



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

Noviembre - 2017

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

Luis Guillermo Moré Rodríguez

Aprobado en Agosto 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.
33 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

[INSERTE ABSTRACT AQUI]

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

Author: Luis Guillermo Moré Rodríguez

Advisor: Diego Pedro Pinto Roa, Dr.

SUMMARY

[INSERT ABSTRACT HERE]

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
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. Ecualización del Histograma	4
2.2. Espacios de Color Adoptados	4
2.2.1. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)	6
2.2.2. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) .	6
2.2.3. Entropía de la imagen	7
2.2.4. Índice de Similaridad Estructural	7
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO Y PRO-	
PUESTA	9
3.1. Formulación del problema planteado	9
3.2. Propuesta	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS	
FUTUROS	16

5.1. Trabajos futuros	17
---------------------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
-----------------------------------	-----------

.1. Imagen de prueba calhouse_230.jpg	20
.2. Imagen de prueba calhouse_231.jpg	23
.3. Imagen de prueba calhouse_233.jpg	27
.4. Imagen de prueba calhouse_234.jpg	30

LISTA DE FIGURAS

1.1. Imagen en escala de grises e imagen con contraste mejorado para posterior utilización.	2
2.1. Diagrama esquemático del cubo que representa al espacio de colores <i>RGB</i> . Se pueden apreciar algunos colores notables.	5
4.1. Enhanced Image using [MB]. $\mathcal{H}_{\mathcal{Y}} = 0,788927$, $SSIM_R = 0,000204143$, $SSIM_G = 0,0000526475$, $SSIM_B = 0,0000518143$	13
4.2. Imágenes original y resultantes para la imagen de prueba Casa 1 .	13
4.3. Frente Pareto dibujado utilizando datos de la Tabla 4.2	14
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 1.	22
2. Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 1.	23
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 2.	26
4. Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 2.	27
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 3.	29
6. Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 3.	30

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 4.	32
8.	Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 4.	33

LISTA DE TABLAS

4.1.	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	12
4.2.	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	14
4.3.	Parámetros de entrada para <i>MOPSO</i>	14
1.	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-230.jpg</i>	21
2.	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-231.jpg</i>	25
3.	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-233.jpg</i>	28
4.	Resultados no dominados para la imagen de prueba <i>calhouse_-234.jpg</i>	31

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Imagen original.....	??
\mathbb{Z}	Conjunto de números enteros	??
\mathbb{R}	Conjunto de números racionales	??
m	Valor asociado a un píxel dentro de un espacio de color	??
c	Componentes del valor asociado a un píxel.....	??
j	Nivel de intensidad	??
f_k	Componentes de f	??
L	Máximo nivel de intensidad de una imagen.....	??
$h_{f_k}(j)$	Histograma del canal f_k	??
n_j	Cantidad de ocurrencia de la intensidad j en f_k	??
g	Elemento estructurante	??
(u,v)	Coordenada espacial que representa un píxel de la imagen....	??
(s,t)	Coordenada espacial del elemento estructurante.....	??
$(f \oplus g)$	Dilatación de la imagen original f por un elemento estructurante g	??
$(f \ominus g)$	Erosión de la imagen original f por un elemento estructurante g	??
$(f \circ g)$	Apertura de la imagen original f por un elemento estructurante g	??
$(f \bullet g)$	Cierre de la imagen original f por un elemento estructurante g ??	??
WTH	Transformada de top-hat por apertura	??
BTH	Transformada de top-hat por cierre	??
f_E	Imagen con mejora de contraste.....	??
f_1	Componente R de f	??
f_2	Componente G de f	??
f_3	Componente B de f	??
w	Función de pesos	??
T	Transformada escalar de una imagen.....	??
n	Número de iteraciones	??
i	Índice de iteraciones	??

WTH_i	i -escalas de brillos	??
BTH_i	i -escalas de oscuridad	??
WTH_{i-1}^S	$(i - 1)$ -diferencias en cascada de las escalas de brillo	??
BTH_{i-1}^S	$(i - 1)$ -diferencias en cascada de las escalas de oscuridad	??
WTH_M	Valores máximos de todas las escalas de brillos	??
BTH_M	Valores máximos de todas las escalas de oscuridad	??
WTH_M^S	Valores máximos de todas las escalas de brillos por sustracción	??
BTH_M^S	Valores máximos de todas las escalas de oscuridad por sustracción	??
	??	
$E(f)$	Intensidad media de la imagen f	??
$P(j)$	Probabilidad de ocurrencia del valor j	??
ρ	Valor del píxel central dentro de una ventana	??
ι	Valor medio de los vecinos de ρ	??
ω	Contraste local	??
D	Dominio de una imagen	??
γ	Diferencia entre los canales f_1 y f_2 de una imagen	??
β	Diferencia entre un medio de $(f_1 + f_2)$ y f_3	??
σ_γ	Desviación estándar de γ	??
σ_β	Desviación estándar de β	??
μ_γ	Media aritmética de γ	??
μ_β	Media aritmética de β	??

LISTA DE ABREVIATURAS

RGB: Espacio de color RGB.

HSI: Espacio de color HSI.

HSV: Espacio de color HSV.

HE: *Histogram Equalization*.

CLAHE: *Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization*.

MMCE: *Multiscale Morphological Contrast Enhancement*.

C: *Contrast*.

CIR: *Contrast Improvement Ratio*.

CEF: *Color Enhancement Factor*.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

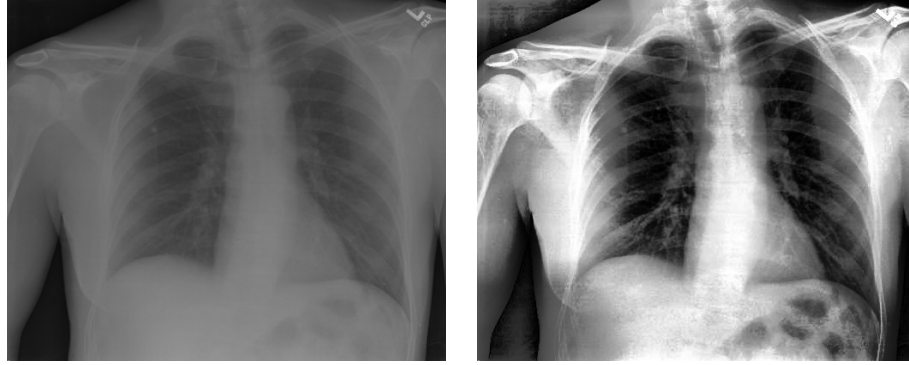
En el Procesamiento Digital de Imágenes, la Mejora del Contraste es un proceso que consiste en la transformación de píxeles de una imagen, con la finalidad de realizar cambios de manera tal a resaltar uno o más objetos dentro de la imagen tratada. El objetivo principal del proceso de Mejora del Contraste 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 aéreas,
- Imágenes astronómicas,
- Imágenes biométricas,
- Otras.

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

gris [MB, 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.

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.

- 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.

2.1. Ecualización del Histograma

2.2. Espacios de Color Adoptados

Los Espacios de Color [?] 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.

El primer espacio importante a analizar en este trabajo es *RGB* (del inglés *Red, Green, Blue*). 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 2.1 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.

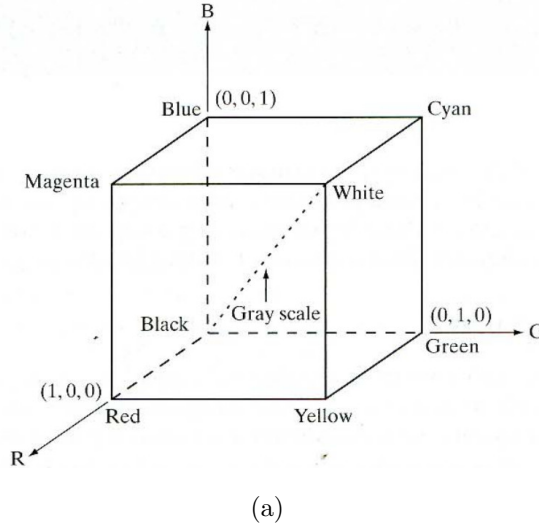


Figura 2.1: Diagrama esquemático del cubo que representa al espacio de colores *RGB*. Se pueden apreciar algunos colores notables.

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. Las imágenes originales son luego transformadas al espacio de colores *YCbCr* [GW02b], el cual es una representación ampliamente utilizada en el video digital. La principal ventaja es que 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:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65,481 & 128,553 & 24,966 \\ -37,797 & -74,203 & 112,000 \\ 112,000 & -93,786 & -18,214 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y + 1,402 \cdot (C_r - 128) \\ Y - 0,34414 \cdot (C_b - 128) - 0,71414 \cdot (C_r - 128) \\ Y + 1,772 \cdot (C_b - 128) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.2.1. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)

2.2.2. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

Multi-Objective Particle Swarm Optimization (*MOPSO*) [NDGN⁺09] es un algoritmo metaheurístico bien conocido. ES una metaheurística bio-inspirada que simula el comportamiento de las bandadas de pájaros. 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:

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (2.3)$$

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

$$\vec{v}_i(t) = w \cdot (t-1) + C_1 \cdot r_1 \cdot (\vec{x}_{p_i} - \vec{x}_i) + C_2 \cdot r_2 \cdot (\vec{x}_{g_i} - \vec{x}_i), \quad (2.4)$$

donde \vec{x}_{p_i} es la mejor solución que \vec{x}_i encontró hasta ahora, \vec{x}_{g_i} es la mejor solución que el enjambre completo encontró durante una iteración, 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.

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

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (2.5)$$

donde

$$\varphi = \begin{cases} C_1 + C_2 & \text{if } C_1 + C_2 > 4 \\ 0, & \text{if } C_1 + C_2 \leq 4 \end{cases} \quad (2.6)$$

Además, la velocidad en *MOPSO* se acota con la siguiente ecuación de cons-

tricción de velocidad:

$$v_{i,j}(t) = \begin{cases} \text{delta}_j & \text{if } v_{i,j}(t) > \text{delta}_j \\ -\text{delta}_j, & \text{if } v_{i,j}(t) \leq \text{delta}_j \\ v_{i,j}(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.7)$$

donde

$$\text{delta}_j = \frac{\text{upper_limit}_j - \text{lower_limit}_j}{2} \quad (2.8)$$

2.2.3. 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 c_1, c_2, \dots, c_n el conteo de pixeles con intensidades i_1, i_2, \dots, i_n respectivamente, y sea también:

$$p_i = \frac{c_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n c_i = N, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.9)$$

donde N es la suma total de pixeles mostrados en una imagen I y n 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_i representa la probabilidad de ocurrencia de una intensidad i . Entonces, la Entropía de la Imagen se define de la siguiente manera:

$$\mathcal{H} = - \sum_{i=0}^{n-1} p_i \log_2(p_i) \quad \mathcal{H} \in \{0, \dots, \log_2(n)\} \quad (2.10)$$

2.2.4. 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 re-

presentan una imagen original y una mejorada, respectivamente, el índice $SSIM$ se define como se muestra abajo:

$$SSIM(I, T) = \frac{(2\mu_{I_x}\mu_{T_y} + E_1)(2\sigma_{I_x T_y} + E_2)}{(\mu_{I_x}^2 + \mu_{T_y}^2 + E_1)(\sigma_{I_x}^2 + \sigma_{T_y}^2 + E_2)} \quad SSIM \in [0, 1] \quad (2.11)$$

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 $K_1 \ll 1$ es una constante pequeña; $E_2 = (K_2 L)^2$, y $K_2 \ll 1$; tanto E_1 como E_2 son constantes utilizadas para estabilizar la división cuando el denominador se acerca a cero.

Capítulo 3

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO Y PROPUESTA

En este capítulo se muestra una formulación del problema a resolver, además de la propuesta detallada de la implementación realizada.

3.1. Formulación del problema planteado

Dada una imagen a color I , con $M \times N$ píxeles, y un vector $\vec{x} = (\mathcal{R}_x, \mathcal{R}_y, \mathcal{C})$, donde \mathcal{R}_x y \mathcal{R}_y son regiones contextuales y \mathcal{C} es el *Clip Limit*, se busca un conjunto de soluciones no dominadas \mathcal{X} , que simultáneamente maximicen las funciones objetivo f_1, f_2, f_3, f_4 :

$$\mathcal{F} = [f_1(I, \vec{x}), f_2(I, \vec{x}), f_3(I, \vec{x}), f_4(I, \vec{x})]; \quad f_1, f_2, f_3, f_4 \in [0, 1] \quad (3.1)$$

donde:

- 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,
- $f_1(I, \vec{x}) = \frac{\mathcal{H}(T)}{\log_2 L}$ es la Entropía Normalizada del mapa de intensidades mejoradas T_y , como se describió arriba,
- $f_2(I, \vec{x}) = SSIM(I_R, T_R)$ 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,
- $f_3(I, \vec{x}) = SSIM(I_G, T_G)$ 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,

- $f_2(I, \vec{x}) = SSIM(I_B, T_B)$ es la medición del $SSIM$ entre I_B y T_B . I_B y T_B son los canales G 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

Algorithm 1 MOPSO-CLAHE

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

```

1: Inicializar  $\omega$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $t = 0$ ,  $lower\_limit_1$ ,  $lower\_limit_2$ ,  $lower\_limit_3$ ,  $upper\_limit_1$ ,  $upper\_limit_2$ ,  $upper\_limit_3$ ,  $\mathcal{X}$ 
2: while  $t < t_{max}$  do
3:   for cada  $i$ -ésima partícula do
4:     Calcular una nueva velocidad  $\vec{v}_i^t$  de la partícula utilizando las ecuaciones (2.4) and (2.7)
5:     Calculate new particle position  $\vec{x}_i^t$  using expression (2.3)
6:      $T = CLAHE(\vec{x}_i^t, I)$ 
7:      $f_i^t = f(I, \vec{x}_i^t)$ 
8:     if  $\vec{x}_i^t \succ \vec{x}_{p_i}$  then
9:       replace  $\vec{x}_{p_i}$  by  $\vec{x}_i^t$ 
10:    end if
11:    if  $\vec{x}_i^t \succ \vec{x}_{g_i}$  then
12:      Update the Pareto set  $\mathcal{X}$ 
13:    end if
14:     $t = t + 1$ 
15:  end for
16: end while
Ensure:  $\mathcal{X}$ 

```

El Algoritmo 1 muestra cómo PSO-CLAHE Color Multi-Objetivo (*CMOPSO-CLAHE*) es implementado, de manera a sintonizar los parámetros de *CLAHE*. Los parámetros recibidos por *CLAHE* son almacenados por una partícula $\vec{x} = (\mathcal{R}_x, \mathcal{Y}_x, \mathcal{C})$, la imagen original I se transforma a su representación $YCrCb$, y \vec{x} es aplicado al canal Y de la representación, de manera a obtener un mapa de intensidades Y_T , el cual es utilizado para realizar la transformación inversa hacia RGB , para así obtener la imagen resultante T . Las imágenes resultantes son evaluadas de acuerdo a las métricas \mathcal{H}_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. 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.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$lower_limit_{\mathcal{R}_x}$	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

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 realizar las pruebas. 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]. Para cada imagen de prueba, se realizaron 50 ejecuciones, y en promedio se encontraron 10 soluciones no dominadas. De las figuras (??,??,??) es realmente notable cómo se logra la Mejora del Contraste; también hay una relación de compromiso entre \mathcal{H} y $SSIM_R, SSIM_G, SSIM_B$. Es también notable a partir de la Figura (??) cómo los valores más altos de \mathcal{H} degradan severamente a la imagen, por lo que es necesario encontrar el balance correcto entre \mathcal{H} and $SSIM_R, SSIM_G, SSIM_B$. En la Figura (4.1) se muestra la imagen resultante mejorada utilizando la propuesta descrita en [MB]; es interesante remarcar que

la imagen resultante no alcanza una buena Mejora del Contraste; ésto es debido a que el enfoque Mono-Objetivo no utiliza la información del color de manera apropiada, y éste resultado es el mismo para otras imágenes de prueba. En la Tabla 4.2, se muestran los coeficientes de las métricas no dominadas, y en la última línea se muestran los coeficientes de métricas para la imagen (??), mejorada utilizando la propuesta Mono-Objetivo. A pesar de que se puede considerar que las métricas caen dentro del Frente Pareto, la información visual obtenida no es suficiente para afirmar que la propuesta mono-objetivo es factible para imágenes a color. Éstos resultados son similares en cada imagen de prueba utilizada.



(a) Imagen Original. $\mathcal{H}_y = 0,207231$, $SSIM_R = 1$, $SSIM_G = 1$, $SSIM_B = 1$



(b) Enhanced Image. $\mathcal{H}_y = 0,611275$, $SSIM_R = 0,00897331$, $SSIM_G = 0,00823064$, $SSIM_B = 0,00851013$



(c) Imagen mejorada. $\mathcal{H}_y = 0,0350595$, $SSIM_R = 0,416776$, $SSIM_G = 0,403636$, $SSIM_B = 0,417654$



(d) Imagen mejorada utilizando [MB]. $\mathcal{H}_y = 0,788927$, $SSIM_R = 0,000204143$, $SSIM_G = 0,0000526475$, $SSIM_B = 0,0000518143$

Figura 4.1: Enhanced Image using [MB]. $\mathcal{H}_y = 0,788927$, $SSIM_R = 0,000204143$, $SSIM_G = 0,0000526475$, $SSIM_B = 0,0000518143$

Figura 4.2: Imágenes original y resultantes para la imagen de prueba Casa 1

Tabla 4.2: Coeficientes de las métricas obtenidas utilizando CMOPSO-CLAHE para algunos resultados no dominados de la imagen en la Figura (4.2), además de los coeficientes obtenidos con el enfoque de [MB], el cual se muestra en la última línea.

	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
Result 1	0.544854	0.0155038	0.0140995	0.0149364
Result 2	0.658577	0.00551113	0.00494194	0.00529456
Result 3	0.0425715	0.394656	0.380667	0.39842
Result 4	0.0365424	0.401675	0.388628	0.402692
Result 5	0.0350595	0.416776	0.403636	0.417654
Result 6	0.611275	0.00897331	0.00823064	0.00851013
Result 7	0.0342894	0.420948	0.408035	0.421891
Result Mono	0.788927	0.000204143	0.0000526475	0.0000518143

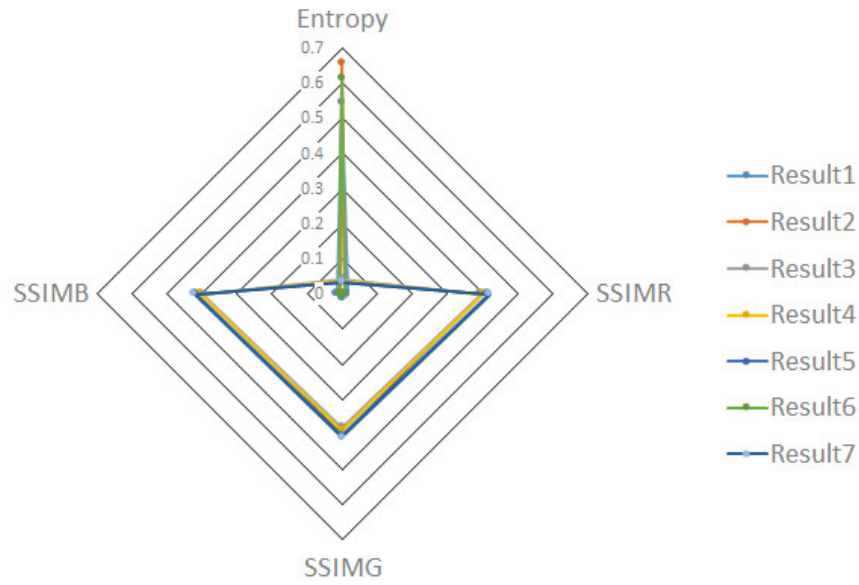


Figura 4.3: Frente Pareto dibujado utilizando datos de la Tabla 4.2

Tabla 4.3: Tabla de correlación entre métricas. Los datos fueron tomados de la Tabla 4.2.

Metrics	\mathcal{H}_y	$SSIM_R$	$SSIM_G$	$SSIM_B$
\mathcal{H}_y	1			
$SSIM_R$	-0.9826	1		
$SSIM_G$	-0.9823	0.9999	1	
$SSIM_B$	-0.9826	0.9999	0.9999	1

La Figura (4.3) muestra el Frente pareto creado a partir de los datos de la Tabla 4.2, y también la Tabla 4.3 muestra la correlación entre métricas, analizadas a partir de los resultados de la Tabla 4.2. 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 (see Algorithm (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 .

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.

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 imágenes de tamaño relativamente grande.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [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.
- [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.
- [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.
- [Kim97] Yeong-Taeg Kim. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 43(1):1–8, Feb 1997.
- [LKC14] Thomas Lillesand, Ralph W Kiefer, and Jonathan Chipman. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, 2014.

- [MB] LG Moré and MA Brizuela. Pso applied to parameter tuning of clahe based on entropy and structural similarity index.
- [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.
- [tim] *time(1) - Linux User's Manual*.
- [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.
- [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].

.1. 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	2	0.0	0.0292377	0.425724	0.412724	0.426577
1	20	2	0.0	0.030087	0.42386	0.410826	0.424771
2	17	2	0.0	0.0318866	0.421223	0.40784	0.422096
3	14	3	0.0	0.0322351	0.418567	0.405405	0.419644
4	16	2	0.0	0.0325675	0.418894	0.405988	0.420157
5	11	2	0.0	0.0340767	0.413031	0.399763	0.414117
6	7	2	0.0	0.0365424	0.401675	0.388628	0.402692
7	18	2	0.0	0.038238	0.41038	0.396594	0.414668
8	9	2	0.0	0.0391212	0.410855	0.397602	0.411904
9	13	2	0.0	0.0397372	0.406896	0.392824	0.411252
10	9	3	0.0	0.0419288	0.406245	0.393219	0.407594
11	9	2	0.0	0.0425715	0.394656	0.380667	0.39842
12	7	2	0.0	0.0488863	0.389568	0.375398	0.392996
13	6	2	0.0	0.0519342	0.389407	0.374979	0.392855
14	5	2	0.0	0.0532846	0.383024	0.369461	0.383779
15	5	2	0.0	0.0570464	0.38065	0.366103	0.383668
16	4	2	0.0	0.0581956	0.370847	0.355854	0.372697
17	2	4	0.0	0.0678334	0.332408	0.319416	0.329963
18	2	3	0.0	0.083076	0.330307	0.315432	0.327533
19	2	3	0.0	0.107766	0.300927	0.288565	0.302558
20	2	2	0.0	0.130446	0.288674	0.274897	0.29182
21	37	4	0.421103062234	0.388474	0.0796014	0.0715557	0.0737911
22	44	3	0.177772531513	0.420316	0.0571285	0.0508797	0.0542069
23	2	2	1.0	0.422673	0.0391384	0.0356485	0.0375976
24	2	2	0.966457510597	0.441196	0.0358967	0.0326292	0.0344847
25	2	2	0.909807336447	0.452317	0.0334806	0.0305298	0.0321478
26	2	3	0.871347872644	0.460282	0.0313939	0.0285593	0.0301892
27	2	3	0.838052371298	0.472741	0.0288693	0.0262626	0.0277464
28	2	3	0.78970323092	0.483203	0.0264133	0.0241076	0.0254163
29	2	3	0.763073541042	0.494502	0.0247892	0.0225578	0.0238702
30	2	3	0.734387233109	0.505156	0.0216592	0.0196863	0.0208914
31	2	2	0.689415824019	0.516532	0.0201843	0.0183705	0.0194163
32	2	2	0.674049273864	0.530366	0.0177617	0.0161534	0.0170947
33	2	2	0.620573402397	0.544854	0.0155038	0.0140995	0.0149364
34	2	2	0.594946439658	0.567288	0.0141571	0.0127951	0.0135701
35	2	3	0.525728438652	0.571877	0.0115625	0.0105159	0.011121

36	2	2	0.5	0.588363	0.0108908	0.00987159	0.0104669
37	2	3	0.483071040731	0.59779	0.00906811	0.00822819	0.00867055
38	2	5	0.456916541899	0.611275	0.00897331	0.00823064	0.00851013
39	2	2	0.428434700311	0.614437	0.00742514	0.00670994	0.00714773
40	2	3	0.390144531289	0.628389	0.00650833	0.00588966	0.00621115
41	2	4	0.38446541693	0.631133	0.00581047	0.00528148	0.00556787
42	2	3	0.37527195105	0.64904	0.0048614	0.00438096	0.00457561
43	2	3	0.31193055736	0.65892	0.00444588	0.0039587	0.00415919
44	2	3	0.310920748974	0.667173	0.00401135	0.00358585	0.00381668
45	2	4	0.290295960924	0.681955	0.00282212	0.002562	0.002621
46	2	3	0.244028880272	0.698645	0.00224598	0.00200366	0.00205784
47	2	3	0.198283113397	0.708029	0.00164594	0.0014135	0.00148235
48	2	3	0.150847773862	0.721569	0.00132173	0.00109436	0.00111522
49	2	5	0.161790895768	0.744286	0.00127126	0.00105903	0.00109671
50	2	2	0.153546446329	0.744481	0.00108487	0.000878814	0.000907648
51	3	3	0.145704588048	0.747523	0.00103455	0.000816322	0.000848165
52	2	3	0.146162992336	0.753901	0.000827484	0.000614913	0.000645663
53	2	2	0.112761751028	0.759912	0.000615229	0.00043859	0.000453515
54	2	3	0.00011646417386	0.775049	0.000299272	0.000143607	0.000141378
55	2	2	0.00178837395609	0.786418	0.000323289	0.000143135	0.000182232
56	2	2	0.0281221731315	0.788927	0.000204143	5.26475e-05	5.18143e-05
Tiempos de ejecución: real:70m10.567s.user:207m55.583s.sys:95m37.939s							

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

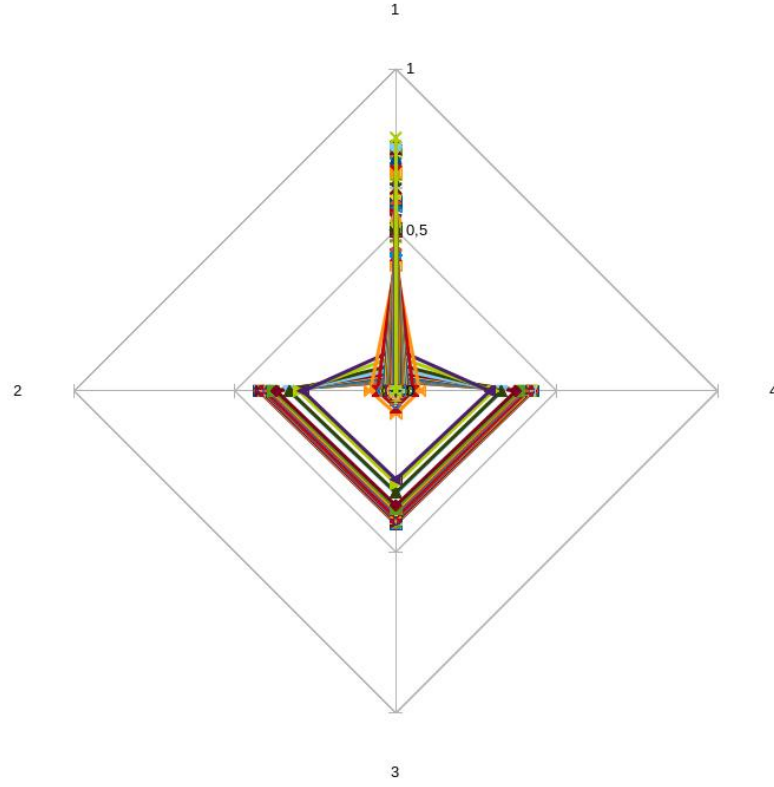


Figura 2: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 1.

.2. Imagen de prueba calhouse_231.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
0	18	3	0	0.00900173	0.267205	0.261971	0.266923
1	13	2	0	0.00985956	0.259264	0.253973	0.258887
2	10	2	0	0.00997639	0.256986	0.251503	0.256516
3	10	2	0	0.0104213	0.255358	0.250056	0.255104
4	8	2	0	0.0106044	0.253247	0.248009	0.252956
5	8	2	0	0.0108852	0.248894	0.243521	0.248512
6	5	3	0	0.0116286	0.242855	0.23726	0.242463
7	37	2	0	0.0125856	0.204869	0.200071	0.20363
8	18	2	0	0.012713	0.194229	0.189516	0.193111
9	12	2	0	0.0130296	0.188019	0.183258	0.186758
10	10	2	0	0.0133905	0.185665	0.180876	0.184348
11	9	2	0	0.0134821	0.183211	0.178539	0.181995
12	7	2	0	0.014287	0.177174	0.172057	0.1757
13	5	2	0	0.0163016	0.174128	0.168903	0.172582
14	4	2	0	0.0177784	0.168074	0.162957	0.166491
15	3	2	0	0.0226231	0.1636	0.159053	0.162368
16	2	2	0	0.026926	0.160205	0.156303	0.159384
17	2	2	0	0.0431004	0.13865	0.136192	0.138648
18	20	2	1	0.270889	0.0385879	0.0376327	0.0382134
19	18	2	1	0.271006	0.0385725	0.0376188	0.0381991
20	7	2	0.964079732103	0.276454	0.0381787	0.0368181	0.0376312

21	2	2	0.989356928034	0.282013	0.038501	0.036779	0.0381451
22	6	2	1	0.282743	0.0378731	0.0366182	0.0374679
23	3	2	0.971840503575	0.284309	0.0371586	0.0357552	0.0367035
24	4	2	0.972742419204	0.288689	0.0362972	0.0349026	0.0357714
25	2	2	0.935457791487	0.289546	0.0364327	0.0347045	0.0360937
26	2	2	0.940446088318	0.293769	0.0358847	0.0344679	0.0355097
27	6	2	0.904740520538	0.295335	0.0347202	0.0334983	0.0342668
28	9	2	1	0.298885	0.0334443	0.0324061	0.0330044
29	14	2	1	0.299743	0.0334014	0.0323744	0.0329796
30	10	2	0.913917022567	0.306106	0.0327387	0.0317938	0.032341
31	12	2	1	0.307615	0.032043	0.0310592	0.0315852
32	2	2	0.868629026061	0.309887	0.0325293	0.0309195	0.0322076
33	7	2	0.922386499146	0.312944	0.0307703	0.0297033	0.0303923
34	2	2	0.873918676927	0.314815	0.0305687	0.0293387	0.0302264
35	12	2	0.828307512256	0.315595	0.029047	0.0281777	0.0286568
36	7	2	0.90021573696	0.319267	0.0277445	0.0268512	0.0273699
37	5	2	0.858598604984	0.325659	0.0279524	0.0268406	0.0275564
38	6	2	0.856682527935	0.328166	0.0265695	0.0256397	0.0261868
39	2	2	0.810611535096	0.333691	0.0265783	0.0254337	0.0262778
40	14	2	0.826919288172	0.338436	0.0232717	0.0226148	0.0229894
41	3	2	0.747934727522	0.354162	0.0228098	0.0218175	0.0225493
42	2	2	0.715468922759	0.359465	0.0228153	0.0216203	0.0225292
43	7	2	0.738152056945	0.362255	0.0220707	0.0212203	0.0216666
44	5	2	0.710949498481	0.3623	0.0212484	0.0204049	0.0209322
45	8	2	0.71860927648	0.365558	0.0191753	0.0185399	0.0188855
46	17	2	0.638555526222	0.367131	0.0189012	0.0183635	0.0186746
47	24	2	0.888901260944	0.372819	0.0186476	0.0180095	0.0183297
48	7	2	0.643958573155	0.37555	0.0169599	0.0164014	0.016725
49	5	2	0.627441542801	0.383322	0.0160663	0.0154653	0.0158211
50	3	2	0.629994003473	0.391768	0.0161627	0.0153941	0.0159548
51	19	2	0.545081379984	0.397269	0.0143794	0.0139211	0.0141685
52	3	2	0.601135625969	0.402347	0.0145436	0.0138748	0.0143605
53	3	2	0.57753934137	0.411112	0.013378	0.0127763	0.0131599
54	2	2	0.541426023964	0.41398	0.0131499	0.0124833	0.0130018
55	3	2	0.544335817577	0.414029	0.0125525	0.0119757	0.0123731
56	6	2	0.548121706633	0.414094	0.0120755	0.0115387	0.0117838
57	2	2	0.515852425305	0.421322	0.011292	0.010746	0.0111554
58	31	2	0.0280991811699	0.423455	0.0107604	0.0102737	0.010496
59	33	2	0.510626077249	0.42346	0.0107601	0.0102734	0.0104956
60	3	2	0.5	0.426877	0.0107589	0.0102665	0.0106218
61	9	2	0.5	0.428904	0.0107733	0.0101945	0.0103729
62	13	2	0.5	0.431454	0.00965356	0.00927182	0.0094467
63	7	2	0.478914771532	0.435993	0.00828631	0.00795353	0.00813127
64	5	2	0.457071559114	0.442431	0.00817965	0.00780437	0.0080066
65	2	2	0.429496349756	0.446127	0.00810596	0.00772429	0.00801587
66	3	2	0.442489234125	0.447001	0.00778622	0.00745209	0.00769754
67	9	2	0.456539353563	0.45027	0.00668378	0.00648114	0.00659949
68	5	2	0.376465221858	0.456932	0.00627423	0.00605903	0.00619215
69	8	2	0.461600206088	0.460667	0.00621708	0.00592585	0.00603826
70	8	2	0.360353977865	0.462861	0.00579699	0.00562394	0.00572817
71	2	5	0.411676225675	0.471886	0.00573421	0.00559339	0.0057057
72	3	2	0.372641778915	0.475316	0.00536055	0.00515606	0.00529048
73	8	2	0.399775248471	0.475386	0.00529207	0.00510996	0.00520481
74	3	2	0.339070248196	0.47558	0.00452605	0.004307	0.00443858
75	4	2	0.351684592681	0.479774	0.00435225	0.00410036	0.00418851
76	4	2	0.349489075978	0.482928	0.00426761	0.00405113	0.00415045
77	3	2	0.337330254689	0.488762	0.00401598	0.00385289	0.00397122

78	2	2	0.30899847401	0.491558	0.00390371	0.00373161	0.00387131
79	2	9	0.278605575898	0.49243	0.00331112	0.00334138	0.00338704
80	2	2	0.309171129718	0.49718	0.00289651	0.00277638	0.00282767
81	2	9	0.22375153796	0.499764	0.00285511	0.00284174	0.0028875
82	3	2	0.300745369259	0.506126	0.00229212	0.00217746	0.00221458
83	4	2	0.263406661906	0.506628	0.00222147	0.00211851	0.00215494
84	2	2	0.251424143589	0.513605	0.00194255	0.00184685	0.00190236
85	5	2	0.243696919714	0.514978	0.00176819	0.00169965	0.00173187
86	4	2	0.209648277039	0.516483	0.00166633	0.0015921	0.00162961
87	4	3	0.266234136177	0.520381	0.00166707	0.00158428	0.0016109
88	2	4	0.248121384745	0.521675	0.00161956	0.00153988	0.00158018
89	3	2	0.213491461803	0.525156	0.00144721	0.00138333	0.00141691
90	2	2	0.191537420599	0.52922	0.00135061	0.00127997	0.00130769
91	3	2	0.183704209136	0.530389	0.00119938	0.00115064	0.00116924
92	2	3	0.178720787449	0.534519	0.00114637	0.00109067	0.00111032
93	7	2	0.241533503656	0.536006	0.00110823	0.00103223	0.00105307
94	2	2	0.167767741924	0.540966	0.000784735	0.000735661	0.000749385
95	2	3	0.165303683073	0.546799	0.000724879	0.000653544	0.000674347
96	2	2	0.14568920398	0.549775	0.00055956	0.00050608	0.000516374
97	2	7	0.0971302704582	0.551463	0.0005087	0.000484928	0.000491999
98	3	4	0.0169016006744	0.55715	0.000453264	0.000428699	0.000432725
99	2	3	0.0764136259071	0.561146	0.000201883	0.000166411	0.000174052
100	2	2	0.049662954082	0.565069	0.000189286	0.000165373	0.000167802
101	3	3	0.0412250071562	0.573604	0.000167373	0.000136933	0.000144334
102	2	2	0.0213381170565	0.573629	0.000103816	7.68E-05	7.86E-05
Tiempos de ejecución: real:70m26.492s. user:209m3.921s. sys:95m37.357s							

Tabla 2: 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 3: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla 2.

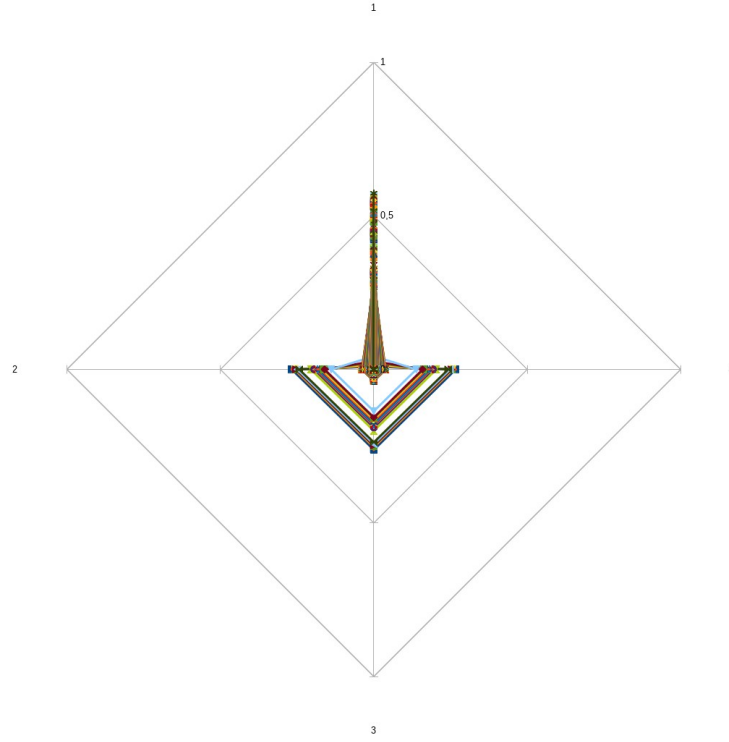


Figura 4: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 2.

.3. Imagen de prueba calhouse_233.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
0	4	2	0.0605454359216	1.08964	0.000295689	0.000153393	0.000162248
1	2	3	0.0241100460642	1.05839	0.000302083	0.000187229	0.00018095
2	3	2	0.0755634120675	1.08786	0.000329964	0.000184893	0.000199624
3	2	6	0.0362807189867	1.03646	0.000641662	0.000514385	0.000524924
4	8	3	0.103753483353	1.03239	0.00102858	0.000843436	0.000877847
5	2	3	0.166601922869	0.993392	0.00117745	0.00100106	0.00102251
6	4	3	0.197035454701	0.972543	0.00121931	0.00104515	0.00106603
7	2	3	0.232499530296	0.95589	0.00235641	0.002009	0.00206351
8	2	5	0.266574790017	0.938972	0.00280239	0.00262648	0.0026463
9	2	3	0.278743476534	0.923925	0.00292607	0.00257795	0.00266449
10	3	4	0.278646550346	0.92028	0.00292439	0.00261397	0.00266665
11	12	3	0.30091560684	0.870766	0.00350392	0.00310311	0.00316902
12	2	4	0.253592839376	0.919652	0.00348043	0.00316849	0.00322916
13	2	3	0.391124890124	0.864988	0.00550206	0.00480986	0.00499557
14	2	4	0.35510717405	0.830931	0.00598392	0.00560268	0.0056997
15	16	3	0.227910808421	0.826457	0.00687623	0.00604448	0.00619402
16	8	3	0.450962738883	0.819552	0.00842425	0.0076944	0.00785632
17	5	3	0.5	0.810249	0.00887391	0.00800675	0.00821064
18	2	3	0.534064898653	0.798087	0.0102274	0.00910215	0.00944354
19	5	3	0.571647250785	0.785827	0.011758	0.0105297	0.010857
20	2	4	0.506882563198	0.778071	0.0115198	0.0108465	0.0110746
21	2	3	0.609611782643	0.763786	0.0131498	0.0117422	0.0121901
22	3	4	0.590722339759	0.770255	0.0127545	0.0120351	0.0122763

23	2	4	0.592771396022	0.759783	0.0134854	0.0128619	0.0130943
24	10	3	0.569430012343	0.753103	0.0148294	0.0134841	0.0137764
25	2	3	0.654795564549	0.758248	0.0146595	0.013324	0.0137805
26	23	3	0.49018750213	0.745152	0.0156444	0.0140341	0.0143124
27	5	3	0.711411054066	0.75186	0.0155433	0.0142944	0.0146168
28	6	3	0.67594979599	0.742439	0.016272	0.014948	0.0152924
29	3	3	0.697388429306	0.740592	0.0161852	0.0148598	0.015301
30	2	4	0.619064681832	0.721047	0.0169986	0.0162408	0.0165372
31	12	3	0.758015111952	0.715111	0.0179455	0.0167202	0.0170063
32	2	4	0.664983118922	0.717893	0.018933	0.018076	0.0184091
33	3	3	0.835945114263	0.715581	0.0212394	0.0197281	0.0202355
34	18	4	0.235751993872	0.71698	0.0217524	0.0198408	0.0203643
35	2	4	0.71221653662	0.697186	0.0211379	0.0202178	0.0205842
36	3	3	0.841409534625	0.694649	0.024789	0.0230342	0.0236651
37	2	4	0.775805262395	0.690287	0.0242775	0.023289	0.0236959
38	6	3	0.946937444304	0.688181	0.027246	0.025366	0.0259008
39	3	3	0.898145960419	0.688406	0.027186	0.0254119	0.0260424
40	8	3	0.92952634183	0.682212	0.027619	0.026095	0.0265493
41	2	3	0.92681679413	0.664923	0.0280842	0.0260755	0.0268696
42	2	4	0.831514829931	0.682197	0.0278131	0.0267008	0.0271825
43	3	3	1	0.662133	0.0302244	0.0283526	0.0290769
44	2	3	1	0.638068	0.0319237	0.0297923	0.0307026
45	44	3	0.340457573545	0.597537	0.0430642	0.0399363	0.0405722
46	41	4	0.122685175212	0.585286	0.0791404	0.0724312	0.0744605
47	2	2	0	0.166749	0.35221	0.33188	0.347256
48	3	2	0	0.162343	0.36439	0.343949	0.35654
49	4	2	0	0.0834117	0.383713	0.363361	0.373847
50	5	2	0	0.0629735	0.391495	0.37163	0.381356
51	11	2	0	0.0619745	0.418598	0.398414	0.406889
52	26	2	0	0.0599365	0.437032	0.417224	0.424583
53	6	3	0	0.0475216	0.459573	0.445796	0.456496
54	9	3	0	0.0462856	0.470122	0.456474	0.466522
55	11	3	0	0.0443048	0.475939	0.462247	0.471704
56	2	6	0	0.0455046	0.470176	0.461747	0.47771
57	2	7	0	0.0444002	0.493213	0.484229	0.499757
58	2	9	0	0.0408697	0.499463	0.490757	0.507241
59	2	10	0	0.0359039	0.511722	0.502448	0.518851
60	2	2	0.00447401966895	1.09149	0.000183402	7.05E-05	6.21E-05
Tiempos de ejecución: real:67m22.885s.user:207m13.352s.sys:94m57.439s							

Tabla 3: 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 5: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla 3.

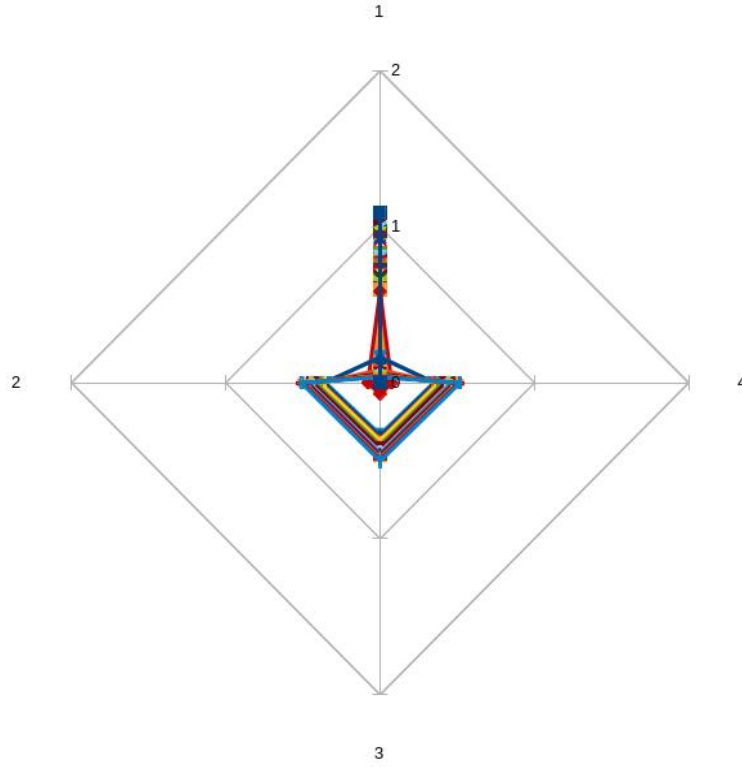


Figura 6: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 3.

.4. Imagen de prueba calhouse_234.jpg

ID	\mathcal{R}_x	\mathcal{R}_y	\mathcal{C}	$f_1(I, \vec{x})$	$f_2(I, \vec{x})$	$f_3(I, \vec{x})$	$f_4(I, \vec{x})$
2979	3	3	0.812519298752	0.511109	0.0287218	0.0274117	0.0284403
2980	4	12	0	0.0276203	0.49051	0.486184	0.493034
3091	4	2	0.853706507459	0.519737	0.027535	0.0255765	0.0267492
3097	11	2	1	0.494054	0.034029	0.032038	0.0331011
3104	20	3	0	0.0284328	0.402012	0.396043	0.401629
3123	3	3	0.739306706876	0.533226	0.024867	0.0237548	0.0245899
3125	2	2	0.731703535828	0.548753	0.0229975	0.0211807	0.0222653
3126	3	2	0.679146848174	0.557746	0.0203147	0.0187927	0.0196922
3127	2	2	0.850344549266	0.515146	0.029663	0.0272264	0.0286435
3128	14	2	0.632770576643	0.58597	0.01286	0.0122675	0.0126854
3129	53	3	0.0906614748552	0.41236	0.10348	0.0946411	0.0973958
3130	8	2	0.368264089891	0.675727	0.00441494	0.00421142	0.00434589
3131	2	2	0.827779089761	0.524632	0.0281598	0.0258405	0.0271833
3132	2	2	0	0.138669	0.231124	0.221532	0.228493
3133	37	4	0.488860216273	0.445821	0.0866204	0.0792098	0.0816776
3134	4	2	0.255668440752	0.730788	0.00268251	0.00253008	0.00260924
3135	6	2	0.912272466777	0.496642	0.0326795	0.0303633	0.0316357
3136	2	2	0.0083970078807	0.835548	0.000142314	0.000115598	0.000110237
3137	3	2	0.461160630083	0.650707	0.00852852	0.00796836	0.00830184
3138	3	2	0.73164070769	0.551425	0.0215359	0.0198995	0.0208231
3139	4	2	0.0653533397144	0.832464	0.000183395	0.000143403	0.000147903
3140	3	2	0.148486630518	0.793742	0.000731432	0.000664557	0.000679274

3141	18	2	0.572302594831	0.62303	0.00889421	0.00828233	0.00854233
3142	13	3	0	0.0292034	0.390222	0.383769	0.389344
3143	9	2	0.515175605936	0.640419	0.00871692	0.00817691	0.00844283
3144	10	2	0.645449480383	0.580588	0.0168114	0.0159317	0.0165228
3145	24	3	0	0.0277634	0.406696	0.400567	0.40603
3146	6	2	0	0.0493283	0.277246	0.269315	0.27368
3147	2	2	0.761261125963	0.54257	0.0246297	0.0226156	0.0237819
3148	5	2	0	0.0519104	0.273498	0.265907	0.270653
3149	2	2	0.926215684557	0.493326	0.0350073	0.032038	0.0337141
3150	5	3	0.907757451731	0.507807	0.0309136	0.0296258	0.0305795
3151	2	2	0.729074889936	0.553606	0.021385	0.0196689	0.0206698
3152	3	2	0	0.0846047	0.245215	0.237309	0.244065
3153	3	2	0.854113478667	0.512472	0.030045	0.027703	0.0290506
3154	7	3	0	0.0321503	0.363205	0.357271	0.362161
3155	24	2	1	0.448877	0.0337654	0.0325268	0.0334449
3156	4	2	0.780918170773	0.530471	0.0249754	0.0230687	0.0241613
3157	6	2	0.196390542599	0.78611	0.000841764	0.00080091	0.000816869
3158	2	3	0.833866902733	0.511989	0.0302699	0.0285167	0.0297871
3159	6	2	0.747192629244	0.547824	0.0229913	0.0213657	0.0222196
3160	3	2	0.80975515976	0.527355	0.0266691	0.0245697	0.0257519
3161	7	2	0	0.0413656	0.289774	0.282049	0.285934
3162	3	3	0.725942475481	0.553035	0.0211689	0.0201818	0.0209119
3163	2	3	0.0869925259854	0.831217	0.000254231	0.000202246	0.000220666
3164	3	2	0.101165992212	0.829471	0.000258416	0.000220973	0.000231715
3165	6	2	0.846937821181	0.518807	0.027765	0.0259249	0.0270216
3166	3	2	0.305290000047	0.710093	0.00364066	0.0034385	0.00355669
3167	11	2	0	0.0396638	0.306313	0.297956	0.302221
3168	7	2	0.219179192327	0.773407	0.00121588	0.00114323	0.00117378
3169	5	2	0.227660930211	0.738358	0.00171736	0.0016441	0.00168794
3170	26	6	0.511796994819	0.445776	0.0921568	0.0871899	0.0896835
3171	3	2	0.225128485738	0.755389	0.00142469	0.00136878	0.00139945
3172	2	3	0.0112353502775	0.836594	0.000146742	0.000117982	0.000110062
3173	17	2	0.73226869704	0.574325	0.0167192	0.0159348	0.0164249
3174	11	3	0	0.0296307	0.381211	0.374829	0.380207
3175	4	2	0.863033788718	0.502655	0.0311266	0.0287067	0.03005
3176	14	2	0.937018260677	0.502234	0.0314391	0.0298899	0.0308901
3177	3	3	0.578272628825	0.582351	0.0151525	0.0144716	0.0149766
3178	6	2	0.682234104882	0.564373	0.0195332	0.0183163	0.019096
3179	18	2	0.783902002406	0.533793	0.0238637	0.022623	0.0232914
3180	4	3	0.403556720027	0.65922	0.00689137	0.00665012	0.00686885
3181	2	3	0.885217278433	0.492458	0.0341363	0.0321934	0.0336531
3182	11	2	0.317936251338	0.723333	0.00331185	0.00315496	0.00324682
3183	15	2	0.5	0.666303	0.00554846	0.00524035	0.00540413
3184	12	2	0.522610271857	0.601996	0.0103419	0.00983332	0.010186
3185	11	2	0.95	0.513048	0.0288726	0.0272513	0.0282724
3186	3	3	0.656165744218	0.571977	0.0180757	0.0172713	0.0179017
3187	13	2	0.956428228721	0.524695	0.0260812	0.024745	0.0255167
Tiempos de ejecución: real:69m51.735s, user:207m51.484s, sys:94m33.030s							

Tabla 4: 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 7: Imágenes visualmente relevantes obtenidas mediante *CMOPSO* – *CLAHE*. Las variables y decisión y métricas de las imágenes se muestran en la tabla 4.

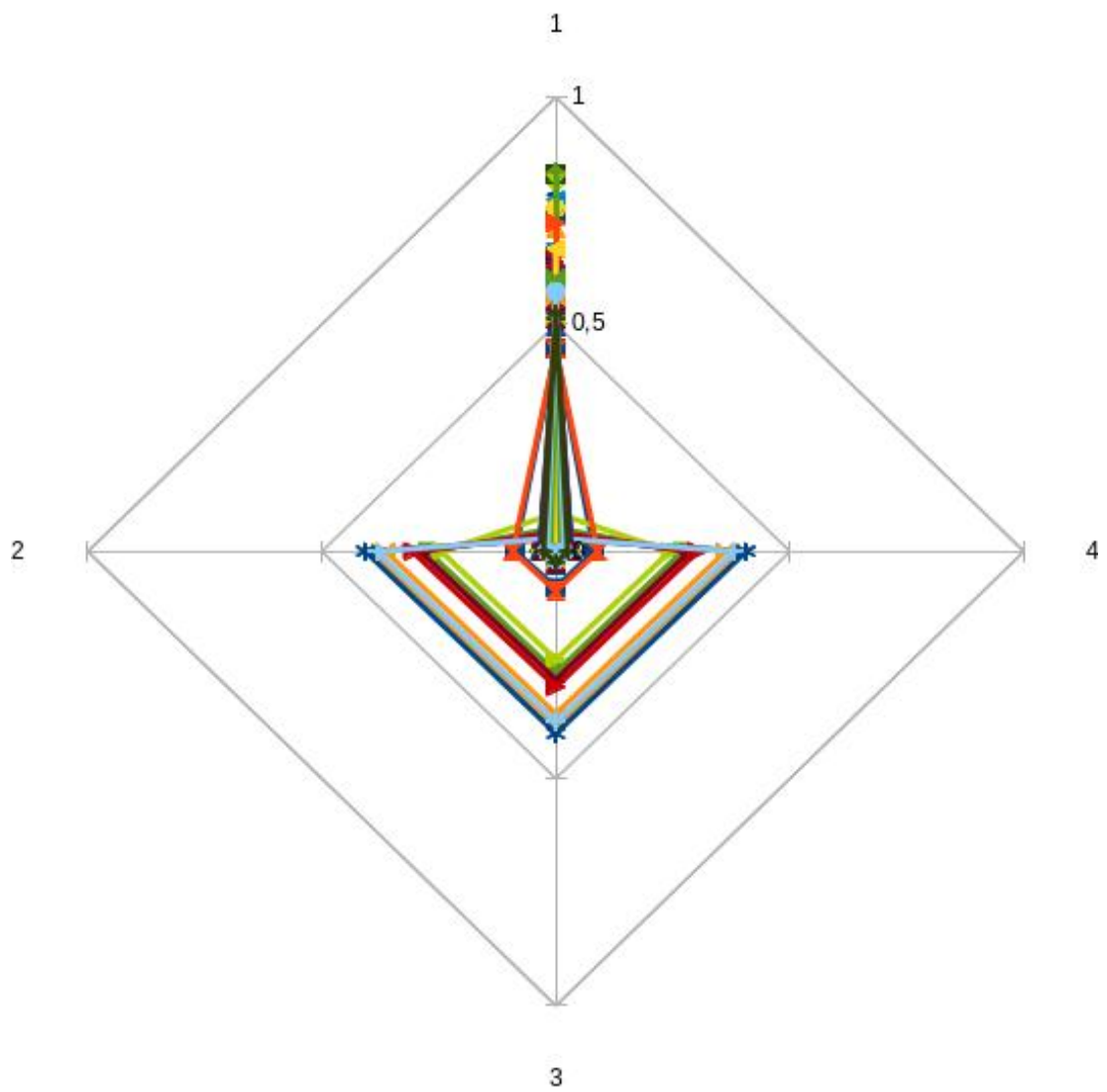


Figura 8: Frente pareto que contrasta los objetivos de las soluciones no dominadas. para los resultados de imágenes que se muestran en la tabla 4.