

Detección de bordes con precisión subpíxel en imágenes digitales: Interpolación lineal frente a esquemas de tipo no lineal

T. Hermosilla^{(1)*} E. Bermejo⁽¹⁾ A. Balaguer⁽²⁾ L.A. Ruiz⁽¹⁾

(1) Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría

Universidad Politécnica de Valencia. Valencia

(2) Dpto. Matemática Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia

Resumen

En este trabajo se presenta y se evalúa un procedimiento para incrementar la resolución en la detección de bordes en imágenes digitales. El primer paso consiste en la aplicación de una interpolación en la imagen, con el objetivo de obtener los valores en una malla mas fina. Sobre la imagen interpolada se aplican los algoritmos de detección de bordes de Prewitt, Sobel y de Canny. Se pretende así aumentar la resolución de los bordes detectados por encima de los límites impuestos por el tamaño del píxel de la imagen. Se comparan los resultados obtenidos con tres algoritmos de interpolación bidimensional de cuarto orden. El primer algoritmo usa un esquema centrado basado en una convolución cúbica. El segundo método trabaja con un esquema descentrado de tipo lineal de cuarto orden. El tercer algoritmo implementa una técnica de interpolación no lineal basada en el clásico método E.N.O. (Essentially Non-Oscillatory).

1. Introducción

Se definen como bordes, en términos de procesado digital de imágenes, las zonas en las que se produce un fuerte cambio de intensidad. Su detección resulta útil en diversas disciplinas, como cartografía o medicina, cuando se pretende preservar importantes propiedades estructurales o cuando se plantea la necesidad de distinguir formas o reconocer figuras dentro de una imagen. Hasta hoy se han desarrollado numerosos algoritmos de detección de bordes (Roberts, Prewitt, Sobel, Canny, etc.) que han sido ampliamente estudiados en la bibliografía (Canny [3]). El principal problema se plantea cuando se requieren bordes con mejor precisión y definición que la que ofrecen estos algoritmos. Para solucionar esto se han creado diferentes metodologías para la detección de bordes con precisión subpíxel.

Devernay [5] utiliza detectores de bordes basados en gradiente junto con la supresión de no máximos, seguido de una interpolación cuadrática en cada máximo local. Siguiendo el mismo criterio, Rockett [10] detecta los bordes utilizando el algoritmo de Canny,

*Presenta la comunicación

interpolando después con un ajuste mínimo cuadrático del gradiente normal al borde. Utilizando una técnica distinta, Pelgrims *et al.* [8] aplican derivadas de segundo orden seguidas por el método de la convolución cúbica para determinar el cruce-cero de los bordes locales. Otros autores basan sus métodos en los operadores de momentos. Es el caso de Qu *et al.* [11], quienes combinan en un único operador el operador de Sobel y el operador de los momentos de Zernike.

En este trabajo se propone una metodología para incrementar la resolución de una imagen, aplicando primero un algoritmo de interpolación, lo que permite obtener valores en una malla más fina, y posteriormente un procedimiento de filtrado para la detección de bordes. La mayoría de los programas comerciales de procesamiento de imágenes y aplicaciones gráficas utilizan métodos de interpolación de tipo lineal, los cuales calculan una estimación geométrica de las formas representadas con un bajo coste computacional. Aunque su comportamiento es aceptable en zonas sin cambios, en las zonas próximas a discontinuidades tienden a producir errores considerables, debido al suavizado excesivo de los valores de la imagen (véase Siddiqi *et al.* [12]).

Para evitar dicho problema pueden usarse métodos de tipo no lineal, los cuales seleccionan el soporte de puntos del polinomio interpolador basándose en el grado de variación del nivel de gris alrededor de cada píxel. Con ello se puede mejorar la calidad visual de las imágenes interpoladas, la cual depende de la nitidez a través del borde y de la suavidad a lo largo de éste según se comenta en Li *et al.* [7]. Una de las técnicas de interpolación de tipo no lineal es la conocida con el nombre de ENO (Essentially Non-Oscillatory). El método ENO fue inicialmente descrito en Harten *et al.* [6] como solución a los problemas de suavizado de discontinuidades en aplicaciones de dinámica de fluidos. Posteriormente, Siddiqi *et al.* [12] modificaron el esquema de ENO para detectar y realzar discontinuidades en la interpolación subpíxel en dos dimensiones. Desde entonces, en varios estudios de procesamiento digital de imágenes se ha aplicado esta técnica (véase por ejemplo Chan y Zhou [4], Arándiga *et al.* [1] y [2]).

Según Su y Willis [13], los aspectos principales para evaluar la calidad de las imágenes interpoladas son el contraste de los bordes, la cantidad de artefactos generados y la reconstrucción de los detalles en las altas frecuencias. Baja esas premisas en este trabajo se evalúan los resultados obtenidos con una interpolación tipo ENO utilizando polinomios de grado 3, viendo las ventajas e inconvenientes que este tipo de interpolación presenta frente a varios esquemas de tipo lineal. Se analizarán con más detalle los resultados producidos con el método de convolución cúbica descrito en Richards [9], así como con una interpolación bicúbica basada en un soporte fijo de 16 nodos, para la celda que se define alrededor de cada píxel. En cada técnica se analizará el efecto producido por distintos tipos de filtros de detección de bordes.

La evaluación de las tres metodologías se realiza sobre dos tipos de imágenes: 1) Imágenes sintéticas, creadas con el fin de controlar la geometría de las figuras en la reconstrucción de las imágenes. 2) Imágenes espaciales procedentes de diversas plataformas espaciales (Landsat, QuickBird, IRS). En estas últimas la interpolación es aplicada sobre el primero de los componentes principales de las bandas multispectrales que están comprendidas entre las longitudes de onda captadas por la imagen pancromática.

Se estudia el método de interpolación bidimensional que produce una menor difusión en los contornos de la imagen. La interpretación visual de las imágenes se complementa con el estudio de la geometría de la imagen interpolada, analizando los errores producidos en puntos de control situados sobre los bordes.

2. Metodología.

Como paso previo a la detección de bordes se han aplicado varios métodos de interpolación de la imagen. Por este motivo, en primer lugar se presenta una descripción de los mismos.

2.1. Métodos de interpolación estándar

Algunos de los métodos de interpolación de uso más extendido en las aplicaciones de procesamiento digital de imágenes en teledetección son los siguientes:

Interpolación del vecino más próximo: Asigna al punto interpolado el nivel de gris del píxel más cercano a las coordenadas de dicho punto.

Interpolación bilineal: Asigna al píxel interpolado un valor ponderado calculado a partir de los cuatro píxeles más cercanos, de forma que la ponderación es mayor cuanto más cerca esté del píxel interpolado.

Convolución cúbica: Aplica una función bicúbica para promediar el valor de salida a partir de los 16 (4x4) píxeles más próximos. Equivale a aplicar, en primer lugar, cuatro interpolaciones unidimensionales horizontales entre cuatro píxeles (dos a un lado y dos a otro) y posteriormente otra interpolación unidimensional, en este caso vertical, entre los cuatro valores obtenidos anteriormente. El algoritmo completo utilizado se describe en Richards [9].

Interpolación lineal cúbica: A diferencia de la convolución cúbica usa el mismo polinomio de interpolación en los nuevos píxeles de la imagen interpolada que se generan a partir del mismo píxel de la imagen original. Dado un píxel situado en la posición (x_i, y_j) el polinomio de interpolación alrededor de dicho píxel se define usando el siguiente conjunto de 16 píxeles:

$$\{(x_k, y_m), k \in \{i - 2, i - 1, i, i + 1\}, m \in \{j - 2, j - 1, j, j + 1\}\}$$

Por simplicidad, en adelante, nos referiremos al método de interpolación lineal cúbica como método lineal.

2.2. Método de Interpolación ENO

La idea básica de la interpolación de tipo no lineal ENO es seleccionar uno de entre los posibles conjuntos de puntos contiguos, de forma que el elegido suponga la menor variación en el sentido de las diferencias divididas de Newton. Con ello, en las zonas vecinas a discontinuidades el suavizado se dará siempre en el lado que no contiene la discontinuidad. La característica principal del método ENO es que basa la interpolación en un soporte dinámico que intenta evitar los bordes y las zonas de fuertes gradientes. Este método construye una aproximación polinómica que minimiza las oscilaciones sin cruzar las discontinuidades siempre que sea posible.

Dado $x_* \in [x_{i-\frac{1}{2}}, x_{i+\frac{1}{2}}]$, $q_i(x_*; z)$ es el único polinomio interpolante de grado n que interpola la función $z(x)$ en dicho punto x_* , utilizando el conjunto de valores discretos de

$z(x_j)$ en un soporte formado por un conjunto de 4 puntos sucesivos que incluyen el x_i . Dicho soporte viene definido por medio del procedimiento que a continuación se describe.

(1) Inicialmente se considera,

$$k_{min}^0 = k_{max}^0 = i, \quad q_i^0(x_*; z) = z(x_i)$$

(2) Formamos un bucle variando $m \in \{1, 2, 3\}$. Para cada m se suponen conocidos k_{min}^{m-1} , k_{max}^{m-1} y $q_i^{m-1}(x_*; z)$. Entonces se calculan las dos siguientes diferencias divididas de orden m de la función $z(x)$:

$$a^m = z \left[x_{k_{min}^{m-1}}, \dots, x_{k_{max}^{m-1}+1} \right], \quad b^m = z \left[x_{k_{min}^{m-1}-1}, \dots, x_{k_{max}^{m-1}} \right]$$

Con ello se procede a añadir un punto al soporte, de acuerdo con la diferencia dividida que tiene una menor magnitud.

(i) Si $|a^m| \geq |b^m|$ entonces:

$$c^m = b^m, \quad k_{min}^m = k_{min}^{m-1} - 1, \quad k_{max}^m = k_{max}^{m-1}$$

(ii) Si $|a^m| < |b^m|$ entonces:

$$c^m = a^m, \quad k_{min}^m = k_{min}^{m-1}, \quad k_{max}^m = k_{max}^{m-1} + 1$$

Y finalmente:

$$q_i^m(x_*; z) = q_i^{m-1}(x_*; z) + c^m \prod_{j=k_{min}^{m-1}}^{k_{max}^{m-1}} (x_* - x_j) \quad (1)$$

Este algoritmo se aplica en primer lugar en la dirección horizontal, y después en la vertical, de forma que se consigue la interpolación secuencial en 2D. De esta forma para cada línea con $y = y_j$, el procedimiento anterior permite obtener un polinomio de grado 3 distinto para cada celda $[x_{i-\frac{1}{2}}, x_{i+\frac{1}{2}}]$, el cual se denota por $Q_j(x; z) = q_i^3(x; z)$. El mismo tipo de procedimiento permite definir el polinomio bidimensional:

$$R^2(x, y; z) = q_j(y; Q_j(x; z))$$

2.3. Métodos de detección de bordes.

En una imagen digital, se conoce como borde a un cambio significativo en el nivel de gris entre dos o más píxeles adyacentes. Los cambios abruptos en los valores de la función intensidad de una imagen están asociados a valores elevados de la primera derivada de dicha función. El operador más común de detección de bordes en análisis de imágenes es el gradiente del nivel de gris:

$$\nabla z(x, y) = [Z_x, Z_y] = \left[\frac{\partial z(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right]$$

Para la definición de Z_x y Z_y , en este trabajo se han utilizado los filtros de gradiente de Prewitt y de Sobel, cuyos coeficientes se muestran en la figura 2.1.

Z_x (Prewitt)	Z_y (Prewitt)	Z_x (Sobel)	Z_y (Sobel)
$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$

Figura 2.1: Coeficientes de los filtros de convolución de Prewitt y de Sobel.

Otro de los filtros ampliamente usado en la literatura es el de Canny [3], el cual combina un operador diferencial con un filtro gaussiano. El detector de contornos de Canny sigue los siguientes pasos:

1. Reducción de ruido. Se suaviza la imagen con un filtro gaussiano reduciendo el ruido, los detalles y las texturas que no interesan.
2. Cálculo del gradiente. Para la obtención del gradiente se aplica el filtro Sobel a la imagen suavizada.
3. Supresión de “no máximos”. Una vez calculado la dirección del gradiente en el paso anterior, se debe encontrar la dirección que mejor se aproxima a la normal al borde. En este caso se eliminan los puntos que no tienen un valor máximo de gradiente según la dirección perpendicular al contorno.
4. Histéresis. En este paso se definen los bordes definitivos, seleccionando sólo aquellos píxeles cuyo gradiente se encuentra entre dos umbrales establecidos.

Una vez se ha completado este proceso, se obtiene como resultado una imagen binaria en la que cada píxel se define como píxel de borde o como píxel no perteneciente a borde.

Al disminuir la desviación típica de la función gaussiana de suavizado se reduce el efecto de suavizado, por lo que en la imagen de bordes se incrementará el número de aristas. Por el contrario, al aumentar dicho parámetro se obtendrán aquellos contornos que correspondan con límites más contrastados, si bien ello conlleva un aumento del error en su posición.

En la figura 2.2 se muestra el proceso seguido para una imagen de satélite. En el proceso de histéresis se han elegido dos umbrales diferentes con el objetivo de observar el efecto que produce en la obtención de los bordes.

3. Resultados

Para evaluar los métodos de interpolación descritos en las secciones anteriores junto con los tres algoritmos de detección de bordes (Prewitt, Sobel y Canny), a continuación se analizarán los errores cometidos en la obtención de los bordes en distintas imágenes digitales.

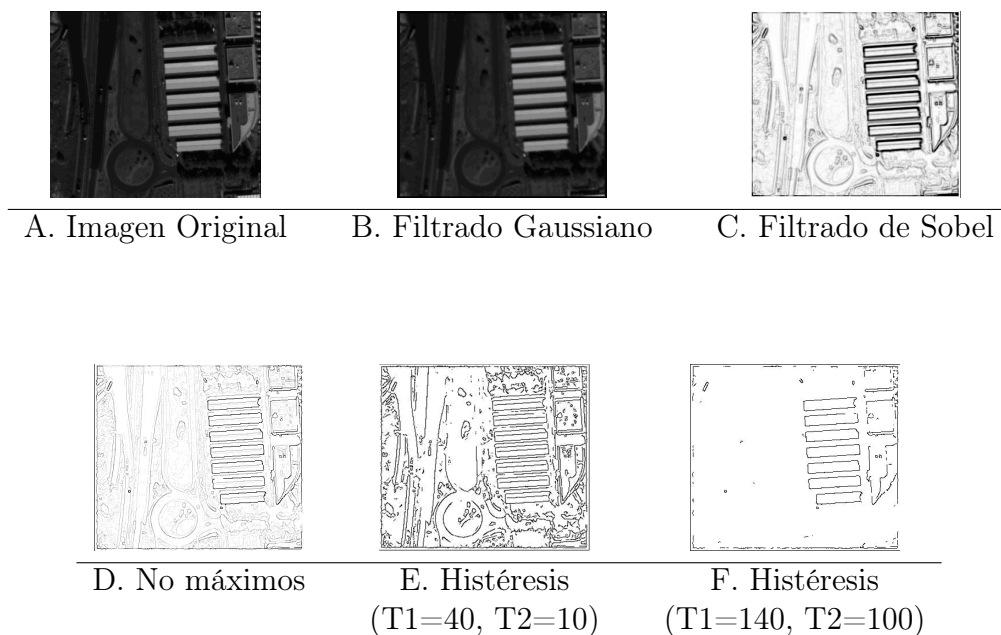


Figura 2.2. Detección de bordes en una imagen de satélite con el detector de Canny y distintos umbrales en el proceso de histéresis.

3.1. Imágenes de Evaluación.

El principal problema a la hora de realizar la evaluación de los métodos de interpolación y detección de bordes es la dificultad de establecer un nivel de verdad. Teóricamente, en la realidad no existe una imagen ideal de referencia con la que comparar los resultados. Toda imagen supone una discretización del mundo real, en la que se reduce la intensidad a valores de niveles de gris y se restringe la resolución en función de un tamaño de píxel. Por el contrario, las imágenes sintéticas permiten crear figuras en las que la geometría y la posición son conocidas. Sin embargo, las imágenes sintéticas no representan exactamente los patrones de las imágenes reales, por lo que una evaluación centrada únicamente en imágenes sintéticas sería incompleta. Así pues, se han evaluado los distintos métodos sobre imágenes sintéticas y de satélite (véase la figura 3.1) con la doble finalidad de poder controlar los parámetros de evaluación y, al mismo tiempo, disponer de imágenes de referencia reales. La evaluación se ha realizado visual y analíticamente para estudiar diversos aspectos de las metodologías empleadas.

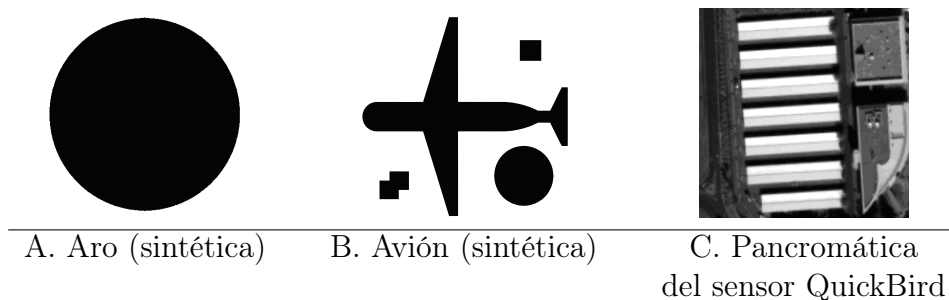


Figura 3.1: Ejemplo de imágenes utilizadas en la evaluación.

3.2. Análisis visual.

Se han evaluado tanto la calidad de las imágenes interpoladas como los resultados obtenidos en la detección de bordes. Para ello, se han valorado los siguientes aspectos:

1. La calidad visual de las imágenes,
2. La semejanza de éstas con las imágenes de referencia,
3. La generación de ruido y artefactos en el entorno de las discontinuidades,
4. La definición y el contraste de los bordes.

La figura 3.2 muestra el resultado obtenido en la interpolación de una imagen de satélite con los métodos de interpolación del vecino más próximo y la interpolación bilineal. La interpolación del vecino más próximo es el método más eficiente en términos de tiempo de procesado. Sin embargo introduce un desplazamiento de la imagen de hasta medio píxel, produciendo bloques y una apariencia dentada en las zonas de bordes según se aprecia en la figura 3.2. En dicha figura se observa que la interpolación bilineal genera una imagen más suavizada y borrosa que la obtenida a partir del vecino más próximo, realzando las bajas frecuencias de la imagen.

Los resultados mejoran al trabajar con polinomios de interpolación que usan 16 nodos tal como se aprecia en la figura 3.3. Sin embargo en ella se observa que los contornos generados mediante el método lineal quedan peor definidos que los obtenidos con los algoritmos ENO y convolución cúbica, donde los bordes aparecen quebrados pero limpios.

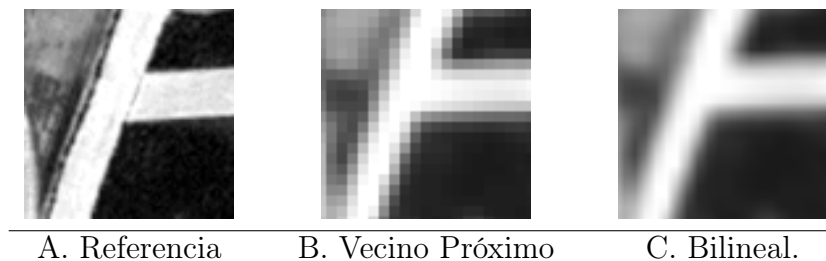


Figura 3.2: Detalle de interpolaciones en una imagen de satélite de los métodos de interpolación del vecino más próximo y la interpolación bilineal.

En estos dos métodos los perfiles transversales aparecen dentados con escalones mayores a los de referencia, distinguiéndose pocas diferencias entre ellos. Observando los resultados producidos en una imagen de satélite se aprecia que la interpolación lineal produce un mayor suavizado. La convolución cúbica genera una apariencia pixelada que produce el efecto de bordes quebrados, mientras que el método ENO define adecuadamente los contornos, produciendo un realce en ellos.

La figura 3.4 muestra detalles de los bordes generados por el detector de Prewitt sobre las interpolaciones de grado tres analizadas anteriormente. Estudiando los resultados en la imagen sintética se observa que el método ENO se presenta como la mejor solución para la aplicación de detectores de bordes, ya que los resultados están mejor definidos y su posición es más precisa.

En realidad, los contornos obtenidos a partir de los tres detectores de bordes (Sobel, Prewitt y Canny) utilizando el método de interpolación lineal no quedan definidos como una única línea, sino que se generan puntos cercanos al borde que empobrecen la solución. Además, estos son más dentados que en los demás métodos comparados. El método de convolución cúbica permite delimitar los bordes con perfiles limpios, pero éstos aparecen desplazados con respecto a los contornos reales de la figura.

Analizando los bordes sobre la imagen de satélite (figura 3.5), se aprecia que los mejores resultados se obtienen combinando el método de interpolación ENO ya que presentan bordes ajustados a las discontinuidades y las líneas quedan bien definidas. Se podría ver como el método lineal junto con el filtro Canny produce buenos resultados, pero en los perfiles lineales se observan líneas más quebradas que en el caso del método ENO. La convolución cúbica genera bordes bien definidos, aunque desplazados con respecto a los contornos de la imagen de referencia.

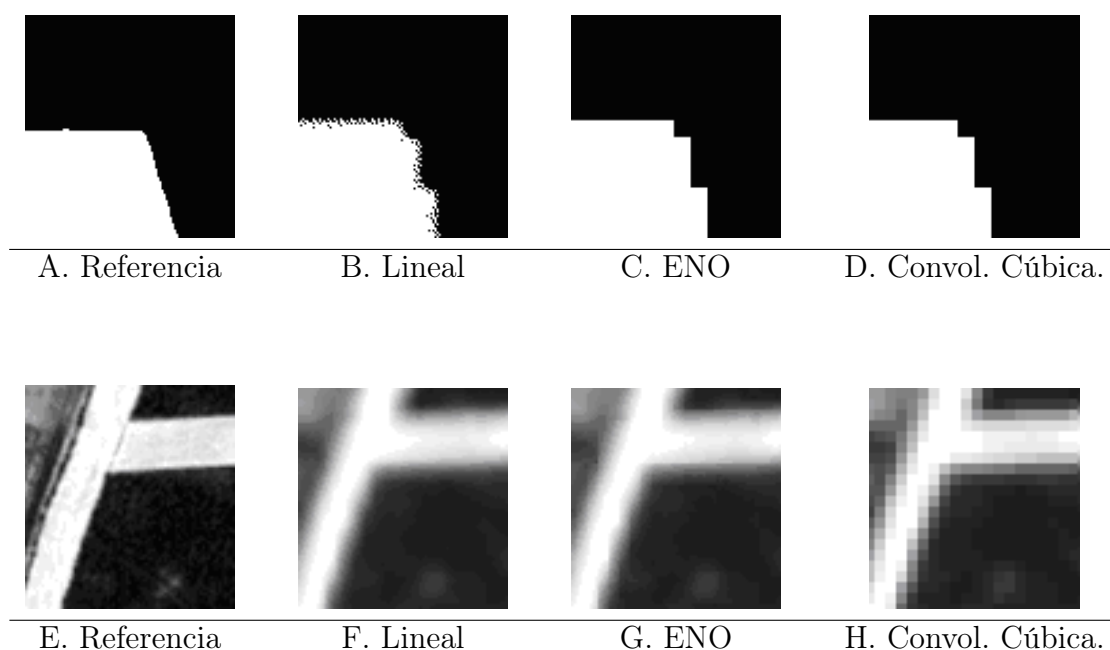


Figura 3.3: Detalle de interpolaciones en:
A. una imagen sintética, E. una imagen de satélite.

3.3. Estudio analítico.

A continuación se analizan las variaciones en niveles digitales entre las imágenes interpoladas y las de referencia, calculando para ello ciertos parámetros de error a partir de la imagen diferencia de ambas imágenes. Los parámetros estadísticos obtenidos a partir de las diferencias entre las imágenes interpoladas y de referencia (tabla 3.1) muestran resultados similares en los tres métodos de interpolación, destacando el método ENO por sus bajas desviaciones típicas, lo cual aporta una mayor consistencia al método.

Interpolación	Imagen Avión		Imagen Aro		Imágen Satélite	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
Lin	0.021	0.097	0.008	0.090	0.090	0.094
ENO	0.001	0.099	0.008	0.089	0.122	0.089
CC	0.012	0.143	0.002	0.058	0.073	0.130

Tabla 3.1: Media y desviación de las diferencias entre las imágenes interpoladas y las de referencia.

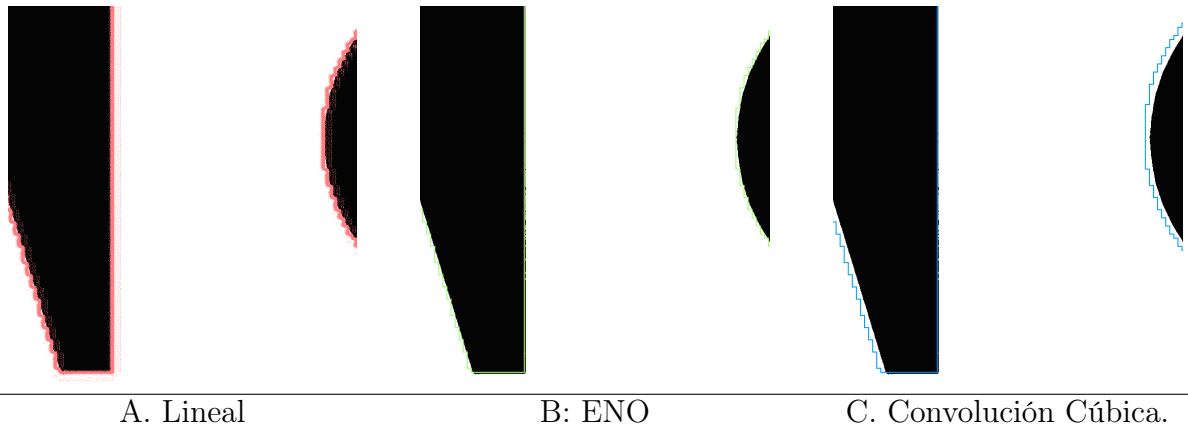


Figura 3.4: Detalles de la superposición de bordes sobre la imagen en las interpolaciones lineal, ENO y convolución cúbica sobre la imagen sintética del avión, usando el detector de Prewitt.

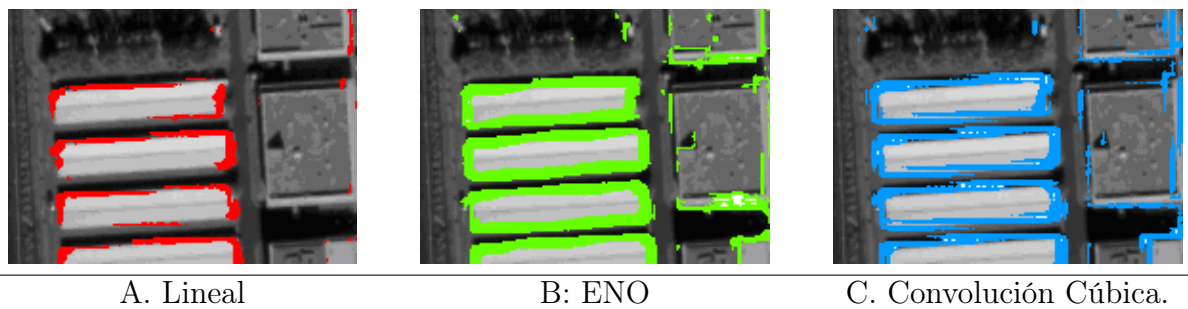


Figura 3.5: Detalles de la superposición de bordes sobre la imagen en las interpolaciones lineal, ENO y convolución cúbica sobre la imagen de satélite, usando el detector de Prewitt.

También se ha calculado el índice de Correlación para ver la relación existente entre la imagen interpolada y la de referencia. La Tabla 3.2 muestra, para la imagen de satélite, los índices de correlación obtenidos entre la imagen referencia (banda pancromática) y los obtenidos empleando los diferentes métodos de interpolación. Los resultados ponen de manifiesto una alta correlación en los casos de interpolación lineal y ENO y, en menor medida, en el caso de convolución cúbica. El método de convolución cúbica realza las discontinuidades, lo que implica una modificación de la imagen y, por consiguiente, una menor correlación con la imagen de referencia.

Tipo Interpolación	Correlación en Imágen Satélite
Lineal	0.941008
ENO	0.939596
Conv. Cúbica	0.877331

Tabla 3.2: índices de correlación entre la imagen satélite y la imagen interpolada.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda recibida del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto número REN2003-04998.

Referencias

- [1] Arándiga F., Donat R. and Mulet P., Adaptive Interpolation of Images. Signal processing Vol.83, pp. 459-464, 2003.
- [2] Arándiga F., Cohen A., Donat R., Dyn N. and Matei B., Approximation of piecewise smooth functions and images by edge-adapted (ENO-EA) nonlinear multiresolution techniques. Technical Report. 2006.
- [3] Canny, J. F. A computational approach to edge detection. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8(6), pp. 679-698. 1986.
- [4] T. F. Chan and H. M. Zhou. Total variation improved wavelet thresholding in image compression. In Proc. Seventh International Conference on Image Processing, Vancouver, Canada, 2000.
- [5] F. Devernay, A Non-Maxima Suppression Method for Edge Detection with sub-pixel accuracy. Research Report N°2724, Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, 1995.
- [6] Harten, A. Engquist, B. Osher, S. Chakravarthy, S. Uniformly high order accurate essentially non-oscillatory schemes, III. Journal of Computational Physics, Vol.71, pp.231-300, 1987.
- [7] Li X., Orchard M. New Edge Direct Interpolation. IEEE International Conference on Image Processing, Vol. 2, pp. 311-314. 2000.
- [8] Pelgrims, P., Van de Velde, G., Van de Vondel, B. Sub-pixel edge detection. Technical Report Nayer Institut. 2004
- [9] Richards, J. A.. Remote Sensing Digital Image Analysis. Ed. Springer-Verlag, 1999.
- [10] Rockett, P. The Accuracy of Sub-Pixel Localisation in the Canny Edge Detector. The British machine vision conference. Nottingham, UK. pp. 392-401, 1999.
- [11] Qu, Y.D., Cui, C.S., Chen, S.B., Li, J.Q., A fast sub-pixel edge detection method using Sobel-Zernike moments operator, IVC Vol.23 (1), pp. 11-17, 2004.

- [12] Siddiqi, K. Kimia, B. Shu, C. Geometric Shock-Capturing ENO Schemes for Sub-pixel Interpolation, Computation and Curve Evolution. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Vision, Florida, pp. 20-22, 1995.
- [13] Su, D., Willis, P. Demosaicing of color images using pixel level data-dependent triangulation. Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics. USA. 2003.

