

# Comparación de rendimientos de técnicas de mejora de imagen basadas en ecualización de histogramas: Método Tradicional, CLAHE y WTHE

Edis Fernández

Facultad Politécnica/Universidad Nacional de Asunción  
San Lorenzo, Central, Paraguay  
adis8@fpuna.edu.py

Samuel Torres

Facultad Politécnica/Universidad Nacional de Asunción  
San Lorenzo, Central, Paraguay  
torressamuel.ferna@fpuna.edu.py

## Abstract

La mejora del contraste en imágenes digitales es un proceso fundamental para diversas aplicaciones científicas y médicas. Sin embargo, los métodos tradicionales de ecualización de histograma suelen provocar sobrecontraste o pérdida de detalles. En este trabajo se compara las técnicas de mejora de imágenes basadas en ecualización de histograma: la ecualización tradicional, la ecualización adaptativa por contraste limitado (CLAHE) y Ecualización de Histograma Ponderada con Umbral (WTHE). El objetivo es evaluar la eficacia de cada método en la mejora del contraste y la preservación de detalles en imágenes con distintos niveles de iluminación y complejidad visual. Para ello, se utilizan métricas cuantitativas como el Entropía, Contraste, PSNR y AMBE, además de evaluaciones cualitativas visuales. Los resultados muestran que, aunque la ecualización tradicional mejora el contraste global, tiende a perder detalles en zonas oscuras o muy brillantes. CLAHE presenta un mejor equilibrio entre mejora de contraste y preservación de detalles locales, mientras que WTHE demuestra una mayor capacidad para mantener la naturalidad de la imagen. Se concluye que, dependiendo del tipo de imagen y del propósito de la mejora, CLAHE y WTHE ofrecen ventajas significativas sobre la técnica tradicional.

## CCS Concepts

• Computing methodologies → Image processing;

## Keywords

Procesamiento de Imágenes, Ecualización de Histogramas, CLAHE, Algoritmo de Mejora de Imagen, WTHE, Ecualización Tradicional, Escala de Grises, Contraste

## 1 Introducción

La mejora del contraste en imágenes digitales representa un desafío clave en el procesamiento de imágenes, particularmente cuando los niveles de gris se concentran en una zona restringida del intervalo dinámico. Este fenómeno genera imágenes con poco contraste que pueden afectar su calidad visual y limitar su utilidad en aplicaciones cruciales como imágenes médicas, análisis de imágenes satelitales y fotografía profesional. En este contexto, la ecualización de histogramas surge como una técnica fundamental para realzar el contraste de las imágenes, mediante la redistribución de los niveles de intensidad más frecuentes en todo el rango dinámico disponible. Sin embargo, aunque es eficaz y de implementación sencilla mediante herramientas como OpenCV, su uso puede introducir limitaciones como el ruido y la pérdida de detalles en imágenes con alto contenido de información. Motivados por la necesidad de abordar estas

deficiencias, el objetivo de este trabajo es evaluar y comparar el rendimiento de las técnicas de mejora de imagen: la ecualización de histograma tradicional, CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) y un algoritmo adicional seleccionado de la literatura existente. Para esta evaluación, se utilizarán una serie de métricas específicas que incluyen parámetros como entropía, ruido (medido mediante PSNR) y contraste (AMBE), analizando su desempeño en imágenes con diferentes características. El artículo está organizado de la siguiente manera: en el marco teórico, se exploran los conceptos básicos y las técnicas de mejora de imágenes; en la sección de experimentos, se describe detalladamente la metodología aplicada y los datos utilizados; en resultados, se analizan y comparan los hallazgos obtenidos; finalmente, y en la conclusión, se presentan los aportes finales.

## 2 Marco Teórico

El histograma es un diagrama de barras cuyas abscisas representan los niveles de gris de una imagen, y las ordenadas, las frecuencias relativas de los distintos niveles de gris, es decir, la cantidad de puntos asociados a cada nivel de gris, dividido por la cantidad total de puntos de la imagen. [1].

$$P_k = \frac{n_k}{n}$$

- $n_k$  = cantidad de píxeles de nivel gris  $k$
- $n$  = cantidad total de píxeles

Cuando los niveles de gris de la imagen se concentran en una zona del intervalo, decimos que la imagen posee poco contraste. Para aumentar el contraste de la imagen se realiza la operación de ecualización del histograma[2]. El objetivo de la ecualización del histograma es ampliar el rango dinámico de los niveles de gris, para acentuar el contraste visual de la imagen.

El proceso de ecualización de histograma implica varios pasos. Primero, se calcula el histograma de la imagen original. A continuación, se deriva una función de distribución acumulativa (CDF) del histograma. Luego, este CDF se normaliza para asignar los valores de píxeles originales a nuevos valores de intensidad, distribuyendo efectivamente los valores de intensidad más frecuentes en todo el rango. Finalmente, la imagen se reconstruye utilizando estos nuevos valores de intensidad, lo que da como resultado un contraste y un detalle mejorados.

La ecualización de histograma se utiliza ampliamente en diversos campos, incluidos los de imágenes médicas, teledetección y fotografía. En imágenes médicas, por ejemplo, puede mejorar la visibilidad de estructuras anatómicas en radiografías o resonancias magnéticas, lo que ayuda en el diagnóstico. En teledetección, ayuda

a analizar imágenes de satélite mejorando la visibilidad de las características del terreno. Los fotógrafos suelen utilizar esta técnica para mejorar la calidad general de sus imágenes, haciéndolas más atractivas visualmente.

A pesar de sus ventajas, la ecualización de histograma tiene algunas limitaciones. Un inconveniente importante es que puede introducir ruido en la imagen, especialmente en zonas con bajo contraste. Además, es posible que no funcione bien con imágenes que tengan un alto nivel de detalle, ya que la mejora puede provocar la pérdida de características importantes.

Varias técnicas avanzadas se basan en los principios de ecualización de histograma. Una de esas técnicas, es la ecualización de histograma adaptativa limitada por contraste (CLAHE), la cual aborda el problema del ruido limitando la amplificación del contraste en áreas homogéneas, proporcionando una mejora más equilibrada en toda la imagen. La otra técnica, la cual estaremos aplicando, es la denominada WTHE (Weighted Thresholded Histogram Equalization).

Muchos softwares y bibliotecas de procesamiento de imágenes, como OpenCV, ofrecen funciones integradas para la ecualización de histogramas. Estas herramientas permiten a los usuarios aplicar la técnica con facilidad, brindando opciones para métodos tanto globales como locales[3].

## 2.1 Métricas de evaluación de mejora de imagen

La calidad de la imagen puede degradarse debido a las distorsiones durante la adquisición y el procesamiento de la imagen.

- Relación señal-ruido máxima (PSNR): La PSNR se deriva del error cuadrático medio e indica la relación entre la intensidad máxima de píxeles y la potencia de la distorsión. La métrica PSNR es fácil de calcular, pero es posible que no se corresponda con la calidad percibida.
- Error de Brillo Medio Absoluto: Es definido como la diferencia absoluta entre el brillo medio de la imagen de entrada y la imagen resultado, midiendo el desempeño en la preservación del brillo original (o intensidad de gris)
- Entropía: Es una métrica muy útil que determina la riqueza de los detalles en la imagen resultado
- Contraste: El valor del contraste de la imagen resultado debe ser mayor al de la imagen de entrada para suponer una mejora.

## 2.2 Técnicas de Ecualización de Histograma

La ecualización de histograma incluye múltiples métodos diseñados para mejorar el contraste de imágenes digitales.

## 2.3 Ecualización de Histograma Tradicional

Esta técnica redistribuye los niveles de intensidad de la imagen utilizando la función de distribución acumulativa (CDF) normalizada. Es una aproximación global que mejora el contraste, pero puede introducir ruido o artefactos en zonas homogéneas.

## 2.4 CLAHE: Ecualización Adaptativa Limitada por Contraste

: es una variante de la ecualización de histograma que se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de procesamiento de imágenes para mejorar el contraste de la imagen y al mismo tiempo evitar la sobreamplificación del ruido y preservar los detalles de la imagen. La idea principal detrás de CLAHE es realizar la ecualización de histograma localmente, en regiones más pequeñas de la imagen, en lugar de globalmente.

En la ecualización de histograma tradicional, la imagen se divide en pequeñas regiones o subimágenes que no se superponen, y cada subimagen se ecualiza individualmente. Este proceso puede dar lugar a una sobreamplificación del ruido en las subimágenes con bajo contraste, dando lugar a una imagen ruidosa y de aspecto artificial. Por el contrario, CLAHE divide la imagen en regiones superpuestas y aplica la ecualización de histograma a cada región por separado. Esto permite mejorar el contraste preservando los detalles locales y evitando la sobreamplificación del ruido.

CLAHE implica dos pasos principales: mejorar el contraste y limitar el contraste. En el primer paso, se aplica una ecualización de histograma local a cada pequeña región de la imagen, lo que da como resultado un mayor contraste. En el segundo paso, se limita el contraste de la imagen aplicando una función no lineal al histograma, de manera que se reduce el número de píxeles con intensidades muy altas o muy bajas. La función no lineal se define mediante un parámetro llamado límite de recorte, que determina la cantidad de limitación de contraste que se aplicará.

El límite de clip es un parámetro importante en CLAHE. Determina la cantidad máxima de amplificación de contraste que se puede realizar en cada región antes de que se limite el contraste. Si el límite de clip se establece demasiado alto, la imagen puede mejorarse demasiado y sufrir efectos de apariencia artificial, como halos alrededor de los bordes o una apariencia general descolorida. Por otro lado, si el límite de clip se establece demasiado bajo, la mejora del contraste puede no ser suficiente y la imagen puede parecer opaca.

CLAHE tiene varias ventajas sobre la ecualización de histograma tradicional. En primer lugar, puede preservar los detalles locales y mejorar el contraste de forma más eficaz. En segundo lugar, puede evitar la sobreamplificación del ruido, lo cual es particularmente importante en aplicaciones de imágenes médicas, donde las imágenes pueden tener ruido. Finalmente, es un algoritmo simple y computacionalmente eficiente, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en tiempo real.

En conclusión, CLAHE es una técnica poderosa para mejorar el contraste de la imagen preservando al mismo tiempo los detalles locales y evitando la sobreamplificación del ruido. Se ha utilizado ampliamente en diversas aplicaciones, incluidas imágenes médicas, teledetección y visión por computadora. Su capacidad para adaptarse a las variaciones de contraste locales y evitar la sobreamplificación del ruido lo convierte en una herramienta valiosa para mejorar imágenes en muchos campos[4].

## 2.5 Metodo de mejora con Umbral ponderado (WTHE)

El enfoque de mejora presentado opera modificando el histograma original antes de aplicar la ecualización. Para ello, emplea una función de densidad de probabilidad (PDF) ajustada mediante ponderación y umbralización, lo que redistribuye los niveles de intensidad de manera más controlada.

La transformación se basa en un mapeo que considera los valores acumulativos del histograma procesado. Este diseño busca reducir problemas comunes de la ecualización convencional, como el realce excesivo de tonos muy repetidos o el aplanamiento del contraste en zonas con pocos píxeles.

La ventaja principal del WTHE está en su capacidad para regular la influencia de cada nivel según su frecuencia, logrando un balance entre realce visual y conservación de detalles. De esta forma, el método proporciona mayor adaptabilidad para afinar el contraste sin introducir distorsiones abruptas.

La función de densidad de probabilidad esta dada por

$$\Delta H_k = (K - 1) \cdot P_w(k) \quad (1)$$

donde  $P_w(k)$  se obtiene a través de aplicar la función de transformación  $\Omega(\cdot)$  tal que

$$P_{wt}(k) = \Omega(P(k)) = \begin{cases} P_u & \text{si } P(k) > P_u \\ \left( \frac{P(k) - P_l}{P_u - P_l} \right)^r \times P_u & \text{si } P_l \leq P(k) \leq P_u \\ 0 & \text{si } P(k) < P_l \end{cases} \quad (2)$$

La función de densidad de probabilidad (PDF) original se modifica aplicando umbrales superior  $P_u$  e inferior  $P_l$  junto con una transformación de Ley de Potencia. Los valores por encima de  $P_u$  se saturan, mientras los que se encuentran entre  $P_u$  y  $P_l$  se redistribuyen utilizando el exponente  $r > 0$ . Cuando  $r < 1$ , se otorga mayor peso a los niveles de intensidad menos frecuentes, lo que reduce el riesgo de sobre mejora y preserva detalles en regiones oscuras o claras. Por otro lado, valores  $r > 1$  se centra en los niveles más comunes, útil para realzar fondos o áreas dominantes.

Los umbrales no son fijos, sino que se adaptan dinámicamente. El límite superior  $P_u$  se calcula como un porcentaje  $\nu$  (donde  $0 \leq \nu \leq 1$ ) del valor máximo de la PDF ( $P_{\max}$ ) [3]. Por ejemplo, si  $\nu = 0.5$ ,  $P_u$  se establece en la mitad del pico de la distribución, lo que evita que los niveles más frecuentes monopolicen el rango dinámico de salida. Por otro lado, el umbral inferior  $P_l$  descarta intensidades con probabilidades insignificantes (típicamente  $\leq 2\%$ ), optimizando así la asignación del rango disponible.

$$P_u = \nu \cdot P_{\max}, \quad 0 \leq \nu \leq 1 \quad (3)$$

La transformación final se realiza mediante la función de distribución acumulativa (CDF) del histograma modificado:

$$C_{WTHE}(k) = \sum_{i=0}^k P_{u,l}(i), \quad k \in [0, K - 1], \quad (4)$$

donde  $K$  es el número de niveles de intensidad. Este enfoque garantiza una mejora de contraste consistente sin necesidad de ajustar parámetros manualmente para cada imagen, a diferencia de métodos tradicionales que requieren intervención del usuario.

## 3 Experimentos

La metodología aplicada para los experimentos fue la siguiente: Primero, la selección del dataset. Segundo, la implementación se realizó en python utilizando varias librerías, entre ellas y la más importante OpenCV. Para ilustrar el rendimiento de los métodos de mejora de imagen, se utilizaron cuatro imágenes procesadas con las distintas técnicas descritas: la imagen original, la imagen procesada con Ecualización de Histograma (HE), con CLAHE y con WTHE. A continuación, se presentan los resultados visuales de cada una.



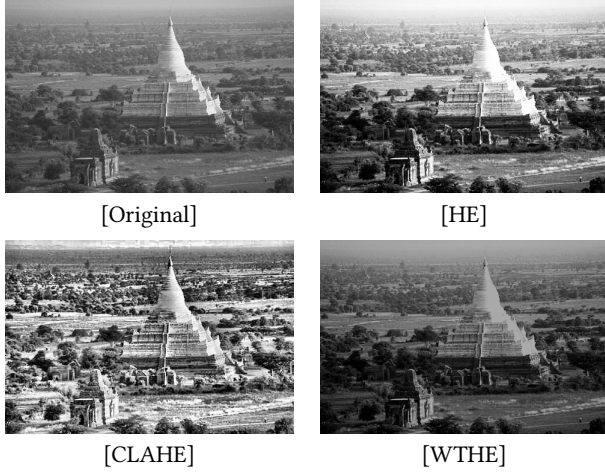
**Figure 1: Comparación visual de los métodos de mejora de imagen.**

*Análisis comparativo.* Las imágenes procesadas figura [1] revelan diferencias significativas entre los algoritmos de mejora. La ecualización de histograma (HE) aumenta notablemente el contraste global pero tiende a introducir ruido y sobreexposición en ciertas áreas. CLAHE, al aplicar una ecualización adaptativa y limitada por contraste, logra preservar mejor los detalles locales mientras evita la amplificación excesiva del ruido, especialmente visible en las texturas del suelo. Por su parte, WTHE ofrece un balance interesante mediante su enfoque ponderado y umbralizado que redistribuye los niveles de intensidad de manera más controlada, consiguiendo un contraste mejorado sin los artefactos presentes en HE. Estas diferencias visuales coinciden con los fundamentos teóricos presentados, donde cada método busca optimizar el equilibrio entre mejora de contraste y preservación de la información original.

Las imágenes procesadas evidencian diferencias claras entre los métodos de mejora. HE incrementa fuertemente el contraste, pero genera áreas sobreexpuestas. CLAHE conserva mejor los detalles locales, especialmente en las texturas, gracias a su ecualización adaptativa. WTHE logra un equilibrio visual al mejorar el contraste de forma más controlada, evitando los artefactos típicos de HE.

## 4 Resultados

El análisis comparativo de los algoritmos de mejora de imagen se realizó mediante métricas cuantitativas que complementan la evaluación visual presentada en la Figura 1. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para cada método.



**Figure 2: Comparación visual de los métodos de mejora de imagen.**

**Table 1: Comparación de métricas de calidad para los diferentes métodos de mejora figura 1**

Métrica	HE	CLAHE	WTHE
PSNR (dB)	27.77	27.87	28.31
AMBE	13.17	14.93	19.97
Entropía	6.96	7.94	6.84
Contraste	73.77	66.64	53.45

Los resultados obtenidos demuestran que si bien el método HE logra el mayor aumento de contraste (73.77) y un valor moderado de entropía (6.96), también presenta un error de brillo medio absoluto considerable (AMBE = 13.17) y un PSNR de 27.77 dB, lo que indica cierto nivel de distorsión respecto a la imagen original.

El algoritmo CLAHE ofrece un buen equilibrio con un PSNR de 27.87 dB y un AMBE de 14.93, lo que confirma su capacidad para preservar las características originales de la imagen mientras mejora moderadamente el contraste (66.64). Este comportamiento corrobora la fundamentación teórica que destaca la capacidad de CLAHE para evitar la sobreamplificación del ruido, presentando además la mayor entropía (7.94), lo que sugiere una excelente preservación de detalles.

Por otro lado, WTHE presenta el mejor PSNR (28.31 dB), logrando un equilibrio entre la mejora de contraste (53.45) y un AMBE de 19.97. Su entropía (6.84) sugiere una representación de detalles ligeramente menor que CLAHE, pero confirma la efectividad del enfoque de umbralización ponderada para redistribuir los niveles de intensidad mientras mantiene la mejor calidad general según la relación señal-ruido.

Los resultados obtenidos de la tabla 2 demuestran que el método HE logra nuevamente el mayor aumento de contraste (73.52) y una entropía moderada (7.02), lo que indica una mejora significativa en la intensidad global de la imagen. Sin embargo, presenta un valor de AMBE elevado (21.25) y un PSNR de 27.95 dB, lo cual refleja una distorsión apreciable respecto a la imagen original.

**Table 2: Comparación de métricas de calidad para los diferentes métodos de mejora de la figura 2**

Métrica	HE	CLAHE	WTHE
PSNR (dB)	27.95	27.88	28.74
AMBE	21.25	21.87	28.74
Entropía	7.02	7.92	6.86
Contraste	73.52	66.20	51.67

CLAHE ofrece un mejor equilibrio entre las métricas, alcanzando un PSNR competitivo (27.88 dB) y el menor AMBE (21.87), lo que confirma su capacidad para preservar el brillo medio original. Además, presenta la mayor entropía (7.92), lo que sugiere una excelente conservación de detalles finos sin introducir artefactos notables, coherente con su diseño para limitar la amplificación del ruido.

Por su parte, WTHE obtiene el mayor PSNR (28.74 dB), destacándose en términos de fidelidad visual. No obstante, su valor de AMBE (28.74) es el más alto del grupo, indicando una mayor alteración en el brillo medio. Su contraste (51.67) es también el más bajo, y la entropía (6.86) revela una representación de detalles inferior a la de CLAHE. Aun así, estos resultados reflejan que WTHE prioriza la calidad visual general a través de una redistribución más controlada de la intensidad, manteniendo la estructura global sin exagerar los extremos del histograma.

El análisis estadístico revela que existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los tres métodos de mejora al evaluarlos en múltiples imágenes del dataset utilizado. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por otros investigadores en el campo.

## 5 Conclusión

En este estudio se compararon tres técnicas de mejora de imagen basadas en ecualización de histograma: HE, CLAHE y WTHE. En base a esto se presentan las conclusiones realizadas a través de la comparación de éstas.

1. A través de un análisis tanto visual como cuantitativo, se comprobó que la ecualización tradicional (HE), si bien mejora significativamente el contraste global, puede introducir artefactos y pérdida de detalles.
2. CLAHE, por su parte, ofrece un mejor compromiso entre realce y preservación de detalles locales, siendo especialmente eficaz en imágenes con texturas.
3. WTHE se destacó por su capacidad de mantener un equilibrio visual mediante un enfoque más controlado, evitando distorsiones y conservando la naturalidad de la imagen.

En conjunto, los resultados evidencian que CLAHE y WTHE superan a la técnica tradicional en escenarios donde se requiere una mejora más equilibrada, destacándose como alternativas más robustas y adaptables para aplicaciones exigentes de procesamiento de imágenes.

## References

- [1] Daniel Díaz Roberto Depaoli, Luis A. Fernández. Optimización de la ecualización del histograma en el procesamiento de imágenes digitales. [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/21082/Documento\\_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/21082/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y), 2024. Consultado: 4 de abril de 2025.

- [2] Dra. Vianney Muñoz Jiménez. Operaciones básicas con imágenes en escala de gris. [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/103697/secme-37094\\_1.pdf?sequence=1](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/103697/secme-37094_1.pdf?sequence=1), 2018. Consultado: 4 de abril de 2025.
- [3] ¿qué es: ecualización de histograma? descubra cómo esta técnica mejora el contraste de la imagen y mejora la visibilidad en diversas aplicaciones. <https://es.statisticseasily.com/glosario/%C2%BFQu%C3%A9-es-la-ecualizaci%C3%B3n-del-histograma%3F-Mejora-el-contraste-de-la-imagen/#:~:text=Histograma%20La%20ecualizaci%C3%B3n%20es%20una%20sofisticada%20t%C3%A9cnica%20de,imagen%2C%20este%20m%C3%A9todo%20pretende%20lograr%20un%20histograma%20uniforme>. Consultado: 7 de abril de 2025.
- [4] D. Ecualizacion de histogramas clahe. <https://es.linux-console.net/?p=26241>, 2018. Consultado: 7 de abril de 2025.