

Eliminación de ruido impulsivo en imágenes a color, utilizando interpolación con funciones de base radial

Impulsive noise elimination in color images using interpolation with radial-basis functions

Jaime Alberto Echeverri Arias
Universidad de Medellín
Facultad de Ingeniería
jaecheverri@udem.edu.co

Jorge Eliécer Rudas Castaño
Universidad del Magdalena
Facultad de Ingeniería
jrudascas@gmail.com

Ricardo Toscano Cuello
Universidad del Magdalena
Facultad de Ingeniería
ritoscue@gmail.com

Rubén Ballesteros Padilla
Universidad del Magdalena
Facultad de Ingeniería
rdbp89@gmail.com

Resumen

Este documento presenta un método para suprimir ruido impulsivo en imágenes a color, utilizando interpolación a través de funciones de base radial. Este es un problema clásico en múltiples aplicaciones en diferentes áreas, su origen radica en mecanismos de captación de datos defectuosos, que generan errores a intervalos variados de tiempo en las señales de entrada.

Se comparan los resultados obtenidos con el método propuesto, frente a los algoritmos clásicos no lineales, como el filtrado por la mediana, la media y el de *outlier*. En todos los escenarios probados, los resultados fueron más eficaces con el método propuesto. El algoritmo demostró ser robusto frente a grandes volúmenes de ruido en el caso de prueba. Los resultados fueron analizados a través del error cuadrado medio (ECM) y *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR) que son dos métricas de uso común para comparar la calidad entre dos imágenes luego de un proceso de restauración. Se alcanzó un ECM de 14 y un PSNR de 35.8 *db* sobre la imagen de *Lenna* a 512x512 píxeles con un porcentaje de píxeles ruido del 40%.

Palabras clave: Filtro no lineal de imágenes, funciones de base radial, interpolación, ruido impulsivo.

Abstract

This paper presents a method for impulsive noise elimination in colored images by using interpolation through radial basis functions. This is a classic problem in many applications in different fields; its origin lies in defective-data capturing mechanisms that make errors at different time intervals over an input signal.

We compare the results obtained using the proposed method to the results obtained using classical non-linear filtering algorithms, such as the median filtering, and the mean and outlier filtering. In all scenarios, the results were more effective when using the proposed method. The algorithm proved to be robust under high-noise conditions during the tests. The results were analyzed using Mean Square Error (MSE) and Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), which are two commonly used metrics to compare the quality between two images after performing a restoration process. MSE of 14 and PSNR of 35.8 *db* were reached on the 512x512-pixel *Lenna* image with a noise-pixel percentage of 40%.

Key words: Non-linear images filter, radial basis functions, interpolation, impulsive noise.

Fecha recibido: Mayo 11/2011
Fecha modificado: Junio 11/2011
Fecha aceptado: Julio 11/2011

1. Introducción

El ruido en una imagen es cualquier degradación sobre la señal origen, producida por factores externos al sistema [1]. En el procesamiento de imágenes, el ruido se presenta como alteraciones de los valores de los píxeles que componen dicha imagen. El ruido puede producirse durante la captura, la transmisión o el procesamiento de alguna señal. La naturaleza del ruido (ruido gaussiano, ruido impulsivo, ruido uniforme, ruido multiplicativo etc, para ampliar véase [2]), determina la estrategia para su supresión.

Existen muchos algoritmos de comportamiento no lineal para la supresión del ruido impulsivo, como el filtrado por la mediana y el de la media; sin embargo, estas técnicas presentan desventajas como la modificación de todos los píxeles de la imagen distorsionando aun píxeles no ruidosos.

Con la técnica propuesta en este artículo, se obtiene una mejora significativa en el filtrado de las imágenes. Este método solo altera el valor de los elementos ruidosos, para lo cual se utiliza interpolación con funciones de base radial a partir de los valores de los píxeles no ruidosos pertenecientes al vecindario de dicho elemento. Se definió un criterio para determinar cuáles son los píxeles ruidosos en las imágenes, utilizando información derivada de las generalidades del vecindario de pixel ruidoso.

2. Estado del arte

La eliminación de ruido impulsivo es un procedimiento típico en la mejora de imágenes digitales. Este objetivo se aborda en la literatura inicialmente con la utilización de filtros de medias, de las medianas, filtrado en el dominio de las frecuencias y con posterioridad, con técnicas más robustas como los clasificadores y los interpoladores.

Los filtrados lineales y los no lineales son ampliamente abordados en la literatura como en [3] [4] [5]. La eliminación de ruido es un problema típico del procesamiento digital de imágenes que ha ido evolucionando, desde el campo de aplicación, hasta la funcionalidad y la eficacia. Mientras que las técnicas clásicas mencionadas para eliminar el ruido se han mantenido, han aparecido también nuevas aproximaciones y estrategias para abordar el problema.

García et al, [6] propusieron resolver el problema del ruido impulsivo en espectros estelares utilizando redes neuronales *wavelet* (RNW), para lo cual realizaron experimentos entrenando la red con casos diferentes de espectros con ruido, tomándose como entrada tales espectros para la red neuronal *wavelet* donde se procesa y se compara la salida obtenida contra un referente sin ruido. Posteriormente se prueba la red con espectros que no fueron proporcionados en el entrenamiento y se realiza el procesamiento para filtrar y comparar los datos con la salida deseada. Los autores reportaron que la salida propuesta por la RNW es altamente aproximada a la salida deseada, lo que implica que sus resultados son satisfactorios.

Mélange T. et. al [7] utilizaron filtros difusos para detectar y eliminar ruido impulsivo en imágenes secuenciales a color derivadas de videos. La aplicación de un filtro en una sola etapa elimina una cantidad considerable de detalles, es por esto que los autores



optaron por aplicar paso por paso los filtros basados en *blockmatching* alrededor del ruido y detectaron los píxeles ruidosos con ayuda de reglas difusas.

Los autores reportaron que los niveles de ECM y PSNR alcanzados durante sus pruebas, demuestran que el método propuesto es mejor que los trabajos referentes en la literatura.

Gómez et al, [8] propusieron la utilización de máquinas de vectores de soporte para la eliminación del ruido impulsivo, usando tanto clasificación como regresión. Mediante el clasificador, seleccionaron los píxeles de la imagen que son ruido y mediante la regresión obtuvieron un valor de reconstrucción de dicho píxel usando los píxeles que le rodean. Esta técnica se puede aplicar con éxito inclusive, en imágenes con alta tasa de ruido mejorando significativamente la calidad de la imagen.

Peregrina et al, [9] realizaron una exploración relacionada con los filtros analógicos de medias no lineales y su implementación en la eliminación de ruido impulsivo. Estos filtros exhiben un buen rendimiento en la eliminación del ruido impulsivo y tiene la gran ventaja de preservar bordes, característica muy importante en un algoritmo de procesamiento de imágenes. Otra característica importante de este tipo de filtro frente a otros filtros no lineales, es que presenta una estructura muy simple. Este beneficio es aprovechado para obtener arquitecturas que pueden ser empleadas a nivel de píxeles usando circuitos analógicos *Complementary metal oxide semiconductor* (CMOS) en el dominio de la corriente.

3. Funciones de base radial

Las funciones de base radial o *radial basis function* (RBF) comprenden un amplio grupo de interpoladores exactos y locales que emplean una función de base dependiente de la distancia entre el punto interpolado y los puntos muestrales vecinos. El modelo teórico de este concepto fue ampliamente abordado en la tesis doctoral de Charles B. [10] y la implementación computacional se ha formulado extensamente en los trabajos de Wendland H. [11] [12] [13].

Las funciones de base radial tienen como modelo matemático la relación expresada en la Ecuación 1.

$$S(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \varnothing(\|x - x_i\|) \quad (1)$$

Donde $\varnothing(\|x - x_i\|)$ para $i = 1, 2, 3, \dots, N$ es un conjunto de funciones, generalmente no lineales, conocidas como funciones radiales base y como en $\|\cdot\|$ se suele escoger la norma euclídea en R^N , entonces $\varnothing\|\cdot\|$ es radialmente simétrica.

Por su parte, ω denota un factor de peso, N es el número de funciones radiales y $S(x)$ es la salida calculada por interpolación. En general, una función de base radial es una combinación lineal de traslaciones de una función radialmente simétrica.

Para determinar la forma de una RBF se suele utilizar una de las siguientes funciones como referente:

Dado que los puntos muestrales vecinos representan un conjunto finito (x_1, x_2, \dots, x_N) , las condiciones de interpolación definen el siguiente sistema lineal:

$$A\omega = y \quad (2)$$

Donde A es la matriz de distancias generadas por los diferentes puntos muestrales e invertible independiente de la función básica usada [14].

La matriz está formada de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \phi(0) & \phi(\|x_1 - x_2\|) & \dots & \phi(\|x_1 - x_n\|) \\ \phi(\|x_2 - x_1\|) & \phi(0) & \dots & \phi(\|x_2 - x_n\|) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(\|x_n - x_1\|) & \phi(\|x_n - x_2\|) & \dots & \phi(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

En (3) se observa que A es simétrica. En este sistema lineal y está dado por unas condiciones iniciales y ω puede ser hallado de la siguiente manera:

$$\omega = \phi^{-1} y \quad (4)$$

Las funciones de base radial pueden ser de soporte global, infinitamente diferenciables y contener un parámetro libre, llamado “parámetro de forma”. Este tipo de funciones producen matrices de interpolación densas, que son ampliamente utilizadas para suavizar y generar áreas continuas en superficies discontinuas [14].

El uso de funciones de base radial para interpolar datos dispersos tiene buena aceptación, debido a que el sistema asociado de ecuaciones lineales resulta ser invertible, incluso si la distribución de los puntos no presenta regularidad [15].

En general las funciones de base radial no requieren que los puntos se encuentren distribuidos sobre una cuadrícula de forma regular, esto deriva en que existen pocas limitantes para el posible dominio de las FBR de soporte compacto expuestas en la Tabla I, propiciando así, que el conjunto de píxeles interpolantes base del algoritmo tenga restricciones mínimas.

4. Método propuesto

La Figura 1 esboza la secuencia general del algoritmo propuesto.

4.1. Detección de ruido

Un píxel de coordenadas $P(i,j)$ se considera como ruido cuando la diferencia entre su intensidad y la media de las intensidades de la máscara, se encuentra por encima de un umbral *alfa* definido como la diferencia entre la media y la mediana de la ventana. Para el algoritmo, el vecindario de un píxel $P(i,j)$ son todos aquellos píxeles que se encuentran establecidos dentro de una máscara de $n \times n$ píxeles (donde n es cualquier número impar mayor que uno) y cuyo centro se encuentra en $P(i,j)$.

Diversos tamaños de máscaras fueron probados durante la implementación de la propuesta, no se encontró diferencia sustancial en los resultados variando dicha ventana de



Tabla I. Funciones de base radial de soporte global

Nombre	Expresión
Lineal	$f(x)=x$
Cúbica	$f(x)=x^3$
Gausiana	$f(x)=e^{-x^2}$
Spline	$f(x)=x^2 \log(x)$
Multicuádrada	$f(x)=\sqrt{x^2+1}$
Multicuádrada Inversa	$f(x)=\frac{1}{\sqrt{x^2+1}}$

comparación. Una máscara de 3x3 fue la que mejor relación eficiencia/eficacia demostró durante las pruebas.

4.2. Filtrado del vecindario

Sería erróneo interpolar el nuevo valor del píxel ruidoso utilizando su vecindario sin antes haberlo filtrado. La omisión de esta etapa provocaría predicciones erróneas con el método debido a que su base interpolante contendría posiblemente información ruidosa. Por tal razón se implementa un filtrado de la misma naturaleza que el expuesto anteriormente, para reducir el conjunto de valores base para la interpolación, eliminando los píxeles ruido dentro del vecindario. Esto implicaría que para interpolar el píxel de la posición (2,2) de la Figura 2(b), solo se utilizarían los valores de los píxeles en las posiciones $\{(1,2), (2,1), (2,3), (3,1), (3,3)\}$ es decir el conjunto de valores $\{46, 43, 47, 44, 44\}$, este filtrado se realiza con los mismo parámetros utilizados en la detección del píxel ruidoso. Esto garantiza que el valor nuevo para el píxel ruidoso no estará afectado por el ruido circundante, como sucede con filtros no lineales como el de la media o el de la mediana.

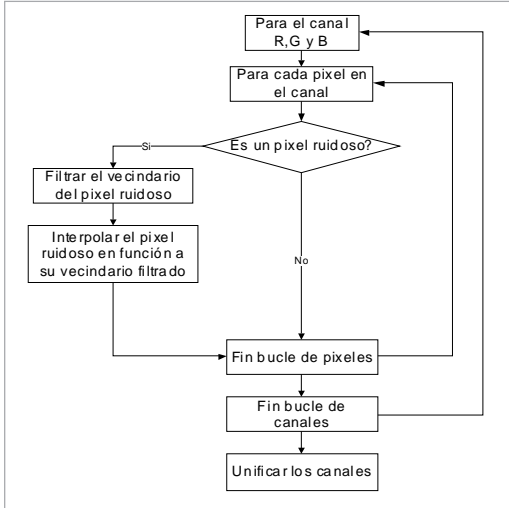


Figura 1. Esquema general del algoritmo propuesto.

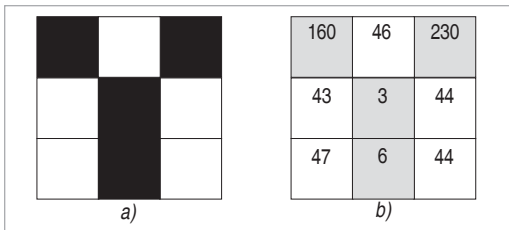


Figura 2. Ejemplo de configuración posible de píxeles ruidosos, sobre una máscara de 3 x 3.

4.3. Interpolación del píxel ruido con funciones de base radial

A cada píxel detectado como ruido, le corresponde un conjunto U de $n^2 - \rho - 1$ píxeles base para la interpolación, en una máscara de $n \times n$, siendo n un número impar mayor que dos y ρ es el número de píxeles ruidosos extras contenidos en la máscara. Después del filtrado inicial, este conjunto presenta las siguientes dos propiedades: todos son vecinos del píxel objeto y ninguno es un ruido. La Figura 3, muestra el resultado antes y después de interpolar el píxel ruido con base en sus vecinos correctos. Es apreciable el cam-

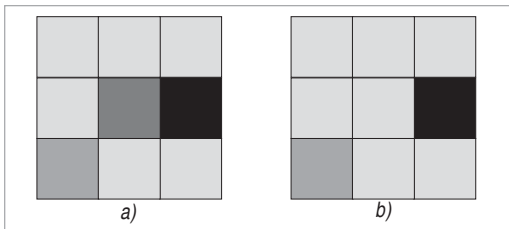


Figura 3. Corrección de ruido. (a) ventana con ruido en el píxel central (b) ventana luego de la interpolación del píxel central.

bio efectuado solamente sobre el píxel central que se detectó como ruido. Los otros dos píxeles ruido que aparecen en la ventana se dejan intactos durante la iteración, en posteriores iteraciones serán detectados e interpolados utilizando los valores originales sobre la imagen.

Se optó como forma base para la RBF, la denominada como multicuádrica. En trabajos posteriores intentaremos hacer un análisis comparativo entre los resultados alcanzados aquí y los que potencialmente podrían alcanzarse utilizando diversas funciones de base radial de soporte compacto.

5. Resultados

Se realizaron pruebas con el algoritmo propuesto y algunos métodos clásicos de filtrado no lineal, como el de la media, la mediana [4], [5] y el *outlier* [16]. En todos los algoritmos probados, el vecindario está definido por una matriz cuadrada de 3×3 píxeles, se utilizó como imagen base para las pruebas la famosa imagen de *Lenna* [17].

Todas las pruebas se realizaron sobre un ordenador con una CPU doble núcleo a 3,2 GHz y con 2 GB de capacidad en la memoria RAM, implementando todos los algoritmos en la plataforma de MATLAB 7.1.

La variación fundamental del algoritmo de filtrado por la media M y la mediana M con respecto a sus versiones clásicas, radica en que no se utilizaron los píxeles con valores calculados por interpolación para la totalización del filtrado de dicha imágenes.

Inicialmente se decidió comparar los tiempos de respuesta de los diferentes métodos para tasas de ruido (porcentaje de píxeles ruidosos) de 2% y 40%. Los resultados de esta comparación se muestran en las Figura 5 y 6.

Posteriormente, se decidió establecer un modelo de comparación del nivel de corrección alcanzado para la imagen restaurada. La Ecuación 5, representa el modelo formal que define el Error Cuadrado Medio (ECM) [18] entre la imagen sin ruido I y la imagen I' restaurada por el algoritmo de filtrado.

$$ECM = \frac{1}{3MN} \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j, k) - I'(i, j, k))^2 \quad (5)$$

Los resultados del ECM alcanzados por los métodos contemplados se muestran en las Figuras 7 y 8.

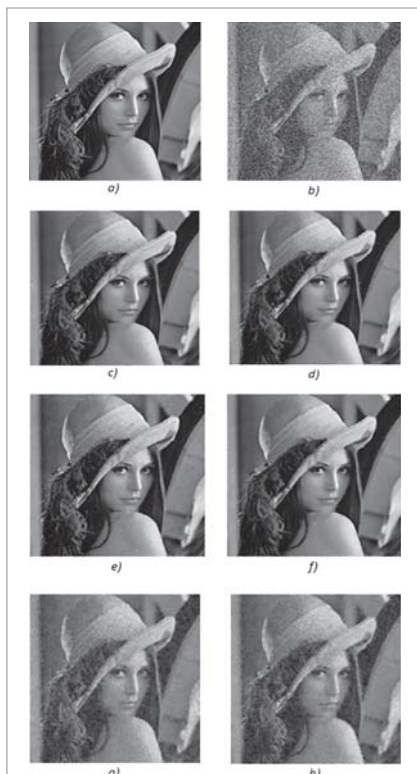


Figura 4. Imágenes de prueba y resultados (a) Imagen Original, «Lenna» (b) Imagen con ruido del 40% (c) Con interpolación a través de función de base radial (d) Outlier (e) Mediana M (f) Mediana (g) Media M (h) Media.

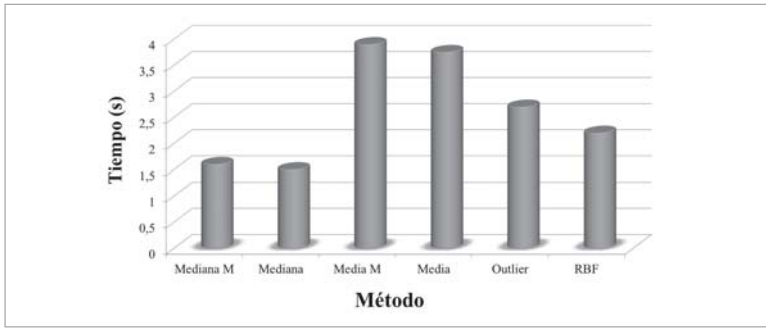


Figura 5. Métodos Vs Tiempo (s), utilizando la imagen de la *Figura 4 (a)*, con un tamaño de 512x512 píxeles y con ruido del 2%.

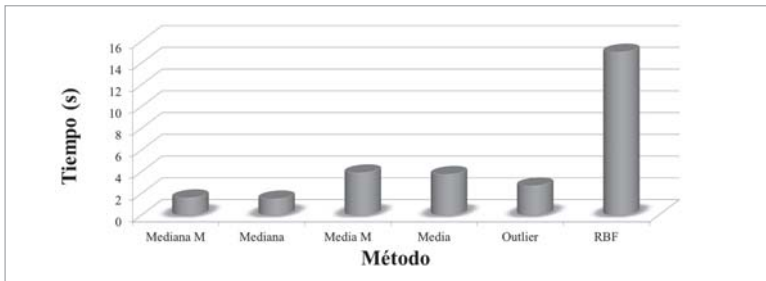


Figura 6. Método Vs Tiempo (s), utilizando la imagen de la *Figura 4 (a)*, con un tamaño de 512x512 píxeles y con ruido del 40%.

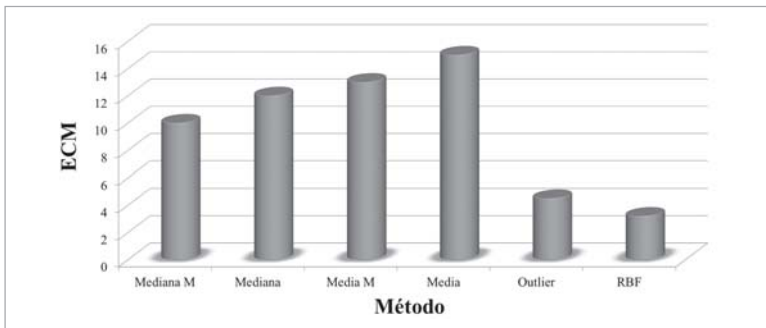


Figura 7. Método Vs Error Cuadrado Medio (ECM), utilizando la imagen de la *Figura 4 (a)*, con un tamaño 512x512 píxeles y con ruido del 2%.

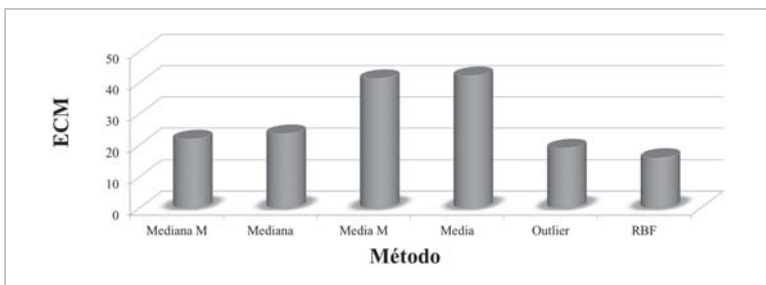


Figura 8. Método Vs ECM, utilizando la imagen de la *Figura 4 (a)*, con un tamaño 512x512 píxeles y con ruido del 40%.

Por otra parte, se consideró la relación señal a ruido de pico o PSNR por sus siglas en inglés [19], la cual define la relación entre la máxima energía posible de una señal y el ruido que afecta a su representación fidedigna. Es una métrica óptima para cuantificar la calidad de la reconstrucción de una señal y se expresa en unidades de decibelios (*db*). Su modelo matemático se define en la Ecuación 6.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{R^2}{ECM} \tag{6}$$

Donde *R* es la máxima fluctuación de los valores de intensidad en la imagen, en el caso particular de las imágenes codificadas a 8-bits por canal, el valor estándar es 255. Para una imagen a color, el PSNR se define como la media ponderada de los correspondientes valores para los canales R, G y B. Los resultados obtenidos para el PSNR de los diferentes métodos se observa en las Figuras 9 y 10.

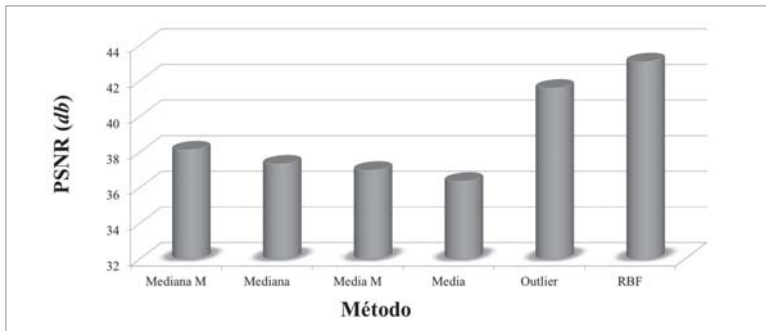


Figura 9. Método vs PSNR utilizando la imagen de la Figura 4(a) con un tamaño de 512x512 píxeles y con ruido del 2%.

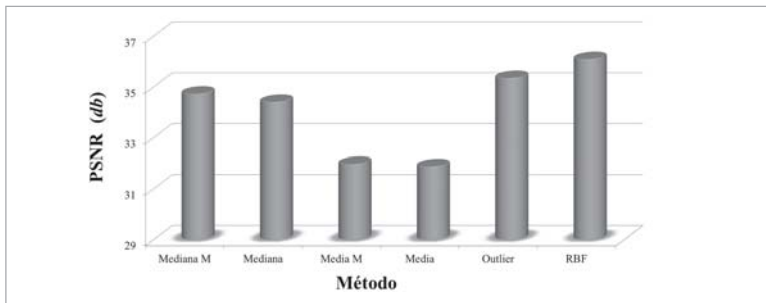


Figura 10. Método vs PSNR utilizando la imagen de la Figura 4(a) con un tamaño de 512x512 píxeles y con ruido del 40%.

6. Conclusiones

El método propuesto demostró ser una técnica robusta en la eliminación de ruido impulsivo en imágenes a color. Para grandes volúmenes de ruido (tasa de hasta 40%), el método resulta ser más eficaz que los métodos clásicos. En cuanto a la calidad de la restauración de la imagen, las métricas ECM y PSNR demuestran de la misma forma, que el método propuesto alcanza mejores resultados que los algoritmos clásicos de filtrado no lineal probados. Es de resaltar que, inclusive son mejores que los reportados en trabajos recientes como [20] [21] respecto al PSNR, bajo el mismo escenario de prueba. Finalmente, en cuanto al tiempo de procesamiento de una imagen con el método propuesto, este es proporcional a la cantidad de ruido presente en la imagen de prueba.



Se plantea la necesidad en trabajos futuros, el hacer un análisis comparativo entre el método aquí propuesto y diversos algoritmos con igual objetivo y estrategia, pero utilizando múltiples métodos interpolación, en procura de abordar de manera más amplia el problema y sus posibles aplicaciones.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Alasdair, M. (2004). Introduction to digital image processing with MATLAB, *Course Technology a part of engage learning*.
- [2] Myhilli, C. y Kavitha, V. (2011). Efficient Technique for Color Image Noise Reduction, *The research bulletin of Jordan, ACM, Vol. 1, No 11. 41-44.*
- [3] Rosenfeld, A. y Kak A. (1982). Digital Picture Processing (V.I y II). *Academic Press*.
- [4] Pratt, W. (1991). Digital Image Processing. *Wiley-Interscience*.
- [5] Gonzalez R. y Woods R. (1992). Digital Image Processing. *Addison-Wesley*, 220 – 281.
- [6] García H. A., y Ramírez, J. F. (2003). Método Basado en Redes Neuronales Wavelet para Eliminar Ruido en Espectros Estelares, *presentado en el II Congreso Español de Informática*.
- [7] Mélange T., Mike Nachtegaele y Etienne, E. Kerre. (2011). Fuzzy random impulse noise removal from color image sequences, *IEEE Transactions on image processing, Vol. 20, No. 4.*
- [8] Gómez, H., Maldonado, S., Utrilla, M., y Martín, P. (2003). Eliminación de ruido impulsivo en imágenes, mediante el uso de máquinas de vectores soporte, *Universidad de Alcalá*.
- [9] Peregrina, R. y Díaz, A. (2003). Filtrado analógico de media L_p , no lineal, *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica Luis Enrique Ero, No. 1, Santa María Tonantzintla, Puebla, Mexico*.
- [10] Bradley, J. y Baxter, C. (1992). The Interpolation Theory of Radial Basis Functions, *PhD. Thesis of Trinity College*.
- [11] Wendland, H. (1995). Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree, *Advances in Computational Mathematics, Vol. 4*, 389-396.
- [12] Wendland, H. (2005). Computational aspects of radial basis function approximation, *Topics in Multivariate Approximation and Interpolation, Elsevier B.V.*, 231-256.
- [13] Wendland, H. y Schaback, R. (2002). Inverse and saturation theorems for radial basis function interpolation, *Mathematics of Computation, No. 71*, 669-681.
- [14] Echeverri, J., Cañaveral, R. y Vásquez, A. (2007). Reconstrucción tridimensional de rostros a partir de imágenes de rango por medio de funciones de base radial de soporte compacto, *Revista de Ingeniería de la Universidad de Medellín, Vol. 6, No. 11*, 199-207
- [15] Carr, J. C., Fright, W. R., y Beatson, R. K. (1997). Surface interpolation with radial basis functions for medical imaging, *IEEE Transaction on medical imaging, Vol. 16, No. 11*, 96-107.
- [16] Anudeep Gandam y Jagroop Singh Sidhu. (2010). A Post-Processing Algorithm for Detection & Removal of Corner Outlier, *International Journal of Computer Applications, Vol. 4, No. 2*, 9 – 16.
- [17] Historia de Lenna. (2011). Consultado: <http://totaki.com/poesiabinaria/2010/03/historia-de-lenna/>. (5 de abril, 2011).
- [18] Zhou Wang y Alan C. Boví. (2009). Mean Squared Error: Love It or Leave It?, *IEEE Signal processing Magazine, Vol. 98*.
- [19] Kneé, M. (2002). A Single-ended Picture Quality Measure for MPEG-2, *Snell & Wilcox, UK*.
- [20] Morillas, S. y Gregori, V. (2011). Robustifying Vector Median Filter, *Sensors, No. 11*, 8115-8126.
- [21] N.Suresh Kumar, P.Phani Kumar, M.Kanti Kiran y K.Sri Rama Krishna, (2011). Improved Impulse Noise Detector for Adaptive Switching Median Filter, *International Journal of Electronics & Communication Technology, IJECT, Vol. 2, No. 2*, 153 – 157.

Jaime Alberto Echeverri Arias

Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional sede Medellín. Master en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional sede Medellín. Docente Titular y Líder del Grupo de Investigación ARKADIUS de la Universidad de Medellín, Colombia.

Jorge Eliécer Rudas Castaño

Ingeniero de Sistemas de la Universidad del Magdalena. Miembro activo del grupo de investigación y desarrollo en nuevas tecnologías de la información y la comunicación de la Universidad del Magdalena. Sus áreas de interés son el procesamiento digital de imágenes, la visión artificial y la computación gráfica.

Ricardo Toscano Cuello

Ingeniero de Sistemas de la Universidad del Magdalena. Miembro activo del grupo de investigación y desarrollo en nuevas tecnologías de la información y la comunicación de la Universidad del Magdalena. Sus áreas de interés son el desarrollo de software para dispositivos móviles y el desarrollo web.

Rubén Darío Ballesteros Padilla

Estudiante de grado del Programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad del Magdalena. Sus áreas de interés son el desarrollo web, el procesamiento digital de imágenes y la visión artificial.