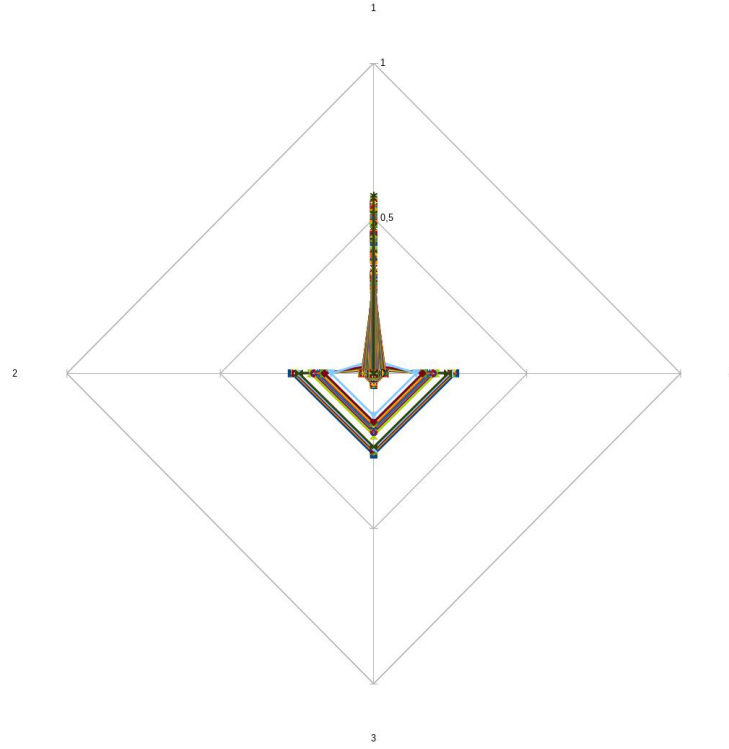


Figura A.8.8: Frente Pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas, para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.7.

Tabla A.8: Tabla de correlación entre métricas para la imagen calhouse_233.jpg

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,8865	1		
$SSIM_G$	-0,8786	0,9996	1	
$SSIM_B$	-0,8798	0,9997	0,9999	1

A.8 Imagen de prueba calhouse_234.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
7813	4	26	82,7104105945	7,9729428	0,488853	0,492309	0,484956
4659	4	15	84,3064201763	7,9728112	0,507124	0,51135	0,504663
4641	4	16	80,8369769713	7,9724369	0,50772	0,511933	0,505276
2980	4	12	0	7,9723797	0,50949	0,513816	0,506966
804	4	12	0	7,9723797	0,50949	0,513816	0,506966
8629	4	12	103,208613666	7,9722562	0,511167	0,515464	0,508693
3145	24	3	0	7,9722366	0,593304	0,599433	0,59397
3104	20	3	0	7,9715672	0,597988	0,603957	0,598371

1139	3	12	0	7,9714804	0,534864	0,538861	0,530672
3142	13	3	0	7,9707966	0,609778	0,616231	0,610656
1127	2	13	0	7,9705114	0,547395	0,553179	0,541698
3174	11	3	0	7,9703693	0,618789	0,625171	0,619793
1186	30	3	0	7,9687672	0,589738	0,595789	0,590179
1172	17	3	0	7,9685817	0,602209	0,608165	0,602642
4684	11	3	51,6613911688	7,9684563	0,623184	0,629488	0,624292
6269	11	3	51,2771031058	7,9679718	0,623351	0,629652	0,62448
6512	13	3	38,030461769	7,9679112	0,625706	0,631739	0,626921
3154	7	3	0	7,9678497	0,636795	0,642729	0,637839
297	8	3	0	7,9668436	0,632689	0,63828	0,633282
7602	11	3	33,9306756621	7,9667892	0,637998	0,644072	0,639502
3167	11	2	0	7,9603362	0,693687	0,702044	0,697779
40	11	2	0	7,9603362	0,693687	0,702044	0,697779
3161	7	2	0	7,9586344	0,710226	0,717951	0,714066
20	7	2	0	7,9586344	0,710226	0,717951	0,714066
3146	6	2	0	7,9506717	0,722754	0,730685	0,72632
45	6	2	0	7,9506717	0,722754	0,730685	0,72632
3148	5	2	0	7,9480896	0,726502	0,734093	0,729347
43	5	2	0	7,9480896	0,726502	0,734093	0,729347
3152	3	2	0	7,9153953	0,754785	0,762691	0,755935
36	3	2	0	7,9153953	0,754785	0,762691	0,755935
3132	2	2	0	7,861331	0,768876	0,778468	0,771507
12	2	2	0	7,861331	0,768876	0,778468	0,771507
10746	4	2	4,71654054375	7,860744	0,852471	0,85847	0,854263
4270	6	2	4,1164358389	7,860411	0,854378	0,860118	0,855955
4588	3	2	4,89568211706	7,860108	0,855588	0,861951	0,857296
10733	6	2	4,03343387191	7,858199	0,855673	0,861416	0,857251
3399	3	2	4,56558731737	7,857662	0,858162	0,864494	0,859777
6401	6	2	3,85249430799	7,857443	0,858277	0,863983	0,859838
5269	6	2	3,719403445	7,851369	0,859281	0,864991	0,86085
10617	4	2	4,06613535022	7,844461	0,859001	0,865071	0,860823
6661	3	2	4,30642760051	7,84413	0,860687	0,867051	0,862352
9855	3	2	4,25251612486	7,84385	0,861071	0,867437	0,86274
3360	3	2	4,13211586467	7,843114	0,862544	0,868871	0,864178
4271	4	2	3,81137528079	7,837706	0,862373	0,868423	0,86426
9865	6	2	3,48259322082	7,837085	0,863715	0,869604	0,865486
6639	3	2	3,93361809701	7,836892	0,864307	0,870643	0,865947
3352	3	2	3,87213764655	7,836442	0,864882	0,871228	0,866543
5348	6	2	3,38990598431	7,832004	0,864931	0,87085	0,86675
4309	4	2	3,57808750002	7,830937	0,865283	0,871207	0,867117
10537	4	2	3,52343831443	7,82548	0,86637	0,872253	0,868172
9612	2	2	3,8535303641	7,818487	0,866332	0,873877	0,868479
10536	4	2	3,11746461921	7,816568	0,869796	0,876154	0,87191
9540	2	2	3,53502123248	7,815623	0,869339	0,876809	0,871517
3367	4	2	3,02171372202	7,815161	0,870544	0,87693	0,872684
5278	2	2	3,51894349183	7,813884	0,86955	0,877022	0,871741
7252	4	2	2,98457883381	7,813003	0,870891	0,877386	0,873092
7149	3	2	3,26204123149	7,812159	0,871273	0,877778	0,873176
6593	6	2	3,0093591911	7,811176	0,871808	0,877806	0,873706
6363	3	2	3,16604662074	7,807677	0,871905	0,878436	0,873843
6635	4	2	2,91788356776	7,807005	0,872913	0,879375	0,875079
9575	6	2	2,88179398209	7,806798	0,873982	0,879982	0,875902
4413	3	2	2,88951037232	7,802886	0,873825	0,880746	0,875996
4605	6	2	2,7762794592	7,801264	0,876139	0,882065	0,878074
4264	4	2	2,76479725808	7,800169	0,87619	0,882513	0,878331
7919	3	2	2,71671540574	7,793998	0,875556	0,882677	0,877817

6383	3	2	2,66212539551	7,792871	0,877352	0,884508	0,879627
6601	4	2	2,66825583644	7,787138	0,877641	0,884	0,879798
5339	4	2	2,51059796115	7,783764	0,879639	0,886353	0,882019
10620	3	2	2,55516328124	7,77732	0,880209	0,887204	0,882436
5192	6	2	2,51354654141	7,776969	0,882218	0,888425	0,884418
6997	3	2	2,47780082784	7,773592	0,881322	0,888449	0,883701
7447	3	2	2,39287754269	7,769513	0,881938	0,889314	0,884575
4597	14	2	2,4464225518	7,767189	0,883261	0,888247	0,885231
8635	3	2	2,26432898429	7,76686	0,884937	0,892419	0,887634
3632	10	2	2,46365755409	7,760837	0,885212	0,89076	0,887476
7369	9	2	2,35618601415	7,758979	0,88663	0,892169	0,888897
6674	4	2	2,17375735081	7,755159	0,888934	0,895629	0,891548
4903	6	2	2,25813148359	7,750747	0,889259	0,895646	0,891768
7007	11	2	2,2957176423	7,748372	0,890977	0,89673	0,89334
4680	3	2	2,10882681465	7,744946	0,891179	0,898335	0,893857
11191	9	2	2,31746879735	7,743822	0,892001	0,89734	0,894203
4550	6	2	2,2075035079	7,743156	0,892207	0,898467	0,894733
3350	3	2	2,04069387383	7,742971	0,891622	0,899027	0,894416
7154	5	2	2,17821207391	7,735078	0,892086	0,898539	0,894849
3335	3	2	2,00866737303	7,732977	0,893223	0,9006665	0,896077
8683	14	2	2,20208647847	7,731953	0,898341	0,9029826	0,9002097
3736	6	2	2,07432580442	7,731449	0,897004	0,9032128	0,899594
4316	3	2	1,97151710435	7,724024	0,896326	0,9035516	0,899128
8789	2	2	1,92911386595	7,719514	0,896094	0,9041841	0,89924
9597	8	2	2,04240735501	7,719242	0,899267	0,9048542	0,9016221
4697	2	2	1,90813144809	7,718035	0,897158	0,9051592	0,9002809
3793	3	2	1,95506179624	7,717232	0,898603	0,9056717	0,901389
7655	5	2	1,94375004682	7,713401	0,899485	0,9057873	0,9020796
3129	53	3	0,0906614748552	7,58764	0,89652	0,9053589	0,9026042
1	59	3	0,348404050444	7,58764	0,89652	0,9053589	0,9026042
3170	26	6	0,511796994819	7,554224	0,9078432	0,9128101	0,9103165
6	27	6	0,665067465025	7,554224	0,9078432	0,9128101	0,9103165
3133	37	4	0,488860216273	7,554179	0,9133796	0,9207902	0,9183224
7	40	4	0,515435272603	7,554179	0,9133796	0,9207902	0,9183224
6207	21	2	1,1464991835	7,55254	0,9534706	0,9556002	0,9544156
3155	24	2	1	7,551123	0,9662346	0,9674732	0,9665551
9537	2	3	1,03606575094	7,550421	0,9560184	0,9584715	0,9566388
4647	2	2	1,04465087401	7,547952	0,9557093	0,9595295	0,9573778
3777	3	2	1,05113356364	7,547359	0,9570711	0,960575	0,9586027
8639	3	3	1,05241803993	7,530614	0,9571133	0,9588994	0,9574533
7181	17	2	1,04331811923	7,527728	0,9605075	0,9623739	0,9612267
4643	2	3	0,958036877464	7,527696	0,960904	0,9630766	0,9614353
4289	3	2	0,996347422095	7,526402	0,9598913	0,9630863	0,9613124
3739	6	2	1,0063494314	7,524032	0,9622271	0,9647536	0,9632601
7642	3	2	0,973918271964	7,516794	0,962364	0,9654645	0,9637425
4695	3	3	0,90555577618	7,515431	0,96376	0,9653715	0,9640454
4322	2	2	0,94309706351	7,510776	0,9629486	0,966093	0,9642957
3765	7	2	0,98122117207	7,508458	0,9640932	0,966241	0,9648995
3181	2	3	0,885217278433	7,507542	0,9658637	0,9678066	0,9663469
30	2	3	0,893874350908	7,507542	0,9658637	0,9678066	0,9663469
3149	2	2	0,926215684557	7,506674	0,9649927	0,967962	0,9662859
34	2	2	0,91299851085	7,506674	0,9649927	0,967962	0,9662859
3097	11	2	1	7,505946	0,965971	0,967962	0,9668989
4	11	2	1	7,505946	0,965971	0,967962	0,9668989
3135	6	2	0,912272466777	7,503358	0,9673205	0,9696367	0,9683643
1545	3	2	0,904712883505	7,498104	0,9652953	0,9680356	0,9664902
3176	14	2	0,937018260677	7,497766	0,9685609	0,9701101	0,9691099

3175	4	2	0,863033788718	7,497345	0,9688734	0,9712933	0,96995
1959	3	2	0,893479633984	7,495818	0,9677715	0,9703577	0,9688887
6693	3	3	0,879568354659	7,495294	0,9680891	0,9695368	0,9684684
1134	9	2	1	7,493744	0,9685432	0,9703267	0,9692578
1149	2	2	0,876168729825	7,4934	0,9685771	0,9712066	0,9697233
3150	5	3	0,907757451731	7,492193	0,9690864	0,9703742	0,9694205
114	5	3	0,894571204573	7,492193	0,9690864	0,9703742	0,9694205
2979	3	3	0,812519298752	7,488891	0,9712782	0,9725883	0,9715597
3158	2	3	0,833866902733	7,488011	0,9697301	0,9714833	0,9702129
364	2	3	0,836926396191	7,488011	0,9697301	0,9714833	0,9702129
3153	3	2	0,854113478667	7,487528	0,969955	0,972297	0,9709494
418	3	2	0,850908844808	7,487528	0,969955	0,972297	0,9709494
3185	11	2	0,95	7,486952	0,9711274	0,9727487	0,9717276
18	11	2	0,909204773465	7,486952	0,9711274	0,9727487	0,9717276
3127	2	2	0,850344549266	7,484854	0,970337	0,9727736	0,9713565
2	2	2	0,839606904816	7,484854	0,970337	0,9727736	0,9713565
3165	6	2	0,846937821181	7,481193	0,972235	0,9740751	0,9729784
111	6	2	0,83094817677	7,481193	0,972235	0,9740751	0,9729784
3091	4	2	0,853706507459	7,480263	0,972465	0,9744235	0,9732508
3131	2	2	0,827779089761	7,475368	0,9718402	0,9741595	0,9728167
924	2	2	0,817265856041	7,475368	0,9718402	0,9741595	0,9728167
3187	13	2	0,956428228721	7,475305	0,9739188	0,975255	0,9744833
3160	3	2	0,80975515976	7,472645	0,9733309	0,9754303	0,9742481
0	3	2	0,818377249473	7,472645	0,9733309	0,9754303	0,9742481
3156	4	2	0,780918170773	7,469529	0,9750246	0,9769313	0,9758387
3123	3	3	0,739306706876	7,466774	0,975133	0,9762452	0,9754101
3179	18	2	0,783902002406	7,466207	0,9761363	0,977377	0,9767086
6211	8	2	0,829824307233	7,465697	0,9735659	0,9752039	0,9742595
8879	2	2	0,799849176982	7,464915	0,9736075	0,9757501	0,9744843
7185	3	2	0,759828982292	7,463711	0,9750538	0,9769635	0,9758586
3147	2	2	0,761261125963	7,45743	0,9753703	0,9773844	0,9762181
33	2	2	0,759973896268	7,45743	0,9753703	0,9773844	0,9762181
3159	6	2	0,747192629244	7,452176	0,9770087	0,9786343	0,9777804
32	6	2	0,769196682286	7,452176	0,9770087	0,9786343	0,9777804
3125	2	2	0,731703535828	7,451247	0,9770025	0,9788193	0,9777347
5	2	2	0,738264702174	7,451247	0,9770025	0,9788193	0,9777347
3138	3	2	0,73164070769	7,448575	0,9784641	0,9801005	0,9791769
3162	3	3	0,725942475481	7,446965	0,9788311	0,9798182	0,9790881
3151	2	2	0,729074889936	7,446394	0,978615	0,9803311	0,9793302
4247	21	2	0,877304087667	7,445636	0,9777627	0,978803	0,97825
10442	8	2	0,719847388213	7,444247	0,9779407	0,9794632	0,978671
3126	3	2	0,679146848174	7,442254	0,9796853	0,9812073	0,9803078
720	4	2	0,726690383673	7,43709	0,9786977	0,9801972	0,9792935
3178	6	2	0,682234104882	7,435627	0,9804668	0,9816837	0,980904
4432	13	2	0,708353647462	7,434813	0,9790702	0,9803005	0,9796645
8839	14	2	0,810059454561	7,430845	0,9792291	0,980554	0,9799545
202	2	2	0,683571225455	7,428604	0,9800532	0,9815933	0,9806534
3186	3	3	0,656165744218	7,428023	0,9819243	0,9827287	0,9820983
46	3	3	0,634646330157	7,428023	0,9819243	0,9827287	0,9820983
3173	17	2	0,73226869704	7,425675	0,9832808	0,9840652	0,9835751
3625	11	2	0,735653425427	7,422398	0,9816974	0,9827571	0,9822045
4548	4	2	0,702343939016	7,421746	0,9814117	0,9827789	0,9819942
5066	2	2	0,665687225595	7,420094	0,9815636	0,9829906	0,9821312
3144	10	2	0,645449480383	7,419412	0,9831886	0,9840683	0,9834772
3177	3	3	0,578272628825	7,417649	0,9848475	0,9855284	0,9850234
8077	4	3	0,666490498232	7,416516	0,9825764	0,983266	0,9826783
3128	14	2	0,632770576643	7,41403	0,98714	0,9877325	0,9873146

3774	2	2	0,631717977588	7,41115	0,9829461	0,9842214	0,983427
3629	3	2	0,613678898212	7,405372	0,9843495	0,9854755	0,9848116
3396	3	2	0,575284560999	7,401612	0,9860623	0,9870288	0,986452
3184	12	2	0,522610271857	7,398004	0,9896581	0,99016668	0,989814
6361	4	3	0,591157342853	7,396977	0,9866042	0,9871395	0,9866906
5068	4	2	0,574749503474	7,386916	0,9867648	0,9876948	0,9871461
6368	7	2	0,527443762515	7,382335	0,9876088	0,9883492	0,9879195
4297	10	2	0,569818586904	7,381766	0,9878829	0,9887531	0,9883678
3141	18	2	0,572302594831	7,37697	0,99110579	0,99171767	0,99145767
9452	5	2	0,513274644195	7,364351	0,9890703	0,9897053	0,9892984
3143	9	2	0,515175605936	7,359581	0,99128308	0,99182309	0,99155717
6465	6	2	0,501323796508	7,350079	0,99074683	0,99137657	0,99104679
3137	3	2	0,461160630083	7,349293	0,99147148	0,99203164	0,99169816
3180	4	3	0,403556720027	7,34078	0,99310863	0,99334988	0,99313115
4324	2	2	0,469896925971	7,333894	0,99136025	0,99195414	0,99156329
3183	15	2	0,5	7,333697	0,99445154	0,99475965	0,99459587
3371	2	3	0,417413912497	7,324636	0,99239352	0,99272884	0,99242657
3130	8	2	0,368264089891	7,324273	0,99558506	0,99578858	0,99565411
3752	8	2	0,418919775326	7,315817	0,99340646	0,99384143	0,9936441
10865	2	2	0,39105841658	7,301241	0,99389616	0,99427029	0,99400234
3382	2	3	0,359985244613	7,296366	0,99508535	0,99530402	0,99511194
3166	3	2	0,305290000047	7,289907	0,99635934	0,9965615	0,99644331
4553	6	2	0,32494489489	7,284024	0,99565258	0,99591466	0,99576618
849	3	3	0,314782620189	7,278732	0,99606137	0,99626118	0,99615504
3182	11	2	0,317936251338	7,276667	0,99668815	0,99684504	0,99675318
4253	2	2	0,314540739395	7,271143	0,99629769	0,99651531	0,99637054
3134	4	2	0,255668440752	7,269212	0,99731749	0,99746992	0,99739076
5316	6	3	0,299078405964	7,261945	0,99653977	0,99680771	0,99670771
3169	5	2	0,227660930211	7,261642	0,99828264	0,9983559	0,99831206
6553	2	2	0,289917410667	7,253428	0,99702679	0,99718006	0,99707299
3171	3	2	0,225128485738	7,244611	0,99857531	0,99863122	0,99860055
3773	2	2	0,267918383436	7,238317	0,99732064	0,99747227	0,99736955
1175	3	2	0,261244929345	7,233156	0,99796324	0,9980895	0,99803046
3168	7	2	0,219179192327	7,226593	0,99878412	0,99885677	0,99882622
4395	2	3	0,193841045741	7,218917	0,99857573	0,99862656	0,99858757
3157	6	2	0,196390542599	7,21389	0,999158236	0,99919909	0,999183131
5302	2	3	0,177293277241	7,208391	0,99885871	0,99891893	0,99889287
3140	3	2	0,148486630518	7,206258	0,999268568	0,999335443	0,999320726
7316	3	2	0,172302029462	7,199256	0,99887267	0,99893841	0,99891323
5176	2	2	0,164913397167	7,196357	0,99901969	0,999077988	0,999053925
7857	2	4	0,145381627513	7,193382	0,999115374	0,999194322	0,999166574
6422	7	2	0,0530066513036	7,178236	0,999188425	0,999252134	0,999238052
3164	3	2	0,101165992212	7,170529	0,999741584	0,999779027	0,999768285
3163	2	3	0,0869925259854	7,168783	0,999745769	0,999797754	0,999779334
3139	4	2	0,0653533397144	7,167536	0,999816605	0,999856597	0,999852097
11104	2	2	0,108075046913	7,16671	0,999547554	0,999587273	0,999570438
3136	2	2	0,0083970078807	7,164452	0,999857686	0,999884402	0,999889763
3172	2	3	0,0112353502775	7,163406	0,999853258	0,999882018	0,999889938
4532	2	2	0,0817023626762	7,155735	0,999712217	0,99975399	0,999752172
Tiempos de ejecución: real:69m51.735s, user:207m51.484s, sys:94m33.030s							

Tabla A.9: Resultados no dominados para la imagen de prueba calhouse-234.jpg



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.9.9: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.9.

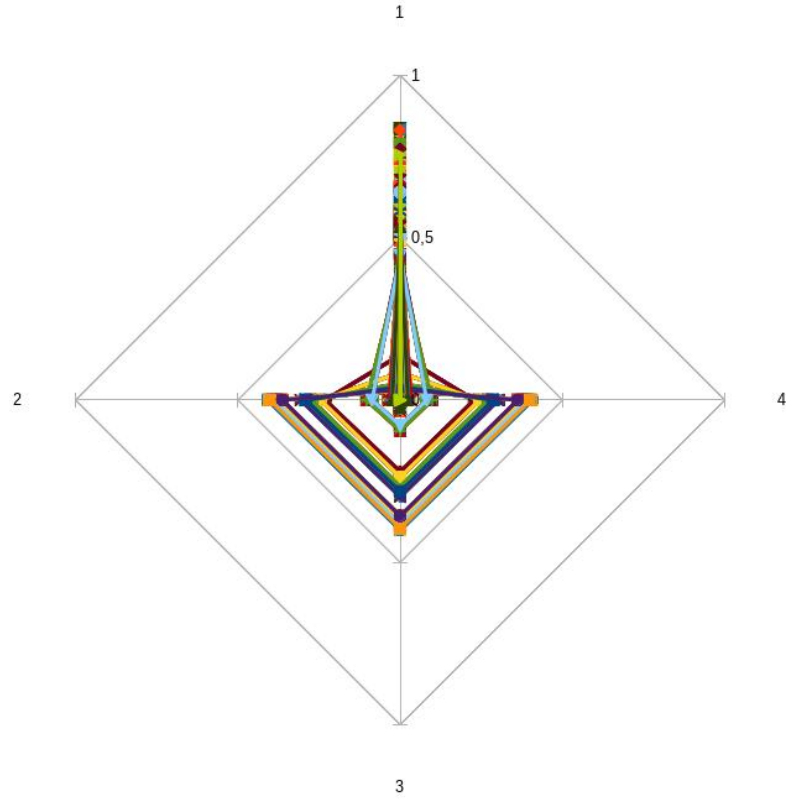


Figura A.10.10: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.9.

Tabla A.10: Tabla de correlación entre métricas para la imagen `calhouse_234.jpg`

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,8485	1		
$SSIM_G$	-0,8404	0,9998	1	
$SSIM_B$	-0,8445	0,9999	0.9999	1

A.10 Imagen de prueba `calhouse_236.jpg`

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I.\vec{x})$	$f_2(I.\vec{x})$	$f_3(I.\vec{x})$	$f_4(I.\vec{x})$
701	2	32	0	7,9799199	0,613144	0,603679	0,599555
400	36	2	248,373755352	7,9799085	0,637608	0,63812	0,631777
2	29	2	189,741101225	7,9790635	0,640481	0,641161	0,634823
2602	30	2	23,5339603561	7,978929	0,640501	0,641185	0,634845
825	30	2	23,0550827255	7,9789057	0,64053	0,641215	0,634875

1	14	2	128	7,9789023	0,653987	0,655472	0,649545
3399	12	2	0	7,9786205	0,656935	0,658856	0,652998
560	12	2	20,9409990987	7,9784131	0,6571	0,659025	0,653163
260	12	2	18,0514788374	7,9784117	0,657401	0,659336	0,653466
371	12	2	17,9266426454	7,9784021	0,657424	0,659361	0,653485
1773	12	2	17,5692357923	7,978334	0,657529	0,659464	0,653595
97	12	2	17,4101065697	7,9781842	0,657671	0,65961	0,653736
2295	12	2	16,5272215969	7,9770637	0,658281	0,660241	0,654402
792	14	2	14,22775259	7,9766812	0,658487	0,660172	0,654361
268	10	2	157,222761982	7,976449	0,6617	0,663754	0,657849
4371	10	2	20,5062321147	7,9763479	0,6617	0,663762	0,657855
4222	10	2	15,78446756	7,9758272	0,662727	0,66485	0,658941
499	8	2	42,9572587969	7,9750571	0,671177	0,673311	0,667828
3083	8	2	16,085105247	7,973763	0,671908	0,674082	0,668575
1999	9	2	11,8016851752	7,9732618	0,674881	0,676968	0,67145
464	9	2	10,6716979901	7,9730854	0,678698	0,68073	0,675289
3075	8	2	11,2453274528	7,9729824	0,679567	0,68178	0,676539
987	8	2	10,0844158937	7,9728947	0,684606	0,686782	0,681661
497	8	2	10,0552776491	7,9727664	0,685145	0,687305	0,682206
995	8	2	9,78472591416	7,9717155	0,686209	0,688384	0,683299
3087	8	2	9,47940948586	7,9709735	0,688183	0,690334	0,685292
2093	10	2	7,75055269921	7,9706688	0,691717	0,693794	0,688847
3186	10	2	7,57900956368	7,9700789	0,693215	0,695279	0,690334
4795	10	2	7,49169179854	7,969985	0,694113	0,696213	0,691264
2095	14	2	6,80143110746	7,9690876	0,696285	0,697872	0,693519
1725	5	2	13,9218650346	7,9683652	0,697344	0,69936	0,694294
466	8	2	7,90524678704	7,9681797	0,697998	0,700198	0,695363
2537	5	2	12,1003623888	7,9678974	0,700051	0,702063	0,697047
126	5	2	11,4778631434	7,9678268	0,701305	0,703284	0,698272
2324	5	2	10,7246115356	7,9676528	0,703329	0,705257	0,700225
96	5	2	10,6012944061	7,9673471	0,703464	0,705379	0,700352
3278	5	2	10,0918784986	7,9673076	0,705086	0,706996	0,701987
3974	5	2	9,95382679316	7,9672818	0,705257	0,707149	0,702143
4488	5	2	9,68239527419	7,9671082	0,706285	0,708195	0,703192
2081	5	2	9,64212281061	7,9667549	0,706541	0,708472	0,703477
570	5	2	9,17772713692	7,9666758	0,708138	0,710088	0,705091
82	5	2	9,0383894805	7,9660726	0,708841	0,710812	0,705784
947	5	2	8,792247204	7,9657645	0,710141	0,712098	0,70714
2588	5	2	8,48998169162	7,9654074	0,711814	0,713762	0,708854
25	5	2	8,12724032646	7,9653068	0,713121	0,715081	0,710191
209	5	2	8,06263708987	7,9645019	0,713582	0,715548	0,710645
454	5	2	7,865326934	7,9644952	0,715045	0,717054	0,712132
18	5	2	7,4352635852	7,9635501	0,717399	0,719516	0,71449
394	5	2	7,41926737989	7,9631634	0,717648	0,719778	0,714696
195	5	2	7,36676388416	7,9631472	0,718107	0,720232	0,715175
423	5	2	7,21805813407	7,9627523	0,719021	0,721201	0,716114
1682	5	2	7,133153595	7,9612241	0,71941	0,721614	0,716544
1095	5	2	7,09869453522	7,960382	0,719879	0,722059	0,716994
465	5	2	6,63280285605	7,9599857	0,723076	0,725445	0,720336
1796	5	2	6,5834292794	7,9592824	0,723693	0,72609	0,720988
3972	5	2	6,16322580097	7,9589024	0,727362	0,730023	0,724818
2585	5	2	6,02223339163	7,9588294	0,728544	0,731258	0,725991
1392	4	2	6,34823550056	7,9524894	0,730875	0,733324	0,728495
594	3	2	7,92240283079	7,9510961	0,734003	0,736431	0,731186
873	3	2	7,81879924469	7,951077	0,734575	0,73697	0,731745
1567	4	2	5,92323492267	7,950563	0,734279	0,737148	0,73214
1376	3	2	7,60893085626	7,950449	0,735776	0,738285	0,733004

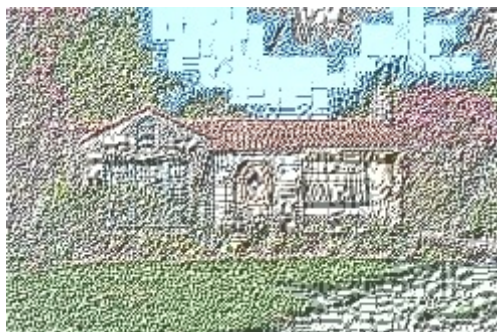
4476	5	2	5,26608514579	7,9500904	0,737518	0,740621	0,73513
253	3	2	7,16131819721	7,9500222	0,738797	0,741336	0,735964
372	5	2	5,23979802217	7,9491582	0,738452	0,741556	0,736068
78	3	2	7,10380078393	7,9486208	0,739717	0,742236	0,736919
1548	5	2	5,14554791769	7,9483442	0,739264	0,74234	0,736907
1194	3	2	7,00349001386	7,94807	0,740334	0,742846	0,737555
3854	5	2	4,99751899312	7,9477086	0,741097	0,74417	0,738845
3	3	2	6,37046575012	7,9470434	0,743986	0,746644	0,741288
613	3	2	6,25875564318	7,9466648	0,744721	0,74749	0,742069
1185	3	2	6,1560898145	7,9465466	0,745381	0,74821	0,742737
1992	3	2	6,06322360573	7,9459934	0,746	0,748948	0,743447
1362	3	2	5,91503250237	7,945406	0,747179	0,750253	0,744641
541	3	2	5,87053713287	7,9444242	0,747483	0,750627	0,74501
960	3	2	5,86518313184	7,9441485	0,747572	0,750797	0,745162
66	3	2	5,80983166692	7,9434624	0,748438	0,751686	0,746095
757	3	2	5,78902421398	7,9431429	0,748931	0,752186	0,746616
349	3	2	5,74266296103	7,9422836	0,749223	0,752461	0,746937
1988	3	2	5,71456407356	7,9414134	0,749785	0,753016	0,747532
1891	3	2	5,63890134223	7,9401541	0,750901	0,754168	0,748674
486	3	2	5,45479546509	7,937819	0,752042	0,755392	0,749884
1073	3	2	5,28554593465	7,9366374	0,753762	0,757129	0,751572
396	3	2	5,22988813401	7,9359899	0,754001	0,757371	0,751781
2924	3	2	5,22812800424	7,9350834	0,754221	0,757611	0,752018
69	3	2	5,13681017672	7,9343147	0,754992	0,758458	0,7528
2098	5	2	4,21224943934	7,9301105	0,754387	0,758708	0,753097
1779	5	2	4,17042385095	7,9296465	0,756171	0,76055	0,754941
55	3	2	4,90940142192	7,9291787	0,757923	0,761551	0,755728
495	3	2	4,82678011025	7,9270396	0,75905	0,76266	0,756836
597	3	2	4,43844027389	7,9250722	0,763645	0,767764	0,761942
1182	3	2	4,38811459997	7,9242277	0,764484	0,76873	0,762867
997	3	2	4,31032835236	7,9229264	0,765844	0,770209	0,764299
4088	2	3	4,7908205731	7,9222808	0,768562	0,769927	0,765434
3298	3	2	4,2571801802	7,9203868	0,766618	0,770948	0,765098
3199	2	3	4,6894954688	7,9165592	0,770986	0,772382	0,767998
3066	2	2	5,22168252691	7,9158945	0,76986	0,773643	0,767577
240	2	2	4,6181319401	7,9151211	0,774989	0,779289	0,772842
1384	2	2	4,39807415876	7,9136729	0,778109	0,782478	0,775955
288	2	2	4,42257325426	7,9127874	0,778129	0,782481	0,775964
460	2	2	4,35932311158	7,9116383	0,779032	0,783335	0,776883
3785	2	2	4,31375377483	7,9102397	0,779318	0,78362	0,777155
1644	2	2	4,26416171017	7,9094405	0,779649	0,783981	0,777438
407	2	2	4,06723890738	7,908308	0,783553	0,788212	0,781519
593	2	2	3,95380225892	7,9036841	0,786697	0,791551	0,78467
1380	2	2	3,85485383697	7,9033446	0,788431	0,793322	0,786347
797	2	2	3,83221400596	7,900413	0,789003	0,793877	0,786884
2797	2	2	3,75846924879	7,899233	0,790613	0,795561	0,788331
795	2	2	3,69168622493	7,897646	0,79279	0,797566	0,790518
376	2	4	3,90659579309	7,897004	0,792391	0,794737	0,791435
1781	2	2	3,65851219674	7,896389	0,793411	0,798109	0,791144
2796	2	2	3,58689558498	7,894491	0,795232	0,800108	0,793066
3893	2	2	3,57202232945	7,894215	0,795819	0,800905	0,793767
3374	2	6	3,18004744069	7,89306	0,797008	0,799384	0,794923
215	2	2	3,50956722426	7,891588	0,796555	0,801679	0,794488
1775	2	2	3,48509456646	7,890387	0,796517	0,801735	0,794461
631	2	4	3,60809706898	7,889968	0,799112	0,801763	0,798317
2096	2	2	3,42311834496	7,889922	0,798729	0,803943	0,796611
80	2	2	3,33530932735	7,889808	0,800895	0,806165	0,798689

1895	2	4	3,54657207749	7,888066	0,80012	0,802813	0,799407
1368	2	5	3,1441378277	7,884505	0,802776	0,805256	0,80177
3799	2	3	3,35960063834	7,882548	0,803606	0,806243	0,80144
2195	2	3	3,19876518572	7,87873	0,807278	0,810298	0,805461
3382	2	4	3,1074395039	7,878606	0,811672	0,814547	0,811134
2185	2	3	3,07178999928	7,876751	0,812177	0,815447	0,810556
2697	2	3	2,946710817	7,874624	0,81513	0,818636	0,813399
1181	2	2	3,04160490679	7,87215	0,813173	0,8187	0,811146
2694	2	3	2,8439071168	7,871277	0,818207	0,821766	0,81647
1105	2	2	2,84674389261	7,868752	0,816323	0,822149	0,81421
4667	2	2	2,82624471282	7,86867	0,817475	0,823307	0,815372
4087	2	5	2,67068851159	7,866333	0,820815	0,82378	0,820231
267	2	2	2,81235473681	7,865651	0,818842	0,824722	0,816799
1737	2	6	2,63149773578	7,865056	0,821529	0,824414	0,819891
1106	2	2	2,77804017413	7,862696	0,819768	0,825692	0,817761
2499	2	2	2,7591635312	7,86249	0,820789	0,826879	0,818802
1742	2	6	2,56538819906	7,858716	0,824896	0,82786	0,823489
3175	2	2	2,68757613283	7,856997	0,822905	0,829129	0,820797
4274	2	3	2,62977015498	7,855727	0,826865	0,830763	0,825284
1163	2	2	2,60425194815	7,85372	0,826741	0,832878	0,824494
361	2	4	2,55894431818	7,852351	0,831229	0,834661	0,830682
1092	2	2	2,48128029852	7,851258	0,830433	0,836712	0,828368
456	3	2	2,41405345899	7,848523	0,832074	0,837884	0,83107
199	2	3	2,44159038711	7,848288	0,835718	0,839478	0,834069
2417	2	2	2,43907073465	7,847426	0,833917	0,840255	0,831847
1192	3	2	2,38629126267	7,83983	0,834725	0,840589	0,833675
3687	2	6	2,25182765393	7,836722	0,842754	0,845402	0,841192
1199	2	2	2,33587069766	7,833858	0,839386	0,845562	0,837308
1065	2	2	2,24498596227	7,831619	0,842568	0,848588	0,840299
214	2	2	2,23125392807	7,828174	0,844284	0,850423	0,842038
1167	2	2	2,1996819076	7,824201	0,845983	0,852191	0,84378
280	2	2	2,18297865468	7,820021	0,848746	0,854721	0,846752
4697	4	2	2,21230968663	7,817442	0,848078	0,853207	0,847476
237	2	3	2,13814649794	7,816312	0,853049	0,857438	0,851493
1264	3	2	2,11855789477	7,815489	0,852033	0,857665	0,85118
3107	2	2	2,06579161409	7,814321	0,854074	0,860007	0,85189
1170	3	2	2,10308544072	7,813988	0,855033	0,860652	0,854059
37	2	4	2,02880694947	7,813356	0,859353	0,862546	0,858853
1738	3	2	2,04687613685	7,809717	0,858143	0,863697	0,85714
3295	2	2	2,03111857977	7,808884	0,858139	0,863945	0,855985
192	2	3	2,01063408156	7,808383	0,861573	0,865659	0,859953
248	3	2	2,01839682963	7,807417	0,860316	0,86571	0,859373
4252	3	2	1,96099807233	7,804366	0,862791	0,867916	0,861783
50	2	4	1,95820336834	7,803885	0,865055	0,868313	0,864742
779	2	3	1,95482276439	7,801703	0,865088	0,869055	0,863638
3187	2	2	1,93366436401	7,798922	0,86442	0,870117	0,862316
110	3	2	1,90285847011	7,798906	0,868066	0,873075	0,866962
11	2	4	1,90433939928	7,796197	0,869374	0,872504	0,868978
3363	4	2	1,88439731814	7,791419	0,868924	0,873881	0,868049
19	2	4	1,82522708685	7,790099	0,873538	0,876401	0,873187
118	3	2	1,87765285107	7,789341	0,871743	0,876739	0,870702
345	3	2	1,80568430622	7,787943	0,874901	0,880067	0,873954
30	3	2	1,77912048593	7,78343	0,876433	0,881546	0,87549
362	4	2	1,7778197973	7,779115	0,877151	0,88156	0,876453
1975	2	3	1,7662554179	7,778462	0,877262	0,88136	0,875733
54	3	2	1,74899400754	7,777117	0,880518	0,885183	0,879573
1782	2	2	1,7345584445	7,773005	0,881253	0,886278	0,87922

1735	3	2	1,67967904069	7,771705	0,887177	0,891601	0,886045
60	3	2	1,62270523288	7,770409	0,887918	0,892529	0,886692
238	4	2	1,62463276571	7,761259	0,889754	0,893931	0,888769
910	4	2	1,57091699435	7,752751	0,894024	0,89796	0,893045
188	4	2	1,55824189807	7,749244	0,896755	0,9005753	0,895611
26	3	2	1,51648279289	7,744498	0,9007176	0,9046008	0,899692
4392	4	2	1,49880575533	7,741801	0,9026348	0,9058968	0,9013529
2398	3	2	1,48140357475	7,741784	0,9028618	0,9068474	0,9017466
57	3	2	1,44811356321	7,736511	0,9059682	0,9096758	0,9047131
9	3	2	1,428793164	7,731339	0,9105581	0,9138797	0,9093735
41	3	2	1,3806179918	7,722321	0,912748	0,9160439	0,9116161
53	3	2	1,31728503403	7,71768	0,9169059	0,9201538	0,9157106
33	3	2	1,30325319376	7,704868	0,9211701	0,9240553	0,9200072
59	3	2	1,27684123397	7,69578	0,9238005	0,9266193	0,9228151
1576	4	2	1,24217559648	7,681245	0,9268337	0,9292034	0,9257389
22	3	2	1,19002469111	7,677803	0,9313345	0,9339156	0,9301374
24	3	2	1,13946608758	7,66722	0,9346826	0,9369023	0,9336356
27	3	2	1,12294653831	7,658251	0,9382512	0,9403404	0,9371148
3122	2	2	1,07742865803	7,642103	0,9398103	0,9418061	0,9378762
46	3	2	1,0369023152	7,633495	0,9451104	0,9469378	0,9440451
158	2	2	1,02792807272	7,615694	0,9451677	0,9469976	0,9431735
2296	6	2	0,979893970983	7,612164	0,946269	0,9476808	0,9454607
378	5	2	0,941805166914	7,604001	0,949882	0,9511735	0,948789
892	2	2	0,981564725537	7,601678	0,9499097	0,9514771	0,9479516
48	2	2	0,943898515968	7,592932	0,9524679	0,9539362	0,9507114
39	3	2	0,933815976612	7,590318	0,9560623	0,9575181	0,955111
3140	2	2	0,900777189171	7,57287	0,9570958	0,9583616	0,9554224
3599	2	2	0,86043108711	7,568095	0,9596552	0,9607851	0,9580137
91	3	2	0,832398521309	7,565588	0,9617016	0,9628065	0,9608266
7	2	2	0,829328614079	7,550175	0,9637588	0,9647868	0,9622868
204	3	2	0,814875348889	7,548382	0,9655478	0,9666237	0,9647422
62	5	2	0,763549615117	7,540398	0,9656375	0,9662498	0,9646415
485	2	2	0,796427809721	7,538877	0,9664236	0,967186	0,9649617
35	3	2	0,778515601431	7,53217	0,9684	0,9692723	0,9676959
45	3	2	0,744979500966	7,516717	0,9712478	0,972014	0,9705095
632	4	2	0,741929260863	7,513245	0,9719397	0,9725886	0,9710557
2895	13	2	0,710453084706	7,493231	0,9713403	0,972098	0,9711774
47	4	2	0,687845319896	7,492559	0,9743248	0,9748753	0,9736749
4264	5	2	0,674826026096	7,488476	0,9751868	0,9756013	0,9745189
1707	2	2	0,679138037706	7,481961	0,9761779	0,9768109	0,9750485
4206	15	2	0,730466556229	7,476371	0,9770413	0,9774883	0,9766682
28	6	2	0,650336603278	7,471258	0,9785162	0,9789352	0,9780803
114	3	2	0,633890978757	7,468882	0,9792355	0,9797969	0,9787593
1758	2	2	0,615497920099	7,453825	0,9795543	0,9800532	0,9786268
332	3	2	0,564225033723	7,452358	0,981695	0,9820891	0,9810392
109	10	2	0,561542262023	7,449652	0,9815527	0,981942	0,9811328
1532	17	2	0,489762648931	7,43716	0,9817528	0,982123	0,981175
635	6	2	0,560901544475	7,435575	0,9821584	0,9825639	0,9817348
58	2	2	0,571572051121	7,433848	0,9826856	0,9830845	0,9819491
160	7	2	0,565612499601	7,431262	0,9828079	0,9832533	0,9825849
299	4	2	0,535852303969	7,430903	0,9852594	0,9854827	0,9847788
2325	3	3	0,533857960694	7,410909	0,9851783	0,9856188	0,9845634
1540	2	2	0,518254107805	7,409204	0,9860062	0,9862988	0,9854184
73	6	2	0,500670000037	7,401387	0,9881507	0,9882552	0,9878121
246	3	2	0,455808404038	7,398848	0,9882507	0,9885637	0,9879466
432	3	2	0,417459964021	7,380378	0,99034726	0,99047645	0,9899426
254	3	2	0,413227022801	7,368881	0,99151833	0,99172907	0,99127878

3089	16	3	0,395774019436	7,359119	0,99155701	0,99173226	0,99141958
1179	3	3	0,344555905407	7,34825	0,99216191	0,99237867	0,99182393
3274	2	3	0,355914409963	7,345165	0,99262144	0,99267713	0,99200826
1288	2	2	0,358457390959	7,335563	0,99329124	0,99345316	0,99297011
2108	9	2	0,330836075191	7,328378	0,99522943	0,99528758	0,99501378
93	2	2	0,317012871609	7,323402	0,99532404	0,99545429	0,99509898
1574	18	2	0,154664028287	7,322667	0,99530491	0,99536888	0,99515782
821	4	2	0,272907993696	7,318407	0,99581361	0,99584739	0,99561947
190	2	2	0,282321374724	7,315603	0,99582809	0,99590813	0,99564494
377	15	2	0,0196999044841	7,315254	0,99598239	0,99604983	0,99582927
257	3	2	0,28703098077	7,31115	0,99647521	0,99656415	0,99636689
628	2	2	0,251913044527	7,302849	0,99681131	0,99692285	0,99669251
1728	2	3	0,246948243634	7,289917	0,99687359	0,99692121	0,99663776
661	2	2	0,250993197018	7,280009	0,9973357	0,9973695	0,99720526
586	2	2	0,21265795897	7,275454	0,99798496	0,99801709	0,99790798
185	3	2	0,189826745133	7,273837	0,99794579	0,99803082	0,99793404
0	2	2	0,177097696455	7,271701	0,99851725	0,99855842	0,99847043
1599	2	2	0,154373408982	7,256637	0,99865636	0,99866711	0,99859649
70	3	2	0,115596266731	7,251868	0,99895915	0,999001252	0,99893668
2045	7	2	0,169028575652	7,246977	0,999188757	0,999215384	0,999172834
728	2	2	0,149191959935	7,241471	0,999230712	0,999277631	0,999232377
74	2	2	0,118454956616	7,232906	0,999511037	0,999538327	0,999513921
122	2	2	0,0942361888881	7,224785	0,999515273	0,999541157	0,999509079
4269	3	2	0,0163463141936	7,219785	0,9996749	0,999706493	0,999686005
3070	2	2	0,0641130851777	7,212234	0,999743876	0,999802877	0,999771438
3032	2	3	0,0380047202535	7,210505	0,99977587	0,9998017	0,999792331
36	2	2	0,0247104509456	7,208344	0,999844683	0,999878428	0,999871691
Tiempos de ejecución: real:70m14.144s,user:208m40.536s,sys:94m45.105s							

Tabla A.11: Resultados no dominados para la imagen de prueba calhouse_-236.jpg



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.11.11: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO – CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.9.

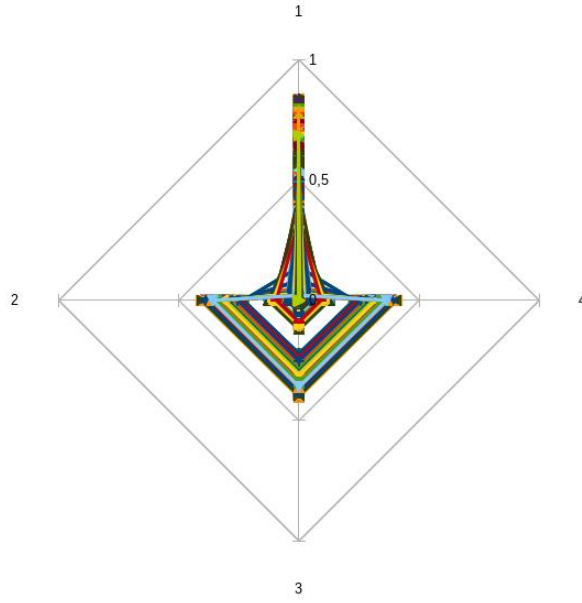


Figura A.12.12: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.11.

Tabla A.12: Tabla de correlación entre métricas para la imagen `calhouse_236.jpg`

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0,9222	1		
$SSIM_G$	-0,9171	0,9998	1	
$SSIM_B$	-0,9215	0,9999	0,9998	1

A.12 Imagen de prueba `calhouse_237.jpg`

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
Tiempos de ejecución:							

Tabla A.13: Resultados no dominados para la imagen de prueba `calhouse_237.jpg`



(a) ID=0



(b) ID=1



(c) ID=23



(d) ID=24



(e) ID=56



(f) Imagen Original

Figura A.13.13: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO – CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla A.13.

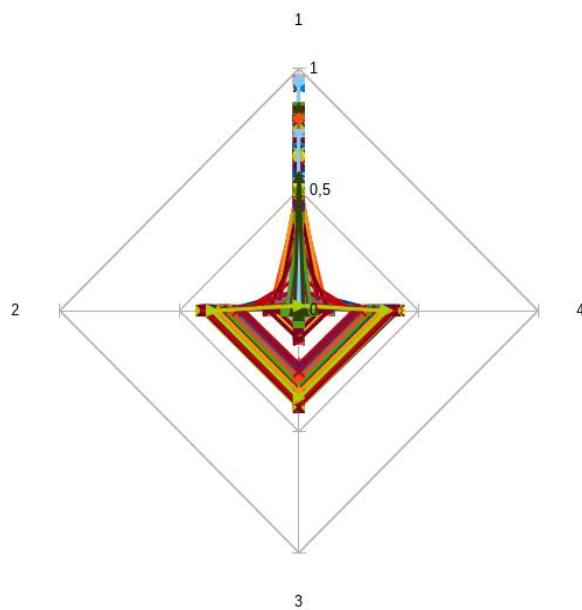


Figura A.14.14: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla A.13.