

Embedding a Color Watermark into DC coefficients of DCT from Digital Images

D. Muñoz, V. Ponomaryov, *Member, IEEE*, R. Reyes-Reyes, *Member, IEEE*, C. Cruz-Ramos, *Member, IEEE*, and S. Sadovnychiy, *Member, IEEE*

Abstract—In this paper, a secure watermarking framework based on Discrete Cosine Transform (DCT) for embedding a color watermark into digital images that provides robustness against JPEG compression and some other image processing attacks is presented. In the proposed algorithm, the RGB components of the color image have been separated, and then each component is selected to embed a color watermark. The images R, G and B are divided in 8×8 non-overlapped pixels blocks and each block is transformed to frequency domain using DCT. Next, with DC coefficient of each block a new block of 8×8 DC coefficients are arranged and a second DCT is applied. Later, Quantization Index Modulation (QIM) Dither Modulation (DM) is used as the embedding method to insert the color watermark into the 64 resultant coefficients. Meantime, the color watermark is transformed to YCbCr color space and a codification 4:2:0 is used to reduce the quantity of bits to represent it. The proposed watermarking scheme has demonstrated high resistance against various types of attacks in comparison with other state-of-art algorithms.

Index Terms—DCT, DC coefficient, RGB, YCbCr, color watermark, QIM.

I. INTRODUCCIÓN

CON el rápido avance tecnológico y equipos de cómputo cada vez más económicos, la manipulación y alteración de contenido multimedia se ha vuelto mucho más sencilla, incluso algunas de estas modificaciones llegan a pasar inadvertidas, dando como resultado su producción o distribución de forma ilegal, vulnerando la propiedad intelectual. Es por esto, que en los últimos años la investigación de algoritmos que ayuden a proteger el contenido digital se ha vuelto más importante [1], [2], y una de las técnicas más utilizadas para la protección de la propiedad intelectual del contenido digital son las marcas de agua digitales [3].

Las marcas de agua digitales son técnicas las cuales se emplean para agregar información adicional en un archivo digital, a estos datos se les conoce como marca de agua, usualmente se emplean patrones binarios [4], secuencias pseudo aleatorias, texto, imágenes en blanco y negro [5] o imágenes en escala de grises, y dentro de sus principales funciones podemos encontrar la protección de los derechos de autor, el control de uso, validación de integridad, etc. [6]- [9].

This work was supported by the Instituto Politécnico Nacional (IPN) and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT, under Grant 220347).

D.O. Muñoz, V. Ponomaryov, R. Reyes and C. Cruz are with Instituto Politécnico Nacional (IPN), Mexico City, México (e-mails: dmunozi1302@alumno.ipn.mx, vponomar@ipn.mx, rreyesre@ipn.mx and ccruzra@ipn.mx).

S. Sadovnychiy is with Instituto Mexicano del Petróleo, Mexico City, México (e-mail: ssadovny@imp.mx).

Es importante que una marca de agua provea la suficiente información acerca del autor de la obra o que establezca la propiedad legítima del contenido que se está protegiendo, además, una marca de agua debe de satisfacer ciertas propiedades como: robustez ante ataques intencionados o no intencionados, capacidad de datos a insertar y por último no debe degradar la calidad de la imagen portadora y en el caso de las marcas de agua invisibles, estas deben de pasar desapercibidas ante el Sistema Visual Humano (SVH) [6].

La gran mayoría de las técnicas de marcas de agua para imágenes digitales utilizan texto, imágenes binarias o imágenes en escala de grises. Renza [10] propuso un método basado en QIM y la Transformada Discreta Wavelet (DWT, por sus siglas en inglés) para insertar una cadena de texto como marca de agua. Por otro lado, Mohammad [11] propuso una técnica de marca de agua invisible la cual utiliza la DCT y el espacio de color YCoCg-R, además de utilizar la transformada de Arnold para incrementar la seguridad del sistema. Si bien este método demuestra una alta robustez a compresión JPEG, la cantidad de información que agrega es muy poca, pues la marca de agua empleada es una imagen binaria de 32×32 píxeles. En [12], se presentó una técnica de marca de agua la cual emplea la DWT y la Descomposición en Valores Singulares (DVS), además de utilizar también un algoritmo criptográfico (RSA), sin embargo para poder recuperar la marca de agua es necesario contar con la imagen original y la llave privada, junto con la información de cifrado que se empleó al momento de utilizar el algoritmo RSA, dando como resultado un sistema de marca de agua no a ciegas, y la marca de agua que se utiliza es una imagen en escala de grises.

Como se mencionó anteriormente, las imágenes que más comúnmente se usan como marca de agua son binarias o en escala de grises. Sin embargo, el aumento del uso de imágenes a color dentro de distintas áreas abre la puerta para que se comiencen a emplear pequeños logotipos o imágenes con una cantidad de colores limitados como marcas de agua. Chou [13] propone el análisis del componente gama de una imagen a color y mediante un cuantificador se van modificando los índices de color de los píxeles que han sido previamente seleccionados para insertar la información de la marca de agua a color. Sin embargo, la imagen utilizada como marca de agua tiene solamente 7 colores distintos. En cambio, en [14], se presenta una técnica basada en DVS. En esta propuesta se modifican uno o más valores DVS, sin embargo, esta modificación disminuye la calidad de la imagen portadora, además de ser un sistema de marcado de agua no a ciegas. Por otro lado, Su [15] propone el uso de dos niveles de la

DCT sobre un bloque de 8×8 píxeles, una vez obtenidos los coeficientes resultantes realiza la modificación del coeficiente DC y 7 coeficientes AC. Si bien el método propuesto resulta ser bastante robusto contra distintos tipos de ataques, la imagen a color utilizada sigue siendo una imagen con tan solo 7 colores distintos y que es necesario contar con la imagen original para poder recuperar la marca de agua (no a ciegas). Finalmente Roldan [16] propone un método de marca de agua para autenticar una imagen a color, el cual puede detectar y recuperar regiones alteradas, si bien esta propuesta cumple otras funciones, se puede decir que inserta una imagen a color como marca de agua, ya que finalmente lo que se recupera es una imagen a color. Sin embargo, su principal desventaja es que no es resistente a muchos ataques y la calidad de la imagen es muy baja obteniendo valores promedio de 28 dB en PSNR.

La principal problemática de estos métodos es que las marcas de agua usadas, son binarias o en escala de grises, y las imágenes a color tienen muy pocos colores; además, los que logran almacenar una imagen con mas tonalidades resultan ser sistemas de marca de agua no a ciegas, por lo que se necesita de información adicional para recuperar la marca de agua.

En este trabajo se propone un esquema de marca de agua totalmente a ciegas para recuperar una marca de agua a color, la cual contiene un mayor rango de tonalidades y características a diferencia de los logotipos utilizados en [11], [13]– [16]. Primero, los componentes RGB de la imagen portadora se separan para poder utilizar cada uno de forma individual; mientras tanto, la marca de agua se transforma al espacio de color YCbCr y se pasa por un proceso de submuestreo (4:2:0), de esta forma se reduce la cantidad de bits necesarios para representar los colores en una imagen. El siguiente paso es dividir los canales R, G y B en bloques de 8×8 píxeles y en cada bloque se calcula la DCT. Después, se toma el coeficiente DC de cada bloque y con ellos se genera un nuevo bloque de 8×8 coeficientes, a este nuevo bloque se le aplica una segunda DCT y se procede a modificar los 64 coeficientes resultantes mediante el uso del algoritmo QIM-DM. Finalmente se aplica la Transformada Discreta Coseno Inversa (IDCT, por sus siglas en inglés) a cada bloque marcado y el nuevo coeficiente DC se agrega a los bloques originales, para realizar una segunda IDCT, dando como resultado tres nuevos componentes R' , G' y B' ; estos se unen y se obtiene la imagen digital marcada I' .

Los resultados experimentales muestran que el sistema propuesto es altamente resistente a los ataques de procesamiento de imágenes más comunes, además de insertar una imagen a color con un mayor numero de tonalidades y ser un sistema de marca de agua totalmente a ciegas, a diferencia de los esquemas existentes en el estado del arte que solo usan logotipos y/o no son a ciegas.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 se explica la técnica QIM, así como también se realiza una breve revisión del espacio de color YCbCr. En la sección 3 se explican los procesos de inserción y de extracción. Los resultados experimentales se muestran en la sección 4 y finalmente en la sección 5 se concluye este trabajo.

II. PRELIMINARES

A. Modulación del Índice de Cuantización

Este método fue propuesto por Chen y Wornel [17] y se ha vuelto ampliamente utilizado en los distintos esquemas de marcas de agua de imágenes [10], [18]– [20] y audio, debido a su excelente robustez contra las distorsiones [17]. QIM agrega datos modulando una secuencia de índices en combinación con los datos de la marca de agua; luego se cuantifica la señal portadora con la secuencia de índices que están asociados a la información oculta. La modulación "Dither" (DM, por sus siglas en inglés) es una variante que mejora el rendimiento del algoritmo QIM. QIM-DM emplea un parámetro especial llamado vector "dither" el cual es utilizado para incrementar la robustez del sistema contra ataques. QIM-DM se puede calcular mediante el uso de la ecuación 1.

$$s'(x; m) = q(x + d(m)) - d(m). \quad (1)$$

donde $s'(x; m)$ es la señal modulada, $q(\cdot)$ es el cuantificador base, el cual depende de la señal original x , la marca de agua m y el vector dither $d(\cdot)$.

B. Espacio de Color YCbCr

El espacio de color YCbCr proporciona una de-correlación fina, además de ser una transformación con un costo computacional bajo y de tener un buen rendimiento. En este espacio de color, la información de luminancia se representa por un solo componente (Y), y la información de color se almacena en dos componentes de crominancia (Cb y Cr). La ecuación 2 se utiliza para realizar la transformación entre el espacio RGB y YCbCr.

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.2989 & 0.5866 & 0.1145 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4186 & -0.8131 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

y con la ecuación 3 se regresa al espacio de color RGB.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.34414 & -0.71414 \\ 1 & 1.7720 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Debido a que el ojo humano es menos sensible a los matices de color que a la cantidad de luz percibida, la información almacenada en los componentes de crominancia (Cb,Cr) se pueden reducir, a esto se le conoce como submuestreo de los cromas(Fig. 1).

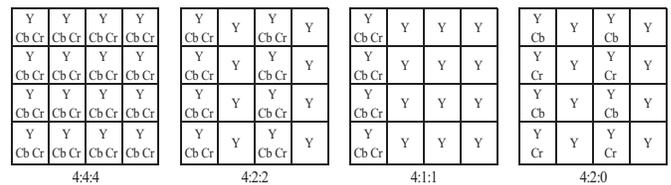


Fig. 1. Submuestreo de las crominancias en una imagen de 4×4 píxeles.

III. MÉTODO PROPUESTO

En esta propuesta se utilizan las propiedades de los coeficientes DC, el coeficiente DC de un bloque DCT es el que contiene la mayor cantidad de energía, por lo que, la modificación directa de este coeficiente llega a degradar la calidad de la imagen contenedora. Sin embargo, es posible la modificación de los coeficientes DC de cada bloque si antes se utilizan para formar un nuevo bloque y a este aplicar una segunda DCT.

A. Generación de la Marca de Agua

A diferencia de las imágenes binarias o las imágenes en escala de grises, una imagen a color contiene un mayor número de colores y tonalidades, de modo que es necesario reducir la información que contienen sin degradar la calidad de la imagen a color que será utilizada como marca de agua.

La marca de agua W se transforma al espacio de color YCbCr y luego se realiza el submuestreo 4:2:0 (W_s), con lo que, por cada 4 píxeles de Y solamente se utiliza 1 de Cb y 1 de Cr (Fig. 1), permitiendo reducir la cantidad de información en una cuarta parte. Luego, cada píxel se transforma a su representación binaria y se forma un vector W_v de tamaño $1 \times [(m \times n) + (\frac{m \times n}{2})]$.

B. Método de Inserción

En la técnica de inserción de una Marca de Agua a Color dentro de los coeficientes DC de una Imagen Digital (MAC-DC), los componentes de color RGB de la imagen portadora I se separan, y cada uno es procesado de manera independiente. El siguiente paso es dividir los canales R, G y B en bloques no traslapados de 8×8 píxeles y en cada uno se aplica la DCT. De los bloques resultantes se toma el coeficiente DC y se forman nuevos bloques de 8×8 coeficientes, y a cada nuevo bloque se le aplica una segunda DCT, el diagrama de este proceso se puede apreciar en la Fig. 2.

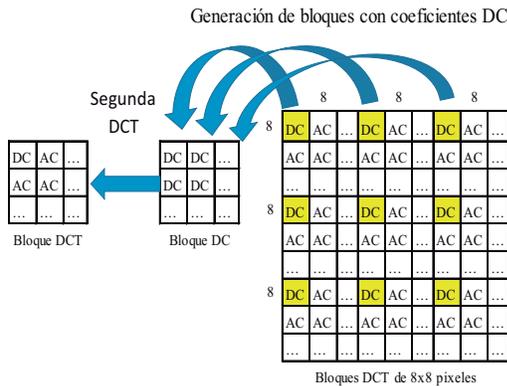


Fig. 2. Proceso de generación de bloques utilizando los coeficientes DC de cada bloque DCT original.

Una vez que se obtiene un nuevo bloque DCT, el valor de cada coeficiente es modificado de acuerdo al algoritmo QIM y el valor binario correspondiente de la marca de agua W_v , de acuerdo a la ecuación 4.

$$I'_i = q(I_i + d(W_v)\Delta) - d(W_v). \quad (4)$$

Además, dos vectores *dither* $d[k, 0]$ y $d[k, 1]$ de tamaño L y una llave Δ son generados pseudo aleatoriamente de acuerdo a las ecuaciones 5 y 6.

$$d[k, 0] = \text{round}(\Delta * R) - \Delta, \quad (5)$$

$$d^{[k,1]} = \begin{cases} d[k, 0] + \frac{\Delta}{2}, & d[k, 0] < 0 \\ d[k, 0] - \frac{\Delta}{2}, & d[k, 0] \geq 0 \end{cases} \quad k=1,2,3,\dots,16, \quad (6)$$

donde, R es un generador de números aleatorios, la distancia entre $d[k, 0]$ y $d[k, 1]$ es $\Delta/2$ y L depende del número de coeficientes seleccionados.

Después de insertar la marca de agua, se aplica la IDCT para obtener un nuevo bloque con todos los coeficientes DC marcados y estos coeficientes se insertan en el bloque original al cual pertenecen, por último, se realiza otra IDCT a cada bloque y se regresa la imagen al dominio espacial. A continuación, se unen los canales R', G' y B' , dando como resultado la imagen digital I' con marca de agua. La Fig. 3 presenta el diagrama de bloques de todo el proceso descrito con anterioridad.

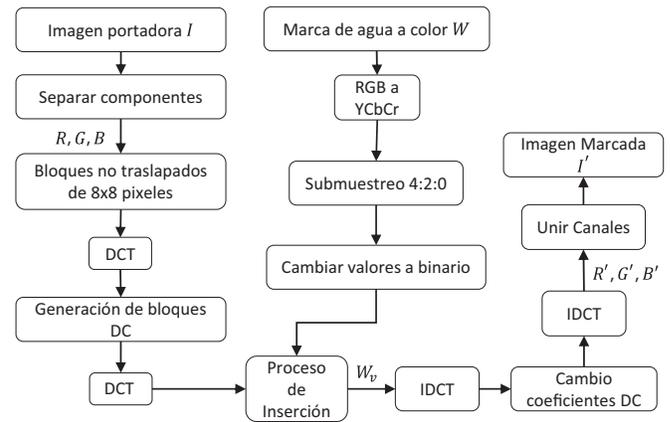


Fig. 3. Diagrama a bloques del proceso de Inserción.

C. Método de Extracción

MAC-DC se basa en un algoritmo de extracción a ciegas, lo que significa que no se requiere información adicional para poder recuperar la marca de agua, solamente es necesario la imagen marcada, el proceso de extracción se puede observar en la Fig. 4.

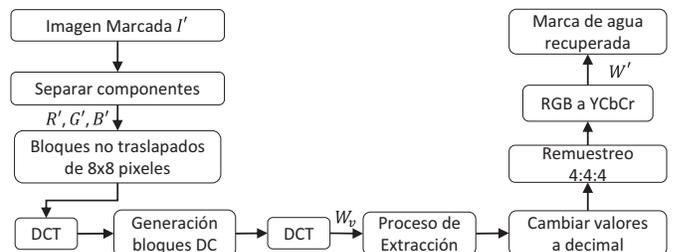


Fig. 4. Diagrama a bloques del proceso de Extracción.

Lo primero es separar los componentes R', G', B' de la imagen marcada I' y de cada bloque extraer la información de

la marca de agua a color. Cada imagen se divide en bloques no traslapados de 8×8 píxeles y a cada bloque se le aplica la DCT, el siguiente paso es formar nuevos bloques de 8×8 solamente con los coeficientes DC de cada bloque anterior (Fig. 2) y a este nuevo bloque aplicar una segunda DCT. Los bits de la marca de agua W_v son recuperados después de evaluar todos los coeficientes del bloque, mediante el uso de la ecuación 7

$$w'_v = \begin{cases} 0 & \text{si } d_{min1} < d_{min2} \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (7)$$

donde d_{min1} y d_{min2} se calculan a partir de las ecuaciones 8 y 9.

$$d_{min1} = ((C'_i + \frac{d[k,0]}{\Delta}) * \Delta) - d[k,0] \quad (8)$$

$$d_{min2} = ((C'_i + \frac{d[k,1]}{\Delta}) * \Delta) - d[k,1] \quad (9)$$

donde C'_i es el bloque de coeficientes DC, $d[k,0]$ y $d[k,1]$ son vectores *dither* que se obtienen utilizando la ecuación 5, finalmente Δ es la distancia entre estos dos vectores.

Los pasos anteriores se repiten hasta que se recuperan por completo los valores de la marca de agua W_v . Una vez que se ha recuperado la información binaria en su totalidad, esta se convierte a valores decimales; es importante mencionar que la marca de agua que se recuperó, es una imagen YCbCr en formato 4:2:0, por lo que es necesario hacer un re-muestreo y así tener una imagen 4:4:4, para esto se duplica el valor de los píxeles recuperados de Cb y Cr en sus vecinos más cercanos, como se muestra en la Fig. 5.

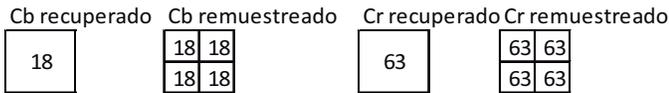


Fig. 5. Proceso de remuestreo en los componentes Cb y Cr.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema MAC-DC se programó usando el lenguaje C# y el Framework .Net 4.5. Para realizar las pruebas se utilizó un equipo con procesador Intel® Pentium D 2.79GHz 2.80 GHz, memoria RAM de 2.00 GB y S.O. Windows® 8.1 32-bits.

De la base de datos USC-SIPI [22] se tomaron las imágenes a) Mandril, b) Lena, c) Pimientos, d) F-16, e) Carro, f) Casa (Fig. 6), las cuales fueron redimensionadas a un tamaño de 1024×728 píxeles y se utilizaron como portadoras de la marca de agua. Se hizo esta selección, para poder demostrar que el sistema propuesto puede ser empleado en cualquier tipo de imagen, por ejemplo, la imagen a) Mandril es una imagen con muchos detalles y muy texturizada, en cambio la imagen b) Lena tiene tanto texturas, como áreas suaves y contornos definidos. Por otro lado se tiene las imágenes c) Pimientos y d) F-16 las cuales cuentan con áreas suaves y pocos detalles y texturas.

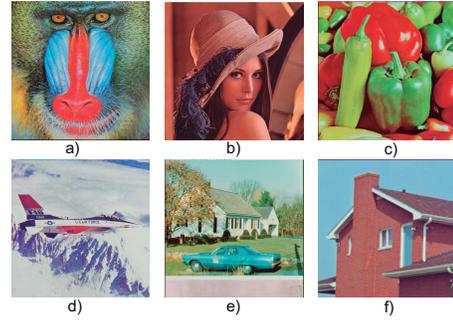


Fig. 6. Imágenes empleadas como portadoras de la marca de agua.

Para poder realizar una comparación con los sistemas existentes [11], [13]– [16], se emplearon las mismas imágenes que ellos emplean en sus pruebas (7 a), b), c)), las cuales tienen una cantidad muy limitada de colores, sin embargo, al no contar con la referencia específica de estas imágenes, lo que se hizo fue tomarlas directamente de sus artículos publicados. También, se utilizó una imagen con tonalidades que van desde 0 a 255 y sus diferentes combinaciones posibles dentro del espacio de color RGB (7 d)), para demostrar que MAC-DC es capaz de insertar una marca de agua distinta a los sistemas analizados del estado del arte. Todas las marcas de agua se redimensionaron para tener un tamaño de 64×64 píxeles.

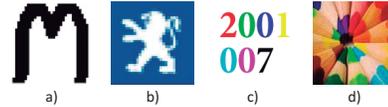


Fig. 7. Imágenes utilizadas como marca de agua. a) imagen binaria [11], b) logo Peugeot [15], b) Números [15]. c) Lápices de color.

La resistencia de MAC-DC contra ataques como compresión JPEG, JPEG:2000, ruido impulsivo y gaussiano, Filtro Promedio, Filtro de Mediana; se evaluó mediante la Relación Señal-a-Ruido Pico (PSNR, por sus siglas en inglés), el Índice Estructural de Medida de Similitud (SSIM, por sus siglas en inglés) y el Coeficiente de Correlación Normalizado (CCN) como criterios de evaluación. También se utilizó el Índice de Similitud de Características (FSIM, por sus siglas en inglés) en su versión a color como medida de calidad.

El PSNR representa la fidelidad entre la señal original x y la señal resultante y expresada en decibeles (dB), y se obtiene mediante el uso de la ecuación 10.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[\frac{255^2}{MSE} \right], \quad (10)$$

donde el MSE para una imagen a color se calcula usando la ecuación 11.

$$MSE = \frac{1}{3MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^3 [(x(i, j, k) - y(i, j, k))^2]. \quad (11)$$

donde M y N representan el tamaño de la imagen, x es la imagen original y y es la imagen marcada, (i, j) son las posiciones de los píxeles y k es el canal.

El SSIM [22] considera la degradación de la imagen como el cambio percibido en la información estructural, separando la medida de similitud en luminancia, contraste y estructura, calculándose mediante el uso de la ecuación 12.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (12)$$

donde x y y son las dos imágenes a comparar, μ_x y μ_y son la media y σ_x y σ_y son la desviación estándar de x y y respectivamente, σ_{xy} es el coeficiente de correlación entre las dos imágenes. C_1 , C_2 y C_3 son constantes utilizadas para estabilizar la ecuación cuando los denominadores se aproximan a cero.

El CCN es una medida de calidad comúnmente utilizada para evaluar la robustez de los algoritmos de marca de agua, la cual cuantifica la resistencia contra los ataques. El valor CCN entre la marca de agua incrustada W y la marca de agua extraída W' se define a partir de la ecuación 13.

$$CCN(w, w') = \frac{\sum_i^n (w_i - \bar{w})(w'_i - \bar{w}')}{\sqrt{\sum_i^n (w_i - \bar{w})^2 (w'_i - \bar{w}')^2}}. \quad (13)$$

donde, si dos marcas de agua son idénticas, entonces su valor es 1; de lo contrario, si son completamente opuestas, entonces su valor es -1, y si no están correlacionadas por completo, el valor es igual a 0.

El cálculo del índice FSIM consta de dos etapas. En la primera etapa, se calcula el mapa de similitud local y en la segunda, se agrupa el mapa de similitud en una única puntuación de similitud [23], y de forma general el FSIM entre f_1 y f_2 , se calcula mediante la ecuación 14

$$FSIM(x, y) = \frac{\sum_{x \in \Omega} S_L(x) \bullet PC_m(x)}{\sum_{x \in \Omega} PC_m(x)} \quad (14)$$

donde Ω representa la imagen entera en el dominio espacial.

Durante los primeros experimentos se analizó el comportamiento del esquema propuesto cuando se modificaban directamente los coeficientes DC de la DCT y cuando se toman estos coeficientes DC y con ellos se formaron nuevos bloques de 8×8 píxeles, a los cuales se les aplica una segunda DCT.

TABLA I
PSNR, SSIM Y FSIM DE LAS IMÁGENES PORTADORAS DESPUÉS DE
INSERTAR LA MARCA DE AGUA EN LOS COEFICIENTES DC

	DC Directo			MAC-DC		
	PSNR (dB)	SSIM	FSIM	PSNR (dB)	SSIM	FSIM
Baboon	38.68	0.963	0.982	44.80	0.992	0.998
Lena	38.77	0.987	0.994	44.82	0.995	0.999
Peppers	38.86	0.964	0.984	44.82	0.996	0.998
F-16	38.79	0.958	0.975	44.73	0.989	0.995
Car	38.76	0.971	0.989	44.72	0.989	0.992
House	38.70	0.954	0.973	44.78	0.991	0.994

Como se pudo comprobar en la Tabla I, existe una diferencia al modificar el coeficiente DC directamente y cuando se utiliza MAC-DC. Aquí podemos observar que el método MAC-DC tiene un aumento considerable de 6 dB, 0.026 y 0.016 (PSNR, SSIM y FSIM respectivamente), con lo que podemos asegurar

que la distorsión que sufre la imagen portadora al momento de insertar la marca de agua es mínima, con lo que logra pasar inadvertida ante el SVH.

Continuando con las pruebas, el esquema MAC-DC se comparó con los métodos presentados en [11], [13]– [16] y así poder demostrar su robustez ante los ataques de procesamiento de imágenes más comunes.

En la Tabla II se puede observar que la intrusión de la marca de agua dentro de la imagen portadora es mínima, además se mantiene constante el comportamiento de los valores obtenidos, sin importar el tipo de imagen que se use para insertar la marca de agua, demostrando que la inserción de la marca de agua pasa inadvertida ante el SVH.

TABLA II
PSNR / SSIM / FSIM DE LAS IMÁGENES PORTADORAS DESPUÉS DE
INSERTAR LA MARCA DE AGUA

	[11]	[13]	[14]	[15]	[16]	MAC-DC
Baboon	39.28 / 0.924 / 0.956	37.89 / 0.915 / 0.962	40.49 / 0.997 / 0.999	42.07 / 0.990 / 0.996	28.89 / 0.789 / 0.851	44.80 / 0.992 0.998
Lena	40.30 / 0.957 / 0.987	42.27 / 0.964 / 0.984	42.39 / 0.996 / 0.998	44.69 / 0.996 / 0.998	33.31 / 0.949 / 0.991	44.82 / 0.995 0.999
Peppers	40.33 / 0.961 / 0.990	32.03 / 0.898 / 0.953	34.46 / 0.927 / 0.989	40.76 / 0.974 / 0.992	33.61 / 0.912 / 0.946	44.82 / 0.996 0.998
F-16	41.03 / 0.973 / 0.994	34.42 / 0.920 / 0.967	38.39 / 0.954 / 0.993	44.50 / 0.992 / 0.997	34.47 / 0.918 / 0.959	44.73 / 0.989 0.998
Car	40.42 / 0.978 / 0.994	39.62 / 0.937 / 0.968	41.14 / 0.983 / 0.993	43.85 / 0.975 / 0.987	34.67 / 0.936 / 0.972	44.72 / 0.992 0.992
House	40.07 / 0.942 / 0.976	40.92 / 0.952 / 0.979	43.40 / 0.967 / 0.986	44.53 / 0.993 / 0.995	33.19 / 0.936 / 0.987	44.78 / 0.988 0.994

Finalmente, en la Tabla III se puede observar, que MAC-DC obtiene valores muy similares a los que presentan los distintos métodos del estado del arte, incluso la propuesta MAC-DC logra mejorar el desempeño al recuperar la marca de agua cuando la imagen portadora es atacada con filtro de mediana, además de tener mayor resistencia a compresión JPEG:2000.

TABLA III
CCN OBTENIDO AL USAR DISTINTOS ESQUEMAS DE MARCAS DE AGUA
PARA RECUPERAR LA MARCA DE AGUA PEUGEOUT

	[13]	[14]	[15]	[16]	[11]	MAC-DC
Sin ataques	0.9741	0.9801	0.9989	0.9976	1	0.9998
JPEG QF=60	0.8243	0.9598	0.9664	0.9429	1	0.9824
JPEG2000 5:1	0.4404	0.9598	0.9664	0.9429	-	0.9900
Ruido impulsivo 1%	0.5779	0.8477	0.9437	-	0.3429	0.9307
Ruido Gaussiano $\sigma^2 = 0.006$	0.4127	0.8786	0.9605	-	0.3219	0.9611
Escalamiento 100%	0.8510	0.7459	0.9356	-	0.9482	0.9231
Filtro Promedio 3x3	0.4267	0.3009	0.5282	-	0.7816	0.8662
Filtro Mediana 3x3	0.1701	0.3009	0.6042	-	0.9876	0.9982

Un punto muy importante es que MAC-DC no solamente se puede utilizar para almacenar una imagen binaria como la que se usa en [11] o imágenes con muy pocos colores como las empleadas en [13]– [16]. MAC-DC soporta la inserción de imágenes digitales a color con un mayor rango de colores y tonalidades, las cuales no son usadas en los métodos del estado del arte; además el método propuesto de extracción de la marca de agua es totalmente a ciegas, ya que no hace falta información adicional para recuperar la marca de agua.

De los diferentes ataques mostrados en la Tabla II, el más común es la compresión JPEG, pues este formato es el más utilizado para la distribución de imágenes digitales y aunque hay veces que llega a ser no intencional, la compresión puede

llegar a eliminar la marca de agua, por lo que es necesario que el sistema sea resistente ante este ataque en particular, y como se puede apreciar en la Fig. 8 y la Fig. 9 el esquema propuesto es resistente a factores de calidad $QF \geq 60$.

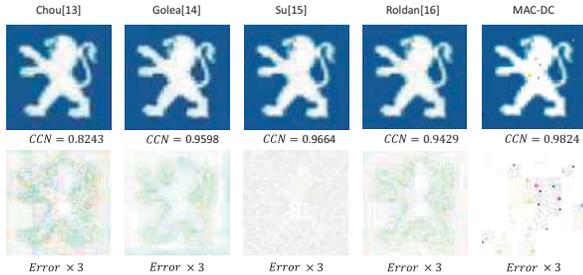


Fig. 8. Recuperación de la marca de agua Peugeot, después de realizar la compresión JPEG $QF = 60$.

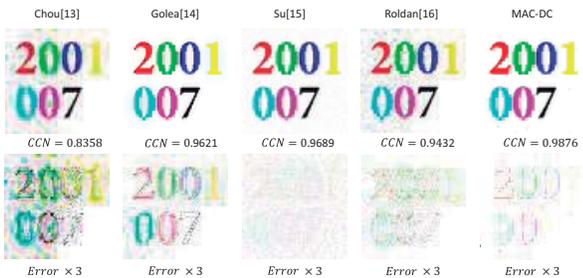


Fig. 9. Recuperación de la marca de agua Números, después de realizar la compresión JPEG $QF = 60$.

MAC-DC también resistió a la compresión JPEG:2000, como se puede observar en la Fig. 10 y la Fig. 11.

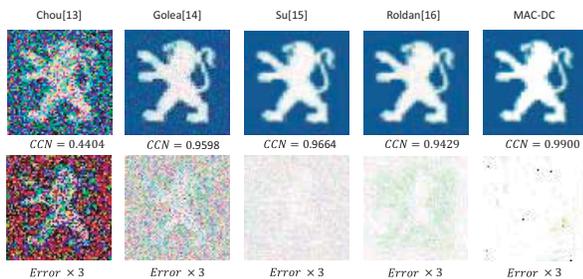


Fig. 10. Recuperación de la marca de agua Peugeot, después de realizar compresión JPEG:2000 con una relación de 5:1.

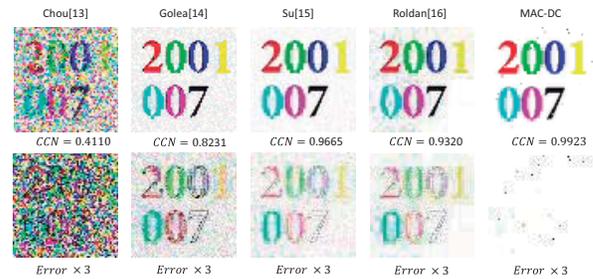


Fig. 11. Recuperación de la marca de agua Números, después de realizar compresión JPEG:2000 con una relación de 5:1.

La imagen marcada también debe ser resistente al ruido, pues al ser transmitida a través de un medio digital, esta puede llegar a contaminarse. En las figuras 12 y 13 se presenta la marca de agua recuperada después de que la imagen que la contiene fue contaminada con dos distintos tipos de ruido (Impulsivo y Gaussiano), demostrando que es posible su recuperación. Como se puede observar, el método propuesto demuestra resistir este tipo de ataques, además de que se mantienen valores de CCN muy cercanos al método propuesto en [15], dejando en claro que la marca de agua puede recuperarse aun cuando la imagen portadora fuera contaminada por el ruido adquirido durante la transmisión de la misma.

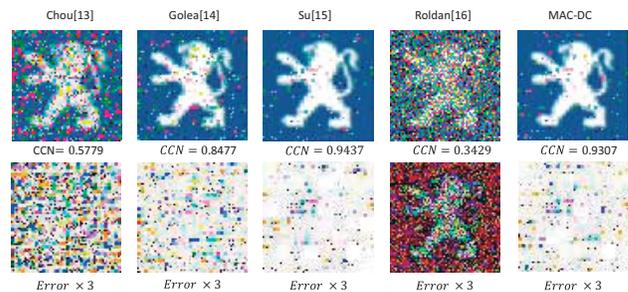


Fig. 12. Recuperación de la marca de agua Peugeot, después de contaminar la imagen portadora con 1% de ruido Impulsivo.

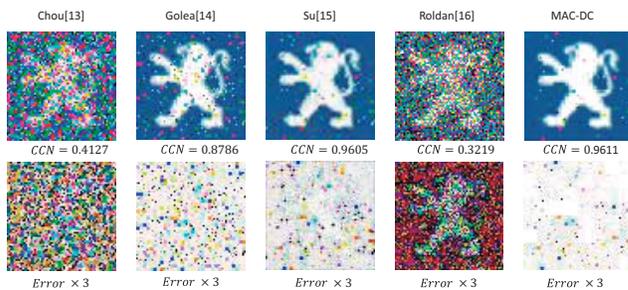


Fig. 13. Recuperación de la marca de agua Peugeot, después contaminar la imagen portadora con ruido $\sigma^2 = 0.006$.

Para realizar una comparativa con el método propuesto por Mohammad [11], se decidió que la marca de agua aunque es binaria, se trataría como una imagen digital a color, es

decir, los valores utilizados fueron de 0 a 255 y 3 canales de información, de tal forma que se pueda usar como una imagen RGB y así poder realizar el proceso de marca de agua MAC-DC sin añadirle modificaciones o cambios extras, estos resultados experimentales y la comparativa con dicho método, se pueden observar en la Fig. 14.

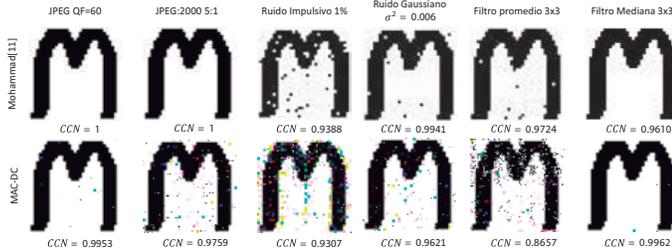


Fig. 14. Comparativa de la marca de agua recuperada entre [11] y MAC-DC.

Como se pudo apreciar en la Fig. 14, también es posible el uso de marcas de agua binarias con el esquema MAC-DC y demuestra su robustez ante algunas de las técnicas de modificación de imágenes más comunes, además el valor para CCN es muy cercano a los valores los obtenidos en [11].

Si bien en la marca de agua recuperada usando MAC-DC visualmente presenta un poco de mas ruido y píxeles de colores, esto se debe a que no se hizo ningún cambio en el sistema, por lo que en lugar de tratarse como una imagen binaria se uso como imagen a color; por lo que se propone como trabajo a futuro realizar los ajustes necesarios en el contexto de imágenes binarias y así lograr obtener un resultado superior al presentado en [11].

Un punto a resaltar es que MAC-DC no está desarrollado únicamente para emplear imágenes binarias como marca de agua, este sistema se desarrolló para utilizar imágenes digitales a color de 24 bits de profundidad, además de ser un esquema de marca de agua totalmente a ciegas, algo de lo que carecen los métodos que fueron analizados en el estado del arte.

En una siguiente prueba, se hizo la inserción de una imagen digital a color, la cual fue utilizada como marca de agua a color (Fig. 7 d)), esta marca de agua contiene un mayor rango de colores ($2^{24} = 16,777,216$ de colores diferentes), a diferencia de las imágenes que son empleadas comúnmente en los esquemas de marcas de agua, demostrando que el comportamiento de MAC-DC es similar, sin importar el tipo de marca de agua que se utilice, con lo que nuestra propuesta puede emplear cualquier tipo de imagen como marca de agua.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se pueden observar en la Figura 15.

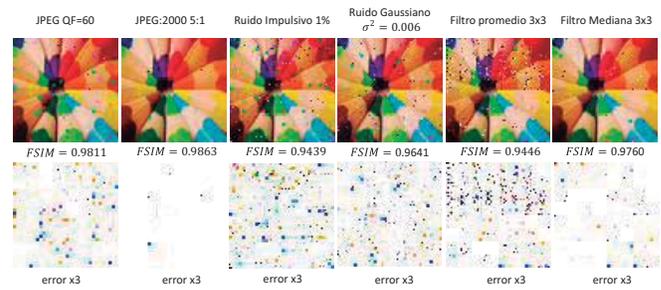


Fig. 15. Marca de agua colores, recuperada después de realizar diversos ataques a la imagen portadora.

Como se pudo observar en la Fig. 15, la marca de agua recuperada tiene una muy buena calidad, pues en todas se obtiene un valor para $FSIM \geq 0.9400$, además de forma subjetiva, se puede decir que las formas y texturas de la imagen a color empleada como marca de agua se pueden apreciar sin dificultad.

Del estado del arte analizado en este trabajo, solamente se realizó la comparación del sistema MAC-DC usando la imagen a color como marca de agua con el método propuesto por Golea [14] y Su [15], esto se debe a que Monhammad [11] usa una imagen binaria, el esquema de Chou [13] hace una codificación de los colores que hay en la imagen números (8 colores) y el esquema presentado por Roldan [16], tiene otras funciones, (detección de alteraciones). En la Fig. 16 se puede observar la comparativa realizada al usar una imagen con un mayor rango de colores.

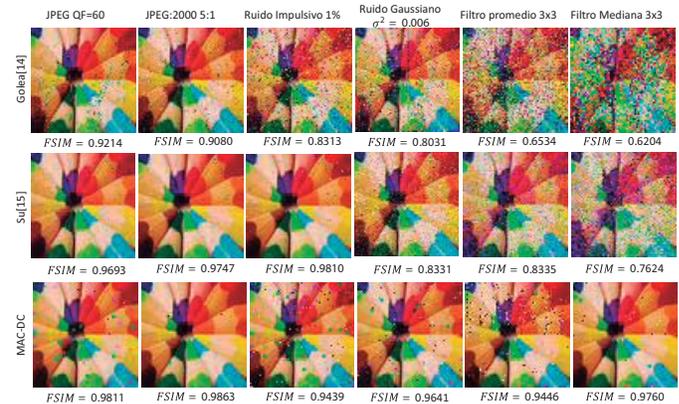


Fig. 16. Comparativa de la marca de agua colores, recuperada usando los métodos Golea [14], Su [15] y MAC-DC.

De la Fig. 16 se puede observar que aun cuando los métodos del estado del arte funcionan cuando se emplea una imagen a color, su comportamiento no es el mismo cuando utilizan como marca de agua imágenes de 24 bits de profundidad, incluso en algunos ataques, se puede observar que las tonalidades de la imagen cambian. Si bien MAC-DC pierde cuando se trata de ruido impulsivo, en los demás ataques los valores obtenidos para FSIM son mas altos.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentó un algoritmo de marca de agua invisible para la protección de la propiedad intelectual de

imágenes digitales, en el cual se logró insertar una imagen digital a color con 24 bits de profundidad, además de demostrar que el método propuesto también puede usar imágenes binarias o logotipos con muy poca cantidad de colores. El método propuesto demostró ser resistente a la mayoría de los ataques que comúnmente se realizan sobre las imágenes digitales.

Una de las aportaciones más importantes de esta propuesta es la de insertar una imagen digital a color como marca de agua, ya que el uso de este tipo de imágenes es un gran desafío para los métodos tradicionales de marcado de agua invisible, esto se debe principalmente a la gran cantidad de datos que se deben insertar sin que estos degraden la calidad de la imagen contenedora, además de que el esquema propuesto es totalmente a ciegas, porque solamente se requiere de la imagen con la marca de agua insertada para poder extraer la marca, a diferencia de otros esquemas en donde es necesaria la imagen original u otros datos utilizados durante el proceso de inserción.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT, proyecto 220347), por el apoyo otorgado para el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] I. Cox and M. Miller, *The first 50 years of electronic watermarking*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2002, no. 2, pp. 126–132, 2002.
- [2] I. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich and T. Kalker, *Digital Watermarking and Steganography Book*, Burlington: Morgan Kaufmann, 2008.
- [3] J. Nin and S. Ricciardi, *Digital Watermarking Techniques and Security Issues in the Information and Communication Society*, in 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp. 1553–1558, 2013.
- [4] R. Reyes, C. Cruz, M. Nakano-Miyatake and H. Perez-Meana, *Digital Video Watermarking in DWT Domain Using Chaotic Mixtures*, IEEE Latin America Transactions, vol. 8, no. 3, pp. 304–310, 2010.
- [5] V. Hernandez-Guzman, C. Cruz-Ramos, M. Nakano-Miyatake and H. Perez-Meana, *Watermarking Algorithm based on the DWT*, IEEE Latin America Transactions, vol. 4, no. 4, pp. 257–267, 2006.
- [6] I. J. Cox, M. L. Miller, J. A. Bloom, J. Fridrich and T. Kalker, *Digital Watermarking and Fundamentals*, 2nd, Morgan Kaufmann Publishers, 2008.
- [7] P. Singh and R. Chadha, *A Survey of Digital Watermarking Techniques, Applications and Attacks*, International Journal of Engineering and Innovative, vol. 2, no. 9, pp. 165–175, 2013.
- [8] U. Yadav, J. P. Sharma, D. Sharma and P. K. Sharma, *Different Watermarking Techniques & its Applications: A Review*, International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 5, no. 4, pp. 1288–1294, 2014.
- [9] H. Tao, L. Chongmin, J. M. Zain and A. N. Abdalla, *Robust image watermarking theories and techniques: A review*, Journal of Applied Research and Technology, vol. 12, no. 1, pp. 122–138, 2014.
- [10] D. Renza, D. M. Ballesteros and H. D. Ortiz, *Text Hiding in Images Based on QIM and OVSF*, IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 3, pp. 1206–1212, 2016.
- [11] M. Moosazadeh and G. Ekbatanifard, *An improved robust image watermarking method using DCT and YCoCg-R color space*, Optik (Stuttg), vol. 140, pp. 975–988, 2017.
- [12] Y. Liu, S. Tang, R. Liu, L. Zhang and Z. Ma, *Secure and robust digital image watermarking scheme using logistic and RSA encryption*, Expert Systems with Applications, vol. 97, pp. 95–105, 2018.
- [13] C.-H. Chou and T.-L. Wu, *Embedding Color Watermarks in Color Images*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2003, no. 1, p. 548941, 2003.
- [14] N. El-Houda Golea, R. Seghir and R. Benzid, *A bind RGB color image watermarking based on singular value decomposition*, in ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications - AICCSA, pp. 1–5, 2010.
- [15] Q. Su, G. Wang, S. Jia, X. Zhang, Q. Liu and X. Liu, *Embedding color image watermark in color image based on two-level DCT*, Signal, Image Video Processing, vol. 9, no. 5, pp. 991–1007, 2015.
- [16] L. Rosales Roldan, M. Cedillo Hernandez, J. Chao, M. Nakano Miyatake and H. Perez Meana, *Watermarking-based Color Image Authentication with Detection and Recovery Capability*, IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 2, pp. 1050–1057, 2016.
- [17] B. Chen and G. W. Wornell, *Quantization Index Modulation Methods for Digital Watermarking and Information Embedding of Multimedia*, The Journal of VLSI Signal Processing, vol. 27, no. 1/2, pp. 7–33, 2001.
- [18] A. Phadikar, *Multibit quantization index modulation: A high-rate robust data-hiding method*, Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, vol. 25, no. 2, pp. 163–171, 2013.
- [19] Y. Jiang, Y. Zhang, W. Pei and K. Wang, *Adaptive spread transform QIM watermarking algorithm based on improved perceptual models*, AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 67, no. 8, pp. 690–696, 2013.
- [20] V. Mitekin and V. Fedoseev, *A new QIM-based watermarking algorithm robust against multi-image histogram attack*, Procedia Engineering, vol. 201, pp. 453–462, 2017.
- [21] Ming Hsieh, *Signal and image processing institute (SIPI) Image Database*, [Online]. Available: <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc.>, 2019.
- [22] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E.P. Simoncelli, *Image quality assessment: from error visibility to structural similarity*, IEEE Transactions Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, 2004.
- [23] L. Zhang, L. Zhang, X. Mou and D. Zhang, *FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment*, in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 20, no. 8, pp. 2378–2386, 2011.



David Octavio Muñoz Ramírez Originario de la Ciudad de México, (Enero 1980), estudiante de posgrado en Doctorado en Comunicaciones y Electrónica en El Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán. En el 2001, participó en un concurso de desarrollo de software y tiene la oportunidad de integrarse como becario en SIGA Training Services de México, representante de Borland en el país. Del 2002 al 2016 se ha desempeñado como Soporte Técnico, Administrador de red, Ingeniero de Soporte Técnico, Programador Jr., Líder de Proyecto y Gerente de Sistemas. Sus áreas de investigación de son: Marcas de Agua Digitales, Derechos de Autor, Procesamiento Digital de Imágenes, Programación en Paralelo, Desarrollo de Software, Seguridad de la Información..



Volodymyr Ponomaryov (Ph.D.'1974, Dr. Sc.'1981, Full Professor' 1984). Trabaja como profesor investigador en el IPN CM. Es Miembro del SNI (México), Nivel III. Sus principales actividades de investigación se basan en: procesamiento de imágenes y señales, filtrado en tiempo real, sensores médicos, etc. Es autor de más de 200 artículos científicos internacionales, 350 artículos en extenso en congresos internacionales, además de 23 patentes en ex-USSR, Rusia y México, y cinco libros científicos en editoriales internacionales.



Rogelio Reyes Reyes Recibió el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, el grado de M. en C. de Ingeniería en Microelectrónica, y el grado de Doctor en Comunicaciones y Electrónica en el IPN, en 1999, 2003 y 2009, respectivamente. Actualmente es profesor investigador en el IPN. Sus áreas de interés son la esteganografía, las marcas de agua y el procesamiento digital de imágenes.



Clara Cruz Ramos recibió el título de Ingeniera en Comunicaciones y Electrónica, el grado de M. en C. de Ingeniería en Microelectrónica, y el grado de Doctor en Comunicaciones y Electrónica en el IPN, en 1999, 2003 y 2009 respectivamente. Actualmente es profesora investigadora en el IPN. Sus áreas de investigación son reconocimiento de patrones, procesamiento de imágenes y marcas de agua.



Sergiy N. Sadovnychiy recibió el grado de Doctor en el Instituto de Aviación de Kharkov (ahora Universidad Nacional Aeroespacial), Ucrania, en 1991. Actualmente, se encuentra en el Instituto Mexicano del Petróleo, México. Sus intereses de investigación incluyen procesamiento digital de señales e imágenes, comunicaciones y diagnóstico acústico