UT-00090-SS1

Year - 2016

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional

Laboratorio de Tecnologías de Información,
CINVESTAV-Tamaulipas

Esquema de marcado de agua digital reversible robusto a reemplazo de contenido para imágenes digitales.

Tesis que presenta:

Dan Williams Robledo Cruz

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Computación

Director de la Tesis:
Dr. José Juan García Hernández

Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Agosto, 2015

226740-1001

This research was partially funded by project number CB-2010-01-150910 from "CONACyT"

La tesis presentada por Dan Williams Robledo Cruz fue aprobada por:

Dr. César Torres Huitzil

Dr. Willfrido Gómez Flores

Dr. José Juan García Hernández, Director

Cd. Victoria, Tamaulipas, México., 16 de Agosto de 2015

A mi familia y amigos.

Agradecimientos

- A mi familia, especialmente a mi madre y mi Padrino por su invaluable cariño y apoyo que siempre me han brindado.
- A mi novia por estar siempre a mi lado y darme palabras de aliento en todo momento.
- A mis amigos por apoyarme para salir adelante.
- A mis compañeros de generación por su apoyo.
- A mi Director de tesis, el Dr. José Juan García Hernández, por brindarme la confianza de realizar este trabajo, su asesoría, criticas y sugerencias durante el desarrolo de esta tesis de maestría.
- A mis revisores, el Dr. César Torres Huitzil y Dr. Willfrido Gómez Flores por sus observaciones y recomendaciones, por compartir sus conocimientos y por el tiempo prestado durante mi estancia en la maestría.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) or el apoyo financiero ofrecido.
- Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional por brindarme una formación profesional durante mis estudios de maestría.

Índice General

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Índice de Algoritmos

Resumen

Esquema de marcado de agua digital reversible robusto a reemplazo de contenido para imágenes digitales.

por

Dan Williams Robledo Cruz

Laboratorio de Tecnologías de Información, CINVESTAV-Tamaulipas
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2015
Dr. José Juan García Hernández, Director

Los esquemas de marcado de agua digital convencional tienen la capacidad de insertar información de manera oculta en una señal portadora; éstos deben cumplir con las siguientes propiedades: imperceptibilidad, robustez y carga útil. Uno de los inconvenientes de dichos esquemas se presenta en el proceso de extracción de la marca, produciendo una alteración irreversible en la imagen original, en la mayoría de las áreas de aplicación esto no es relevante; sin embargo, en el área médica y militar, estas modificaciones son inaceptables. Debido a esto, surge el esquema reversible frágil, el cual tiene la capacidad de poder recuperar la imagen original después del proceso de extracción, sólo si la imagen marcada no sufrió ninguna modificación. Por el contrario, si la imagen es comprometida, en la literatura existe otro esquema llamado reversible auto-recuperable, que a diferencia del esquema reversible frágil, posee la propiedad de robustez, permitiendo recuperar la imagen si ésta sufre alguna modificación al momento de la transmisión. Sin embargo, el esquema auto-recuperable no tiene espacio suficiente para insertar información oculta debido a que ocupan todo el espacio al insertar los datos de control necesarios para compensar ataques.

En este trabajo se propone un esquema de marcado de agua digital reversible y robusto a ataques de reemplazo de contenido, este esquema combina un algoritmo frágil con un algoritmo auto-recuperable utilizando un mecanismo de dos bloques.

- El primer bloque utiliza un algoritmo frágil para insertar información (marca de agua) y los datos de control para reconstruir la imagen original.

- El segundo bloque añade información para detectar las regiones que fueron modificadas y recuperar la imagen marcada en el bloque uno.

Los resultados obtenidos de la combinación de los dos algoritmos, para diferentes condiciones de robustez y carga útil, demuestran que es posible obtener un esquema reversible robusto a ataques de reemplazo de contenido. Además se investigó de manera experimental el comportamiento de la distorsión conjunta debido a la combinación de los dos algoritmos.

Abstract

Reversible watermarking scheme with robustness against content replacement attack for digital images.

by

Dan Williams Robledo Cruz

Information Technology Laboratory, CINVESTAV-Tamaulipas
Research Center for Advanced Study from the National Polytechnic Institute, 2015
Dr. José Juan García Hernández, Advisor

Digital conventional watermarking schemes have the ability to hide information into a host signal achieving the following properties: imperceptibility, robustness and payload. The main drawback of these schemes is the irrevesible modifications in the host signal. Although in most of the application areas these are not relevant, in medical and military areas these modifications are not allowed. Then, fragile reversible watermarking was created as solution; this approach has the capacity to restore the host image after the extraction process, only if the watermark image did not suffer any modification. On the other hand, if the image is compromised, in the literature there is another approach called reversible self-recovery which, unlike the fragile reversible scheme, has the property of robustness, allowing to recover the image if it suffers any modifications during transmission. Nevertheless, the self-recovery scheme uses all the payload space for control data required to signal recovery, thus there are not more space to insert hidden information.

However, the self-recovery doesn't have enough space to insert hidden information as all the space is used for the control data required for signal recovering

This thesis proposes a digital robust reversible watermarking scheme, this scheme combines a fragile reversible algorithm with self-recovery algorithm using two stages.

- First stage uses a fragile algorithm to insert information (watermark) and control data to restore the host image.

- Second stage adds infomation to detect tampered regions and recover the watermarked image in first stage.

The results obtained from the combination of the algorithms under different conditions of robustness and payload, show that it is possible to achieve a reversible watermarking process robust to content replacement attacks. Furthermore, the behavior of the joint distortion due to the combination of the two groups of algorithms was studied.

Nomenclatura

IHW	Information Hiding Workshop
SPIE	Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers
RWS	Esquema de marcado de agua reversible
EPR	Registro electrónico de pacientes (Electronic Patient Record)
RRWS	Esquema de marcado de agua reversible robusto
DE	Expansión de diferencia
MSB	Bit mas significativo (Most Significant Bit)
LSB	Bit menos significativo (Least Significant Bit)
DCT	Discrete Cosine Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
SSM	Spread-Spectrum Modulation
PSNR	Relación señal a ruido
MD5	Message Digest 5
SHA	Secure Hash Algorithm

1

Introducción

1.1 Antecedentes y motivación para el proyecto

El concepto de marca de agua fue utilizado por primera vez en 1282 en Frabriano, Italia [1, 2, 3]. Las marcas de agua eran hechas por la adición de patrones de alambres finos a los moldes de papel; sin embargo, el propósito de estas marcas de agua es incierto, es decir, la identificación de los moldes donde fueron hechas las hojas (marcas comerciales para identificar al fabricante del papel) posiblemente representaban signos míticos o simplemente decoración.

En el siglo XVIII las marcas de agua sobre papel se volvieron más útiles, éstas eran usadas como marcas comerciales y para grabar la fecha de elaboración de documentos. Con el paso del tiempo las marcas de agua comenzaron a usarse como método anti-falsificación en dinero y documentos. En 1954 Emil Hembrooke de *Muzak Corporation* presentó una patente de marcas de agua en música, la cual consistía en introducir un código de identificación en la música mediante la aplicación intermitente

de un filtro rechaza-banda (*narrow notch*) centrado a 1 KHz [4].

En 1979, Szepanski [5] describe el modelo de una máquina detectable en la cual se colocan los documentos con el fin de luchar contra la falsificación. Años después, Holt *et al.* [6] describen un método para insertar un código de identificación en una señal de audio. Sin embargo, Komatsu y Tominaga [7], fueron los que utilizaron por primera vez el término marca de agua digital, aunque no fue hasta principios de 1990 que el término empezó a ponerse de moda.

El término marcas de agua digital fue usado por primera vez en 1993, cuando Tirkel presentó dos técnicas de marcado de agua para ocultar información en imágenes [8]. Pocos años después, el interés por el estudio de las marcas de agua digital comenzó a crecer. En 1996 se crea el primer seminario de ocultación de la información IHW[1] [9], incluyendo marcas de agua como sus temas principales. En 1999 la SPIE[2] comenzó conferencias dedicadas específicamente a temas de seguridad y marcas de agua en contenidos digitales [10, 11].

Las marcas de agua digitales se consideran una manera de comunicación secreta, estos esquemas emplean técnicas para insertar datos de forma encubierta en una señal portadora, los datos insertados se conocen como marca de agua (*watermark*). La inserción de las marcas de agua provoca modificaciones irreversibles en la señal portadora, sin embargo, existen escenarios donde se trabajan con imágenes sensibles (e.g., exploración espacial, investigación militar y diagnóstico médico), donde es crucial poder recuperar la imagen original sin ninguna distorsión. Por otra parte, los esquemas de marcado de agua reversible (RWS) permiten recuperar sin ninguna distorsión la señal portadora, teniendo como objetivo principal preservar la integridad de la señal original después del proceso de extracción de la marca; sin embargo, uno de los principales problemas de estos esquemas es mantener

[1]Information Hiding Workshop
[2]Society of Photo-optical Instrumentation Engineers

la reversibilidad, debido a que en presencia de ataques ésta se ve comprometida.

Por lo tanto, es importante crear un esquema que sea capaz de soportar la recuperación de la imagen original y la extracción de la información oculta, independientemente de las modificaciones que sufra al momento de la transmisión. Un esquema como este tiene como principales aplicaciones el área militar y médica, debido a la sensibilidad de la información que manejan estas áreas.

1.2 Planteamiento del problema

En los años recientes, el Internet se ha convertido en el medio más rápido de transferencia de datos a cualquier parte del mundo, generando una gran demanda de contenido digital tal como: texto, imágenes, vídeo y audio. Debido a lo anterior, ha incrementado el interés para asegurar el contenido digital, dando como resultado una gran variedad de publicaciones donde se presentan diferentes técnicas, siendo las marcas de agua digitales una de las más utilizadas.

Los esquemas de marcado de agua convencional insertan la información en la señal portadora de tal manera que la distorsión (debido a la inserción de la marca de agua) sea casi imperceptible. Estos esquemas producen modificaciones irreversibles a la señal portadora al momento de la extracción de la marca, es decir, no se recupera la imagen original, sino una aproximación de ésta.

Existen escenarios de aplicación donde se hace uso de imágenes sensibles (e.g., exploración espacial, investigación militar y diagnóstico médico), en estas aplicaciones no son toleradas las modificaciones irreversibles que ocurren en el proceso de extracción de la marca de agua. Por tal motivo, se crearon los esquemas de marcado de agua reversible, con el objetivo de disminuir las limitaciones de los esquemas convencionales. Estos esquemas son utilizados para la autenticación de contenido digital y la recuperación sin distorsión de los datos originales después de la extracción, es

decir, tienen la capacidad de recuperar la señal original.

Para ilustrar mejor la necesidad de los esquemas reversibles, a continuación se brinda un ejemplo de aplicación en el área médica. Los registros electrónicos personales de los pacientes (*EPR*), son documentos médicos y legales muy importantes. A menudo los *EPR* se insertan en forma de marca de agua en los archivos médicos multimedia de los pacientes (e.g., radiografías, urogramas, mamografías, etc.), si se opta usar esquemas de marcado de agua convencional, genera una distorsión en la señal portadora al momento del proceso de extracción. Asumiendo que los *EPR* se actualizan cada determinado tiempo, es necesario realizar la extracción e inserción de los *EPR* con el fin de actualizarlos, lo cual ocasiona que la distorsión de la señal portadora se acumule, y que se haga más difícil hacer un diagnóstico médico correcto. Esta situación se puede evitar mediante el uso de un esquema reversible [1].

Una de las principales desventajas de los RWS es que utilizan algoritmos frágiles para la inserción de la marca (es decir, que carecen de la propiedad de robustez) permitiendo recuperar la imagen original solamente si la imagen marcada no sufrió ningún ataque durante la transmisión. Debido a lo anterior han surgido investigaciones con el objetivo de proporcionar robustez a los esquemas reversibles. En la literatura existen trabajos reportados que buscan garantizar la robustez en la señal o en la marca de agua frente a diversos ataques; sin embargo, solo existe un primer intento para garantizar la robustez en ambas, éste fue propuesto por Menéndez-Ortiz *et al.* obteniendo una robustez de 3.2 % al ataque de reemplazo de contenido [12].

El presente proyecto de tesis pretende mejorar, en términos de transparencia perceptual y robustez, el esquema de marcado de agua reversible en imágenes propuesto por Menéndez-Ortiz *et al.*, garantizando la extracción de la marca de agua oculta y reconstrucción de la imagen original independientemente de la modificación que sufra por el canal de transmisión. El esquema propuesto

debe asegurar que la recuperación de la marca de agua y la reconstrucción de la imagen sean resistentes a los ataques de reemplazo de contenido.

1.2.1 Hipótesis

Mediante la combinación de un algoritmo reversible frágil con un algoritmo auto-recuperable, es posible diseñar un esquema de marcado de agua reversible que sea resistente a ataques de reemplazo de contenido con un mayor grado de robustez que los esquemas reversibles existentes en la literatura.

1.3 Objetivos generales y específicos del proyecto

General

Incrementar el grado de robustez, frente a ataques de reemplazo de contenido, de un esquema de marcado de agua reversible aplicado a imágenes digitales mediante la combinación de un conjunto de algoritmos frágil con un conjunto de algoritmos auto-recuperable.

Particulares

- Seleccionar el conjunto de algoritmos reversibles que cumplan con bajo impacto visual y el conjunto de algoritmos auto-recuperables que cumplan con robustez al reemplazo de contenido.
- Implementar un esquema que permita combinar el conjunto de algoritmos reversibles con el conjunto de algoritmos auto-recuperables.
- Seleccionar la combinación que brinde mayor robustez al esquema de marcado de agua reversible.
- Analizar el efecto, en términos de distorsión, de la combinación de los dos métodos de inserción.

1.4 Metodología

La metodología esta dividida en cuatro fases como se muestra en la Figura 1.1, las cuáles se describen a continuación:

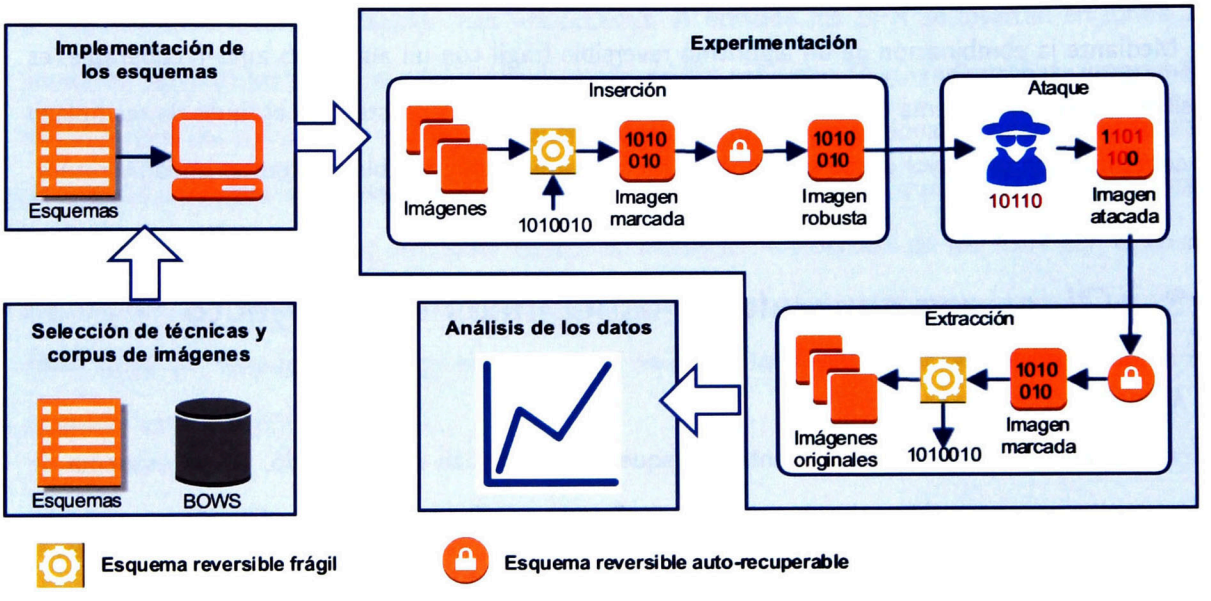


Figura 1.1: Diagrama de la metodología de desarrollo del trabajo de tesis.

1. **Selección de técnicas y corpus de imágenes**

   En esta etapa se realizó la revisión de las técnicas más representativas de los esquemas de marcado de agua reversible, utilizando como criterio de selección la distorsión reportada en la literatura, con el objetivo de seleccionar los algoritmos más adecuados de las familias: frágil y auto-recuperable. La selección de los algoritmos frágil se hizo tomando en cuenta aquellos esquemas que cumplan con una relación señal a ruido cercana a 45 dB reportados en el estado del arte. Los algoritmos auto-recuperable seleccionados serán aquellos que sean capaces de detectar y corregir ataques de reemplazo de contenido. Por último se buscó una base de imágenes estándar para las pruebas de los algoritmos de marcado de agua, validando

el correcto funcionamiento del esquema propuesto.

2. **Implementación de los esquemas**

   En esta fase se realizó la implementación de cada uno de los esquemas seleccionados de las familias frágil y auto-recuperable, mediante el uso de la herramienta Matlab. Posteriormente, se realizó un esquema para la implementación del esquema de marcado de agua reversible, este esquema contará con dos bloques. Como primer bloque se usó un algoritmo frágil para la inserción de la marca de agua en la señal portadora, la salida de este bloque es la imagen marcada. El segundo bloque se encargó de asignar robustez a ataques de reemplazo de contenido, para realizar esto se utilizó un algoritmo de auto-recuperable.

3. **Experimentación**

   La fase de experimentación esta dividida en tres etapas:

   a) Inserción:

   Se realizó utilizando el corpus de imágenes seleccionado en la primera fase. Con el objetivo de apreciar visualmente si la marca extraída es la misma que la original, a las imágenes se les insertó una imagen binaria arbitraria como marca de agua. La distorsión causada en el proceso de inserción se medió utilizando las métricas *PSNR* y *Watson*.

   b) Ataque:

   Para probar la robustez del esquema, las imágenes marcadas se sometieron a un ataque de reemplazo de contenido, donde algunos píxeles de la imagen fueron cambiados por regiones de píxeles de otra imagen. Las distorsiones causadas por este ataque se medirán en términos de *PSNR* y *Watson*.

   c) Extracción:

   Como última etapa se reconstruyen las imágenes, recuperando las imágenes marcadas de la primera etapa, luego se procedió a extraer la marca y recuperar la señal original.

Asimismo se midió la diferencia que existe entra la imagen restaurada y la original en términos de *PSNR* y *Watson*. La diferencia entre la marca original y la extraída se midió utilizando Bit Error Rate (*BER*).

4. **Análisis de resultados**

   Se realizó un análisis de cada una de las combinaciones de los algoritmos de ambas familias, teniendo como objetivo encontrar un esquema reversible con alta fidelidad perceptual y con baja probabilidad de error bajo ataques de reemplazo de contenido.

1.5 Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en 6 capítulos. El primer capítulo está destinado a proporcionar el contexto de este trabajo de tesis. El capítulo 2 está dedicado a la revisión de los esquemas más representativos de marcado de agua existentes en la literatura. El capítulo 3 presenta los conceptos generales, las principales aplicaciones y ataques de los esquemas de marcado de agua digital aplicados a imágenes. El capítulo 4 describe el esquema propuesto de marcado de agua reversible robusto a reemplazo de contenido y se describen los algoritmos utilizados. El capítulo 5 se exponen y se discuten los resultados de la experimentación realizada. Por último, el capítulo 6 concluye este trabajo de tesis y se presenta el trabajo futuro.

2

Marco teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta una descripción de los conceptos, métodos y técnicas más relevantes de los esquemas de marcado de agua digital, comenzando con la descripción de los esquema de marcado de agua digital, así como sus principales aplicaciones, ataques y métricas utilizadas en estos esquemas. Como segundo punto se abordan las principales técnicas de los esquemas de marcado de agua reversible, por último se describen las funciones Hash.

2.2 Esquemas de marcado de agua digital

Formalmente un esquema de marcado de agua puede ser descrito por una tupla (X, W, K, E_k, D_k, C_r), donde Y es la señal portadora, W es la marca de agua que será insertada, K es la llave que puede ser pública o privada usada en el proceso de inserción, E_k es la función de inserción, D_k es la función de extracción, C_r es la función comparador entre la marca original y la

recuperada. Las Ecuaciones 2.1a y 2.1b describen el proceso de inserción y detección de la marca [1].

$$E_k : X \times W \times K \rightarrow X_w \tag{2.1a}$$

$$D_k : X_w \times K \rightarrow W \tag{2.1b}$$

El proceso de inserción recibe como entrada un mensaje secreto W y una señal portadora X, se inserta W en X, obteniendo una señal marcada X_w, cuando X_w se transmite por un canal, si sufre alguna modificación ya sea intencional o no, se obtiene una señal alterada X_w^*.

El proceso de extracción recibe como entrada la señal X_w^*, se realiza el proceso de extracción de la marca, recuperando el mensaje W, la señal recuperada X' es una aproximación a la señal original X. En la Figura 2.1 se muestran los elementos de un esquema de marcado de agua convencional.

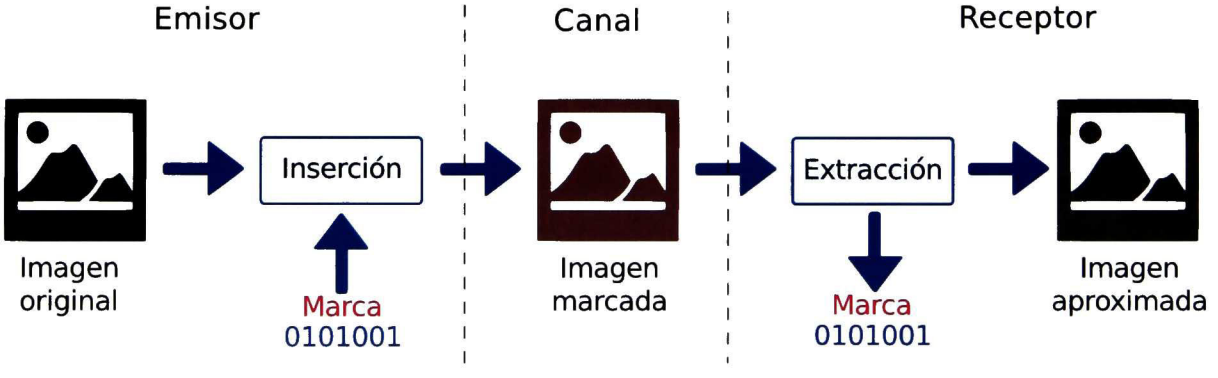


Figura 2.1: Elementos en un esquema marcado de agua digital convencional.

Estos esquemas cuentan con tres características fundamentales que son los parámetros para evaluar el desempeño de cualquier esquema de marcado de agua digital.

- **Imperceptibilidad:** La inserción de una marca de agua en una imagen portadora puede ser visible o invisible. La marca de agua visible es perceptible y se presenta como ruido, en su gran mayoría se puede eliminar utilizando filtros pasa baja. Con el fin de disminuir los riesgos, la mayoría de los esquemas propuestos son invisibles. La inserción de la marca de agua no debe degradar la imagen original, es decir, no debe ser percibida por el ojo humano, sólo puede ser detectada por un proceso de extracción utilizando un algoritmo específico o un hardware dedicado; si el proceso de inserción afecta seriamente la calidad de la imagen, esto llamará la atención de los atacantes o incluso perder su valor.

- **Robustez:** Se refiere a la capacidad de la marca de agua a sobrevivir una variedad de ataques, no intencionales e intencionales, un esquema de marcado de agua robusto debe garantizar la recuperación de la marca; este es uno de los requisitos mas importantes en los esquemas de marcado de agua digital.

- **Capacidad o carga útil (Payload):** Se define como la capacidad máxima que tiene el esquema de marcado de agua para insertar información en la señal portadora.

2.2.1 Clasificación

Los esquemas de marcado de agua digital pueden ser clasificados en diferentes tipos, esta clasificación se basa en los siguientes criterios:

- **Perceptibilidad**

  - **Visible:** La marca de agua es visible, bien puede ser un texto o logotipo usado para identificar al propietario.

  - **Invisible:** La marca de agua es insertada en la imagen de tal modo que no puede ser percibida por el ojo humano. Este tipo de de marca es usada principalmente para proteger la autenticidad de la imagen.

- Dominio:

  - **Espacial:** Se centra en la modificación de los píxeles de uno o dos conjuntos seleccionados aleatoriamente de una imagen de entrada. Los datos se insertan directamente en los píxeles de la imagen, algunos algoritmos son: bit menos significativo (LSB) [13], *patchwork* [14] y modulación del espectro extendido (SSM) [15].

  - **Frecuencia:** La imagen es segmentada en múltiples bandas de frecuencia, la inserción de la marca se realiza en los coeficientes de las frecuencias que son imperceptibles para el sistema visual humano. Las técnicas más comunes son: transformada de coseno discreta (DCT) [16], transformada Wavelet discreta (DWT) [17], modulación del espectro extendido (SSM) [15] y transformada de Fourier discreta (DFT) [16].

2.2.2 Aplicación de un esquema de marcado de agua digital

En los últimos años, las grandes empresas han impulsado el crecimiento de los contenidos digitales, debido a esto, las marcas de agua digitales han sido usadas en un gran número de aplicaciones; sin embargo, no existe un esquema de marcado de agua universal, estos esquemas se tienen que adaptar según el contexto donde se vayan a usar. Entre los escenarios de aplicación destacan:

Anotaciones (Annotations). La marca de agua oculta información adicional referente al contenido digital, suele utilizarse para facilitar la recuperación de los datos desde una base de datos, esta información se incrusta en forma de meta-datos [8, 18].

Acceso y copias de control (Access and copy control). En esta aplicación la marca de agua incrustada representa la copia de control o las políticas de control de acceso. El objetivo es prevenir que usuarios realicen copias ilegales de contenido con derechos de autor o limitar el número de copias que puede realizar. Cada vez que se desea realizar un copia del contenido digital marcado, se requiere de un hardware especial para ser copiado; el hardware modifica la

marca de agua hasta que llegue al límite de copias, de esta manera la marca de agua cumple la función de un contador [1, 19].

Verificación de autenticidad (Authentication). En ocasiones existe la necesidad de poder verificar la propiedad de los contenidos, para solventar esto, se inserta una marca de agua con el objetivo de identificar si el contenido ha sido modificado o no. Si el contenido digital llega a ser modificado, la marca de agua se altera y no se puede recuperar, por lo que el contenido es considerado no auténtico [20].

Protección de contenido (Copyright protection). Es la aplicación más destacada de las marcas de agua. Debido a la gran cantidad de contenido digital que circula por el Internet, la protección de los derechos de autor se vuelve de gran importancia. La marca de agua contiene información sobre el propietario de los datos y se utiliza para poder identificar y proteger la propiedad de derechos de autor [8, 18, 19].

Detección de copias y distribución no autorizada (Fingerprinting). Es la asignación de una marca de agua única a cualquier contenido digital. Este tipo de marca identifica a la persona que adquiere dicho contenido, permite rastrear a los usuarios que incumplan con los acuerdos de licencias y distribución de material con derechos de autor [8, 18].

Protección de contenido visible (Content protection). El contenido es marcado con una marca de agua visible que es muy difícil de eliminar, de modo que puede ser distribuido al público libremente. Es usado cuando el propietario del contenido quiere dar una vista previa a sus clientes [8].

Aplicación médica (Medical application). Las marcas de agua pueden ser visibles o invisibles. Este tipo de macas se incrustan en la información relevante de los pacientes en sus respectivos reportes, esto ayuda comprobar que los informes médicos de cada paciente no fueron alterados [1, 8, 18].

2.2.3 Ataques a un esquema de marcado de agua digital

Debido a la gran aceptación que han tenido los esquemas de marcado de agua digital, han surgido muchas técnicas de ataque con el objetivo de evitar que la marca de agua cumpla con los fines previstos para su aplicación. Cox *et al.* [1] definen como ataque a una operación que tiene como objetivo eliminar, distorsionar o extraer datos ocultos de manera no autorizada. A continuación se hace una breve descripción sobre los principales ataques a los esquemas de marcado de agua digital en imágenes, clasificándolos en intencionales y no intencionales.

- **Intencionales:**

  En este tipo de ataques se tiene conocimiento o sospecha que existe una marca de agua en la imagen portadora, el objetivo es eliminar la protección de la marca utilizando manipulaciones sobre la imagen. A continuación se describen los principales ataques intencionales encontrados en la literatura, para esquemas basados en imágenes.

  Ataques de colusión. Consiste en remover la marca de agua, usando diferentes copias del mismo contenido, cada una con diferente marca de agua, logrando así la construcción de una nueva copia sin la marca de agua [21, 22].

  Reemplazo de contenido. Consiste en sustituir parte de la imagen con texto o parte de otra imagen, provocando la pérdida de la marca de agua [23].

  Eliminación. El ataque de eliminación intenta remover la marca de agua del objeto marcado. Muchos de estos ataques explotan el hecho de que la marca de agua es, por lo regular, una señal de ruido aditivo presente en la señal original [24].

  Múltiple marca de agua. Se añade una segunda marca de agua sobre la imagen, creando un problema de validación de la información de la propiedad [25].

- **No-intencionales:**

  Este tipo de ataques son casi inevitables y no tienen como objetivo destruir la marca. A

continuación se detallan los ataques no-intencionales encontrados en la literatura.

Ataques geométricos. Son aquellos ataques que pueden afectar la geometría de la imagen como es la rotación, traslación, escalamiento, etc. [23].

Compresión de imagen. Con la finalidad de reducir costos en almacenamiento y ancho de banda, las imágenes suelen comprimirse principalmente en formato JPEG y JPEG2000. Cuando se hace uso de métodos de compresión con pérdidas se producen cambios irreversibles en las imágenes, provocando que la recuperación de la marca de agua sea casi imposible [23, 24].

Mejora de la imagen. Este tipo de ataque incluyen operaciones de convolución que desincronizan la información de la marca de agua en la imagen. Un ejemplo de estos ataques son: mejora de contraste, filtrado de mediana, ecualización del histograma y suavizado [23, 24].

2.2.4 Métricas

En la evaluación de un sistema de procesamiento de señales existen dos tipos de perceptibilidad que pueden ser medidas: fidelidad y calidad. La fidelidad es una medida de similitud entre la señal original y la señal procesada, una alta fidelidad es una representación muy similar a la señal original, por el contrario, una baja fidelidad quiere decir que es muy diferente a la señal original. La calidad es una medida de apariencia, una alta calidad significa que tan bien se ve o escucha una señal, es decir que no tiene distorsiones de procesamiento evidente. En este trabajo de tesis se utilizarán las medidas de fidelidad debido a que se quiere ver que tan similar es la imagen marcada a la imagen portadora.

Las métricas de evaluación de fidelidad de imagen son utilizadas para determinar la cantidad de distorsión generada por la inserción de una marca de agua en una imagen. Estas métricas se

clasifican en dos tipos. Referencia completa (*full-reference*) si la imagen marcada debe compararse con la imagen original y sin referencia (*non-refenrenced*) si evalúa la distorsión de la imagen marcada sin ninguna imagen de referencia. Existen varias métricas que pueden ser utilizadas para una medición objetiva, una de las métricas mas utilizadas en los esquemas de marcado de agua es la relación señal a ruido (PSNR), sin embargo la métrica Watson proporciona una mejor fidelidad debido a que se basa en el sistema visual humana para estimar dicha distorsión.

2.2.4.1. Relación señal a ruido de pico (PSNR)

La PSNR, es una medida de similitud entre dos imágenes, define la relación entre el máximo de energía de la señal y el ruido que le afecta, esta diferencia esta expresada en decibeles. Dada una imagen portadora de 8 bits en escala de grises Y y una imagen marcada Y' la PSNR está definida por la Ecuación 2.2a.

$$PSNR = 10 * \log 10 \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \tag{2.2a}$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (Y_{ij} - Y'_{ij})^2 \tag{2.2b}$$

El error medio cuadrático (MSE), es la diferencia entre la imagen portadora y la imagen marcada que se considera como el error de pérdida de calidad en la imagen está definida por la Ecuación 2.2b. Cuando el valor de MSE tiende a cero, el valor de la PSNR tiende al infinito, esto es que un mayor valor de PSNR indica una mayor calidad de imagen.

2.2.4.2. Watson

La transformada discreta del coseno (DCT) es una variación de la transformada discreta de Fourier que particiona el espectro de frecuencia en sub-bandas uniformes [26]. La métrica de Watson

está basada en la DCT de bloques locales, esta métrica empieza dividiendo la imagen en bloques distintos y un umbral de visibilidad se calcula para cada coeficiente en cada bloque, tres factores determinan el umbral de visibilidad:

1. Sensibilidad al contraste, está asociada con el componente de la DCT que se determina empíricamente.

2. Enmascaramiento de luminancia, afecta sólo al coeficiente DC en la DCT, específicamente el coeficiente DC se normaliza por la luminancia media de la pantalla antes de ser elevado a una potencia de 0.649.

3. Enmascaramiento contraste/textura, el ajuste del enmascaramiento es determinado por todos los coeficientes dentro del mismo bloque.

El siguiente paso normaliza los errores entre la imagen de referencia y la imagen distorsionada utilizando un umbral de visibilidad. Por último, el error se agrupa espacialmente a través de las frecuencias utilizando la formulación Minkowski [27].

2.2.4.3. Tasa de error binario (BER)

La tase de error binario se define como el número de bits recibidos de forma incorrecta respecto al total de bits enviados durante un intervalo de tiempo. El error se obtiene a partir de la sumatoria del valor absoluto de la diferencia entre los bits del mensaje extraído $Msg(x')$ y los bits del mensaje original $Msg(x)$, entre el total de bits insertados en la imagen BT

$$BER = \frac{\sum \mid Msg(x) - Msg(x') \mid}{BT}$$

2.3 Esquema reversible de marcado de agua digital (RWS)

Al igual que los esquemas convencionales, en los esquemas reversibles se inserta un mensaje secreto M en una señal portadora X, obteniendo como resultado la señal marcada Y y ésta es trasmitida por un canal de comunicación. El proceso de extracción requiere Y y los datos de control para poder reconstruir la imagen original X y extraer el mensaje M. En la Figura. 2.2 se muestran los elementos que componen este tipo de esquemas. [28]

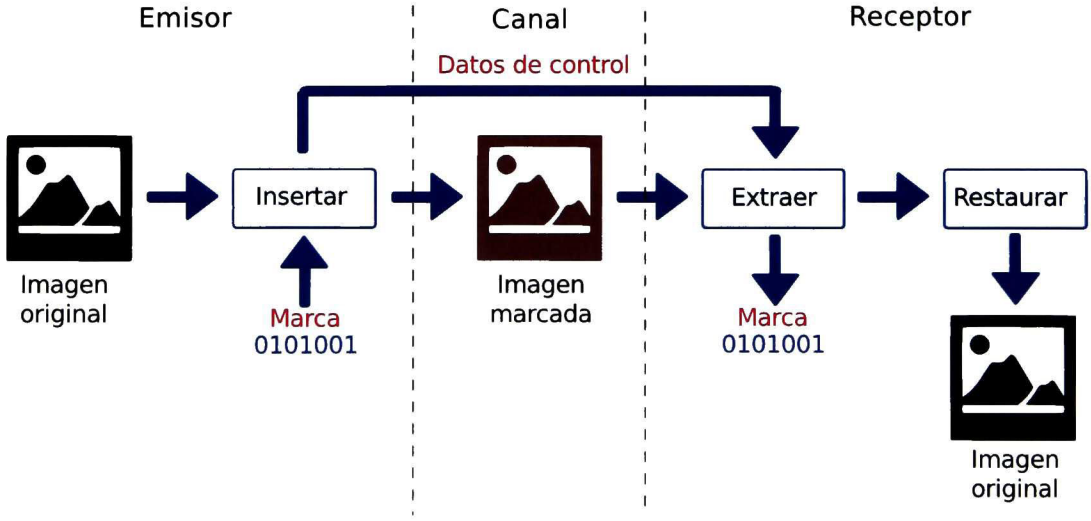


Figura 2.2: Elementos en un RWS.

La mayoría de los RWS fueron hechos para imágenes digitales. En 2006, Feng *et al.* [29] clasificaron los algoritmos reversible en tres clases dependiendo de la operación que realizan: compresión de datos, expansión de diferencia y desplazamiento del histograma.

2.3.1 Compresión de datos

Esta clase de algoritmos de marcado de agua reversible comprimen algunos de los planos de bit de la matriz de la imagen portadora, para generar espacio para la inserción de los datos de la marca de agua. Los planos de bit alterados son los menos significativos, de manera que la distorsión provocada por el proceso de inserción de la marca en la imagen portadora sea insignificante [30, 31].

2.3.2 Expansión de diferencia

Estos esquemas utilizan la expansión de diferencia para insertar información, usualmente generan un valor que representan las características de la imagen original, se expanden los valores generados para incrustar los bits de la marca de agua, la marca de agua usualmente es insertada en el LSB de los píxeles expandidos [29] Fue propuesto por Tian [32], quien aprovechó la correlación de los píxeles vecinos para imágenes en escala de grises, dicha correlación está basada en la *Integer Haar Transform* y está definida por la Ecuación 2.3.

$$l = \left\lfloor \frac{(x+y)}{2} \right\rfloor \tag{2.3}$$

donde x y y son dos píxeles adyacentes. La transformada inversa puede ser calculada mediante las Ecuaciones 2.4a y 2.4b.

$$x' = l + \left\lfloor \frac{(h+1)}{2} \right\rfloor \tag{2.4a}$$

$$y' = l - \left\lfloor \frac{(h)}{2} \right\rfloor \tag{2.4b}$$

dónde

$$h = x - y$$

Una de las principales extensiones de este esquema es la predicción de la expansión del error propuesto por Thodi y Rodriguez [33]. Este esquema modela la correlación utilizando un predictor que calcula la intensidad del píxel actual.

2.3.3 Desplazamiento del histograma

Esta técnica utiliza la distribución de frecuencia de los valores de los píxeles en escala de grises de una imagen para ocultar la marca de agua. Fue propuesta por Ni *et al.* [34] Primero encuentra un punto cero y un punto máximo. Punto cero (o el número mínimo de píxeles) corresponde con el valor de escala de grises que no contenga ningún píxel de la imagen. Punto máximo corresponde al valor de escala de grises con el máximo número de píxeles de la imagen portadora. El objetivo de encontrar los puntos máximos es aumentar la capacidad de carga útil lo más alta posible.

En el segundo paso se lee la imagen en orden secuencial incrementado en uno el valor de escala de grises de los píxeles entre el punto máximo y el punto cero, es decir, desplazar en el histograma los valores de escala de grises que se encuentran entre el punto máximo y el punto cero, hasta dejar el valor adyacente al punto máximo vacío.

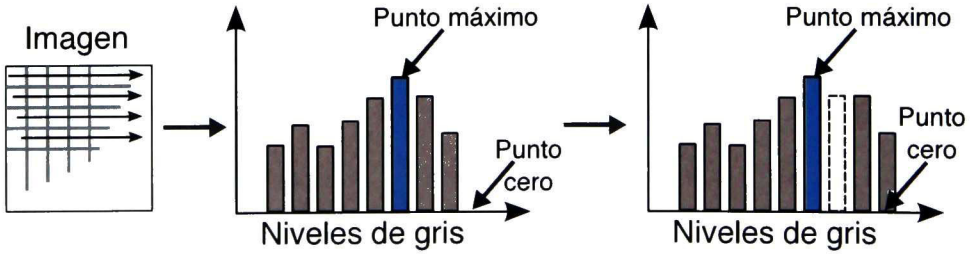


Figura 2.3: Desplazamiento del histograma entre el punto máximo y punto cero.

Por último se lee una vez más la imagen en busca de un píxel máximo, si el bit a insertar es 1, el valor del píxel se incrementa en 1, de lo contrario se mantiene intacto. La capacidad de carga útil

de este algoritmo es igual al número de píxeles que existen en el punto pico, como se puede observar en la Figura 2.4 .

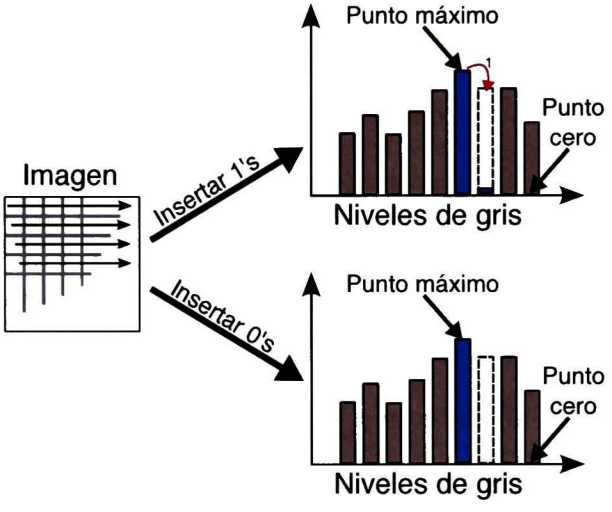


Figura 2.4: Inserción del algoritmo de Ni *et al.*.

2.4 Funciones Hash

Una función hash es una función matemática que recibe como entrada un mensaje de longitud variable m y genera una cadena h de longitud fija. La cadena h generada se considera como una huella digital del mensaje m. Las funciones hash no son reversibles, esto significa que son fáciles de calcular, también son resistentes a colisiones, es decir, es casi imposible tener dos mensajes m y $\hat{m}$ de tal manera que $H(m) = H(\hat{m})$ [35]. Los principales algoritmos de funciones hash son:

- **Message Digest 5 (MD5):** Esta basado en la función hash MD4 propuesta por Rivest *et al.* [36]. produce una función hash de 128 bits como salida, compuesta por un conjunto de cuatro bloques de 32 bits.

- **Secure Hash Algorithm (SHA):** Es una familia de funciones hash propuestas por la Agencia

Nacional de Seguridad (NSA) y publicadas por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST) [37]. Las funciones SHA se basan en los principios propuestos por Rivest *et al.* [36] y tienen cuatro versiones que son: SHA-0, SHA-1, SHA-2, y SHA-3.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se describen las técnicas más relevantes de marcado de agua utilizadas en este trabajo de tesis, las cuales muestran un panorama general de la tecnología de marcas de agua digitales. En la primera sección se detalla las características del esquema de marcado de agua convencional, así como también sus principales aplicaciones, ataques y métricas utilizadas. En la segunda sección se presentan las principales técnicas utilizadas en el esquema reversible de marcado de agua digital. Por último se realiza una descripción de las funciones Hash, debido a que son una parte fundamental en el esquema reversible auto-recupeable, estas funciones son las que proporcionan la robustez a estos esquemas.

3

Estado del arte

3.1 Introducción

En esta capítulo se presenta una revisión de la literatura de los métodos más representativos que existen de los esquemas de marcado de agua digital reversible aplicadas en imágenes, seguido de una revisión de los esquemas robustos y por último se analizan los avances que se han realizado en el área de los esquemas reversible robusto.

3.2 Esquema de marcado de agua reversible (RWS)

El primer trabajo en la literatura de RWS fue presentado por Tian [32], donde propone un método de marcado de agua reversible para imágenes digitales en escala de grises, con alta capacidad de carga útil y alta fidelidad perceptual. Las técnicas más comunes en los esquemas de marcado de agua reversible son expansión del error y desplazamiento del histograma. A continuación se presentan los trabajos más relevantes reportados en la literatura sobre esquemas de marcado de agua reversible

aplicados en imágenes, las cuales fueron clasificadas en dos tipos, por capacidad de inserción e impacto perceptual.

3.2.1 Capacidad de inserción

El trabajo de Wu *et al.* [38] incrusta 1.16 *bits per pixel* (bpp) usando una técnica combinada de desplazamiento del histograma y predicción del error, la inserción de datos se realiza mediante la modificación de su histograma, mientras que el desbordamiento y sub-desbordamiento de los valores de los píxeles se previene en el pre-proceso. Chang y Kieu [39] proponen una estrategia de ocultación complementaria en dos etapas, en la primera etapa realiza una inserción horizontal y en la segunda etapa una vertical. Esta técnica logra insertar 1.21 bpp con una baja distorsión, logrando obtener un valor de PSNR de 52.31 dB, esta capacidad se puede mejorar utilizando un mayor número de capas. Efimushkina y Egiazarian [40] también insertan 1.21 bpp aunque con una distorsión superior a [39]; utiliza la expansión de la predicción del error para poder insertar la marca de agua, permite incrustar más de un bit por píxel mediante el uso de campos de Galois y no requiere un mapa de ubicación para revertir las modificaciones causadas por la marca de agua.

Coltuc y Chassery [41] logran insertar 1.42 bpp, la capacidad de inserción depende del par de píxeles que se pueden transformar y su vez esto depende de las características estadísticas de la imagen, este esquema no necesita transmitir un mapa de ubicación, debido a que es de bajo costo computacional y permite ser construido por el proceso de detección. Wang *et al.* [42] proponen un método basado en tratar a la imagen como un entero y se divide en bloques que no se solapan, utiliza un mapa de localización el cual se comprime sin pérdidas y se inserta junto con la marca de agua. Este esquema cuenta con un mecanismo para controlar la distorsión de las imágenes, la desventaja es que requiere una búsqueda exhaustiva para encontrar los parámetros de inserción idóneos, tiene una capacidad de carga útil de 1.51 bpp.

Sachnev *et al.* [43] también proponen una técnica capaz de insertar 1.51 bpp, está basada en el desplazamiento del histograma, utiliza una inserción de dos etapas con un bajo impacto perceptual, para ello se calcula el limite inferior y superior por pares de píxeles vecinos, en la primera etapa la diferencia entre un píxel y su límite inferior se utiliza para ocultar un bit, en la segunda etapa se suprime la distorsión ocultando otro bit de datos mediante la diferencia entre el límite superior y el píxel modificado. Abokhdair y Manaf [44] logran una inserción de 1.54 bp, este esquema está basado en predicciones adaptativas, con el objetivo de aumentar la capacidad de carga de las imágenes de resonancia magnética (MRI), dividiendo las imágenes en regiones de interés (ROI) y las regiones de no-interés (RONI). Su aumento de capacidad radica en que no requiere de un mapa de ubicación.

El esquema diseñado por Coltuc y Tudoroiu [45] logra 2.39 bpp de capacidad de inserción, este esquema se basa en la expansión de la predicción del error para llevar acabo lo inserción de la marca de agua, para resolver los problemas de desbordamiento y sub-desbordamiento se utiliza un mapa de ubicación, expande n veces la diferencia para poder insertar hasta $\log_2 n$ bpp. Chakraborty *et al.* [46] proponen un esquema con una capacidad de 2.5 bpp, utiliza una técnica combinada de interpolación y algunas funciones geométricas, este método inserta los bits secretos en los planos grises de la imagen a color, para lograr esto divide la imagen en bloques de 2×2 píxeles, se interpolan resultando bloques de 3×3 píxeles, por último se ajustan los valores con las funciones geométricas. El esquema de Wang *et al.* [47] hasta la fecha, es el que cuenta con mayor capacidad de carga útil, reportando 6.56 bpp y un valor perceptual de 54.3 dB; este esquema imita el desplazamiento del histograma, en lugar de utilizar el punto máximo de un histograma, el esquema manipula los picos de los segmentos basados en la intensidad de la imagen; este método utiliza un mapa de ubicación para garantizar la extracción correcta de los datos insertados.

3.2.2 Impacto perceptual

Una desventaja del proceso de inserción es la degradación que sufre la señal original, sin importar si el proceso de inserción se trata de un esquema de marcado de agua convencional o uno reversible. Por este motivo se diseñan métodos no solo con alta carga útil, sino también con el objetivo de minimizar el impacto perceptual. Los valores de PSNR de los esquemas de marcado de agua reversible van desde 47 a 72 dB.

Tsai *et al.* [48] proponen un esquema capaz de alcanzar 47 dB, este esquema se basa en el desplazamiento del histograma, donde el histograma se construye a partir de la diferencia entre cada píxel y sus vecinos, aunque su capacidad de inserción es pequeña, se puede mejorar mediante la aplicación del esquema múltiples veces. Fujiyoshi [49] presenta un esquema basado en desplazamiento del histograma, logrando un valor de PSNR de 48.3 dB, modifica los valores de los píxeles en la imagen basándose en la distribución tonal, este método esta libre de memorización de información lateral mediante la introducción de dos mecanismos, uno es la estimación de la información lateral basado en estadística simple y el otro esconde una parte de la información lateral como datos de la imagen. El esquema de Khan *et al.* [30] reportan un impacto perceptual de 48.5 dB, esta técnica se basa en desplazamiento de histograma, explotando el concepto de sub-muestreo para aumentar la capacidad de carga útil, el mapa de ubicación construido durante la inserción se utiliza para detectar alguna manipulación de la imagen.

Luo *et al.* [50] presentan un enfoque que alcanza 48.7 dB, este se basa en la interpolación de la expansión del error, se considera un enfoque de inserción multi-nivel, sin embargo, no se indica el número de niveles necesarios para obtener los resultados reportados. Caciula y Coltuc [51] también obtienen una PSNR de 48.7 dB, usando una combinación de predicción de la expansión del error y desplazamiento del histograma, para la inserción de los datos se utiliza la predicción de la expansión

del error y el desplazamiento del histograma se utiliza para indicar qué píxeles no contienen bits de la marca de agua; este trabajo propone dos umbrales, uno para controlar la distorsión en la imagen y otro para la capacidad de inserción.

Wang *et al.* [52] proponen otro esquema con una distorsión de 48.7 dB, este esquema utiliza el desplazamiento del histograma dividiendo la imagen en dos conjuntos de píxeles para calcular los errores de interpolación y a partir de estos construir el histograma; la inserción de los datos se realiza desplazando los intervalos del histograma. Otro trabajo que alcanza los 48.9 dB fue propuesto por Naheed *et al.* [53], este método utiliza la interpolación de la expansión del error para insertar la marca de agua en la imagen, se utiliza la metaheurística optimización por cúmulos de partículas (PSO) para calcular los valores de interpolación. Shin *et al.* [25] proponen otro esquema que alcanza 49.1 dB, es similar al esquema anterior, la diferencia radica en el cálculo de los valores de interpolación, para este enfoque se utiliza un algoritmo genético.

Shin *et al.* [25] introducen un esquema que utiliza la técnica del desplazamiento del histograma, la construcción del histograma se realiza a partir de las diferencias entre la imagen original y una imagen de diferencia, este esquema alcanza una distorsión de 51.8 dB. Coatrieux *et al.* [54] diseñaron un esquema capaz que llega a alcanzar 56.7 dB y utiliza desplazamiento del histograma dinámico, este esquema utiliza dos tipos de modulación, el desplazamiento de los píxeles del histograma y una expansión dinámica de la predicción del error en el desplazamiento del histograma, permite insertar datos en las partes de las texturas de una imagen. Li *et al.* [55] presenta un esquema con una PSNR de 58.6 dB y utiliza expansión de la predicción del error que mejora la precisión de la predicción en un canal de color a través de la explotación de la información al borde de otro canal; sin embargo, este esquema tiene baja capacidad de carga útil.

Huang *et al.* [56] reportan una PSNR de 59 dB, este esquema utiliza desplazamiento del histograma y no requiere de información adicional para recuperar la imagen original, para resolver los problemas de desbordamiento y sub-desbordamiento, utiliza una estrategia de desplazamiento por lo que no necesita un mapa de ubicación. El trabajo reportado con la mayor PSNR es el propuesto por Zavaleta *et al.* [57] con 72.4 dB, este esquema trabaja con imágenes médicas, utiliza una técnica combinada de expansión del error y desplazamiento del histograma, para evitar el problema de desbordamiento y sub-desbordamiento se realiza un pre-procesamiento basado en desplazamiento del histograma. Aunque su capacidad de inserción es baja, se puede aumentar la carga útil aplicando varias veces este esquema y conservando un impacto perceptual aceptable.

En la Tabla 3.1 se presentan los trabajos previamente descritos de los esquemas de marcado de agua reversible en imágenes, donde se describe la técnica utilizada así como también su capacidad de carga útil y su impacto perceptual.

3.3 Esquema de marcado de agua reversible y robusto en imágenes (RRWS)

Algunos RWS pueden presentar cierto grado de robustez frente a los ataques, es decir tener la capacidad de extraer la marca de agua y reconstruir la señal original, sin importar si la imagen marcada ha sufrido alguna modificación. La investigación de la propiedad de robustez en los RWS comenzó ha explorarse apenas hace una década, enfocándose en la robustez de la señal y la robustez de la marca de agua por separado, prestando poca atención a la robustez en ambas.

Year	Ref.	Autores	Payload (bpp)	PSNR (dB)	Técnica
2014	[30]	Khan *et al.*	0.03	48.5	Desplazamiento de histograma
2014	[46]	Chakraborty *et al.*	2.50	44.1	Otra
2013	[56]	Huang *et al.*	1.00	59.0	Desplazamiento de histograma
2013	[55]	Li *et al.*	0.04	58.6	Expansión del error
2013	[54]	Coatrieux *et al.*	0.17	56.7	Desplazamiento de histograma
2013	[47]	Wang *et al.*	6.56	54.3	Desplazamiento de histograma
2013	[44]	Abokhdair y Manaf	1.54	53.2	Expansión del error
2013	[52]	Wang *et al.*	0.23	48.7	Desplazamiento de histograma
2013	[51]	Caciula y Coltuc	0.18	48.7	Expansión del error
2012	[25]	Shin *et al.*	0.14	51.8	Desplazamiento de histograma
2012	[58]	Naheed y Usman	0.38	49.1	Expansión del error
2012	[49]	Fujiyoshi	0.02	48.3	Desplazamiento de histograma
2012	[48]	Tsai *et al.*	0.24	47.0	Desplazamiento de histograma
2012	[38]	Wu *et al.*	1.16	29.1	Desplazamiento de histograma
2012	[45]	Coltuc y Tudoroiu	2.39	16.3	Expansión del error
2011	[53]	Naheed *et al.*	0.21	48.7	Expansión del error
2011	[40]	Efimushkina y Egiazarian	1.21	30.2	Expansión del error
2010	[39]	Chang y Kieu	1.21	52.3	Otro
2010	[50]	Luo *et al.*	0.20	48.7	Expansión del error
2010	[43]	Sachnev *et al.*	1.51	32.0	Desplazamiento de histograma
2010	[42]	Wang *et al.*	1.51	21.4	Otro
2009	[59]	Yan *et al.*	0.20	49.4	Desplazamiento de histograma
2008	[57]	Zavaleta *et al.*	0.35	72.4	Expansión del error
2006	[41]	Coltuc y Chassery	1.42	20.0	Otra

Tabla 3.1: Esquemas de marcado de agua reversible frágil en imágenes; resaltados en rojo se muestran la mayor capacidad de carga útil y la menor distorsión visual de los esquemas reversible frágil.

3.3.1 Robustez en la marca de agua

Este tipo de robustez permite reconstruir la señal original y la marca de agua insertada si no se produce ninguna modificación de la señal marcada; en caso de que ocurra alguna modificación, estos esquemas permiten extraer la marca de agua pero la señal recuperada es una aproximación a la señal original, debido a esto se pierde la propiedad de reversibilidad, como se puede apreciar en la Figura 3.1. Dependiendo de la robustez que presente la marca de agua, estos pueden ser clasificados como semi-frágiles y robustas. Las marcas de agua semi-frágil son resistentes sólo a ataques no intencionales, mientras que la robusta debe soportar ataques intencionales.

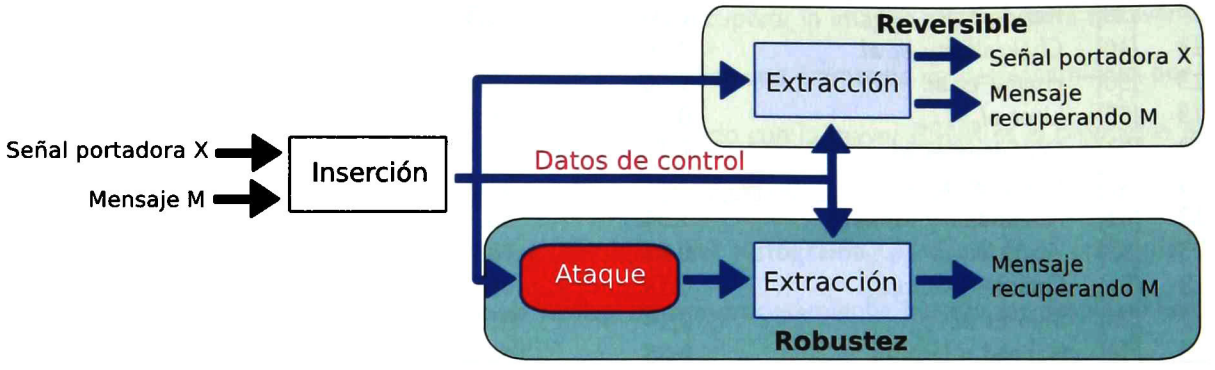


Figura 3.1: Elementos en un esquema reversible con robustez en la marca.

- **Marca de agua semi-frágil**

  Honsinger *et al.* [60] proponen un esquema capaz de detectar regiones de la imagen que fueron modificadas, con la desventaja que no son robustas al ruido sal y pimienta. De Vleeschouwer *et al.* [61] proponen una técnica que funciona con imágenes en el dominio espacial y es resistente a la compresión JPEG; sin embargo, las imágenes marcadas no son robustas al ruido sal y pimienta. Ni *et al.* [62, 63] proponen un esquema que resuelve el problema del ruido sal y pimienta de los esquemas antes mencionados; esta técnica trabaja con imágenes en el domino espacial y es resistente a la compresión JPEG y JPEG2000, aunque tiene una baja capacidad de carga útil. Zou *et al.* [64] presenta otro enfoque para resolver el problema del ruido sal y pimienta, usa imágenes en el dominio IWT, es resistente a la compresión JPEG2000 y su capacidad de inserción es baja. Wu [65] propone un esquema que trabaja en el dominio de IWT y es resistente a la compresión JPEG. Kim *et al.* [66] diseñaron un esquema que utiliza imágenes en el dominio espacial y es resistente a la compresión JPEG.

- **Marca de agua robusta**

  Chrysochos *et al.* [67] propusieron un esquema que trabaja con imágenes en el dominio de la espacial y robusta a varios ataques geométricos; sin embargo, su capacidad de inserción es

baja. Coltuc y Chassery [68] presentan una técnica que funciona en el dominio ITD (*Integer Transform Domain*) y es robusto al recorte. Coatrieux *et al.* [69] propusieron un esquema que trabaja con imágenes de resonancia magnética en el dominio espacial y es robusto frente a la compresión JPEG. Gao y Gu [70] presentaron un esquema que trabaja en el dominio IWT y es robusta al recorte y al ruido sal y pimienta. Saberian *et al.* [71] presentaron una técnica para imágenes en el dominio espacial y temporal, este esquema es robusto frente a la adición del ruido blanco. Chang *et al.* [72] presentaron un esquema que trabaja con imágenes en el domino de la DCT, éste es robusto a desenfoque, brillo, contraste y recorte. Gu *et al.* [73] proponen una técnica en el dominio wavelet que es robusta a la compresión JPEG. Yang *et al.* [74] proponen un esquema en el dominio de IWT que es robusto al brillo, compresión JPEG y JPEG2000, recorte e inversión. Tsai *et al.* [75] presentan una técnica que trabaja en el dominio de DWT que es robusta a la compresión JPEG, adición del ruido *gausiano* blanco, ruido sal y pimienta, escala y desenfoque.

3.3.2 Robustez en la señal

Estos esquemas permiten reconstruir la señal original incluso si ocurrió o no alguna modificación de la señal marcada, sin embargo, en este enfoque la capacidad de inserción se utiliza para insertar datos de control sin insertar ninguna información de otra índole; los datos de control pueden contener una versión comprimida de la señal portadora o las características más relevantes que ayuden al proceso de la reconstrucción, como se aprecia en la Figura 3.2. Estos esquemas son clasificados como los que obtienen una aproximación de la señal y los que logran una reconstrucción perfecta de la señal. Para este trabajo se busca obtener una reconstrucción perfecta de la señal, por lo cual se centrará la atención en estos esquemas.

Estos esquemas de reconstrucción perfecta son conocidos en la literatura como auto-recuperables, éstos tiene la capacidad de detectar las regiones alteradas en la señal portadora, utilizando datos

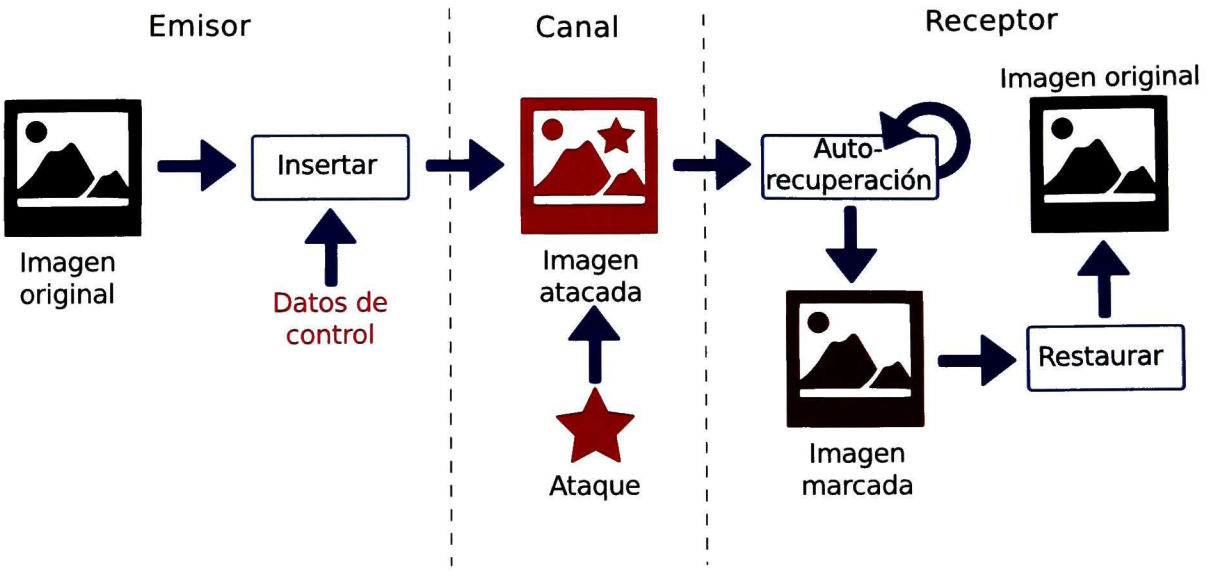


Figura 3.2: Elementos en un esquema reversible con robustez en la señal.

de control para recuperar esas regiones modificadas. El primer esfuerzo fue realizado por Zhang y Wang [76], ellos proponen una técnica de marcado de agua digital frágil capaz de reconstruir a la perfección la imagen portadora después de un ataque de reemplazo de contenido, siempre y cuando el área afectada no sea demasiado grande. El emisor inserta los datos de control (marca de agua) en la señal portadora, los datos de control están compuestos de los bits de referencia y los bits de chequeo. El receptor realiza la comparación de los bits de chequeo para identificar los bloques que fueron manipulados, utilizando los bloques de referencia para recuperar la imagen original. Bravo-Solorio *et al.* [77] proponen un esquema capaz de recuperar perfectamente los píxeles originales de una imagen modificada. Este método utiliza un mecanismo de bloque seguro resistente al recorte, soporta un 25 % de área alterada en la imagen. Es importante mencionar que los algoritmos de la Tabla 3.2 son los únicos existentes en la literatura por lo tanto no se realizo una selección y se opto por utilizar los dos algoritmos en el esquema propuesto.

Año	Ref	Autor	Recuperar imagen marcada	Recuperar imagen original	Ataques	Tipo de imagen	Calidad
2008	[76]	Zhang y Wang	sí	sí	Reemplazo contenido	Estándar	8 bit
2012	[77]	Bravo-Solorio *et al.*	sí	sí	Reemplazo contenido	Estándar	8 bit

Tabla 3.2: Esquemas de marcado de agua digital auto-recuperable

3.3.3 Robustez en la marca de agua y en la señal

Este esquema de marcado de agua tiene la capacidad de reconstruir la señal original y extraer la marca de agua, a pesar de que se haya producido una alteración en la señal marcada. Hasta hoy en día este problema ha sido abordado desde el punto de vista teórico, es decir, es posible recuperar la marca de agua y la señal portadora después de algún ataque.

Este esquema debe tener en cuenta que la marca de agua no debe ser perceptible visualmente, es decir, el remitente debe insertar una marca de agua W en una señal portadora X, donde W debe ser embebido en X de modo que X sufra una distorsión menor a un umbral α, posteriormente la señal marcada es transmitida por un canal no binario y ruidoso, donde se puede producir alguna distorsión β sobre la señal marcada, dando como resultado una señal alterada Y', finalmente el receptor debe ser capaz de extraer W y contrarrestar las distorsiones α y β, logrando reconstruir la señal portadora X. En la Figura 3.3 se presenta el esquema general robusto de marcado de agua reversible.

Este tipo de esquemas solo había sido abordado desde el punto de vista teórico, Menéndez-Ortiz *et al.* [12] presentan un primer intento proponiendo un esquema de dos etapas, la primera etapa utiliza un algoritmo reversible frágil para la inserción de la marca de agua, la segunda etapa utiliza un algoritmo de auto-recuperable con el objetivo de proporcionar un cierto grado de robustez frente a ataques de reemplazo de contenido, este esquema presenta una robustez de 3.2 % sobre la imagen marcada al reemplazo de píxeles, es importante mencionar que en la literatura no existe otro esquema

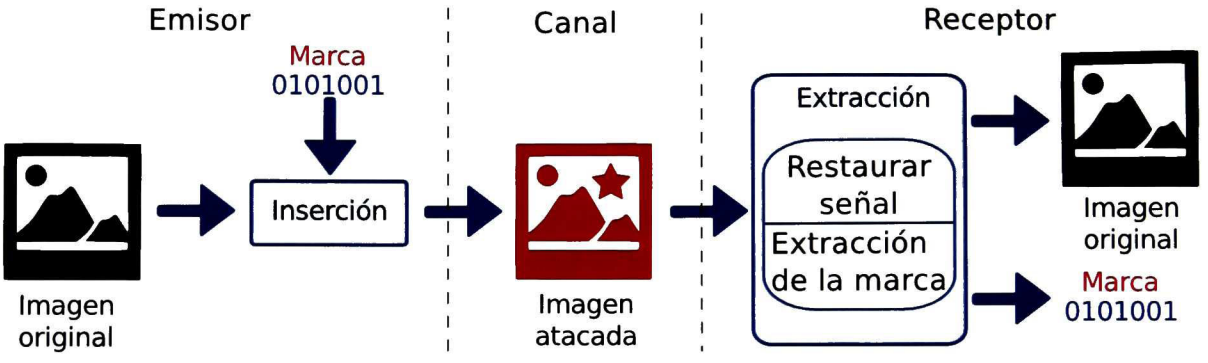


Figura 3.3: Elementos en un RRWS.

que garantice la robustez y reversibilidad en imágenes digitales.

3.4 Conclusiones

En esta sección se presentaron varios enfoques propuestos en la literatura acerca de los esquemas de marcado de agua reversible frágil y sus resultados obtenidos, también se mencionan los enfoques de robustez de esquemas de marcado de agua reversible existentes en la literatura. La robustez en los esquemas de marcado de agua reversible empezó a ser explorada hace una década, debido a esto los RRWS son muy escasos; la propiedad de la robustez ha sido abordada desde los enfoques de robustez a la marca y robustez a la señal, logrando un avance significativo en estos campos. Por otro lado, solo existe un primer intento de crear un esquema que brinde robustez en la marca y en la señal [12], todos los demás trabajos de la literatura solo habían abordado desde el punto de vista teórico. Este trabajo de tesis retomará el trabajo hecho por Menéndez-Ortiz *et al.* [12] con el objetivo de lograr un mejora en la robustez al ataque de reemplazo de contenido manteniendo una impacto perceptual bajo.

4

Metodología

4.1 Introducción

En este capítulo se detalla la metodología propuesta para obtener un esquema reversible robusto a ataques de reemplazo de contenido. En primer lugar se da una visión general de las características principales de dicho enfoque, posteriormente se describe el proceso de selección de los algoritmos, como siguiente punto se presenta la implementación de cada algoritmo, describiendo las principales características y el funcionamiento de cada uno de ellos, clasificándolos por tipo de familia: frágil y auto-recuperable. El enfoque está compuesto de dos etapas: La primera comprende el proceso de inserción, el cual consiste en insertar un flujo de datos (marca de agua), en una imagen portadora. La segunda etapa consiste en la extracción de la marca y la restauración de la imagen portadora. Además se cuenta con una etapa intermedia de ataques la cual se encarga de validar el funcionamiento del enfoque propuesto.

4.2 Esquema de marcado de agua digital reversible robusto

El presente trabajo de tesis pretende mejorar, en términos de transparencia perceptual y robustez, el esquema de marcado de agua propuesto por Menéndez-Ortiz *et al.* [12], donde la idea principal del trabajo de tesis es realizar una combinación de distintos algoritmos reversible frágil con algoritmos reversible auto-recuperable, con la finalidad de obtener un esquema reversible robusto a posibles ataques de reemplazo de contenido. El algoritmo frágil se encarga de insertar la marca de agua y los datos de control para recuperar la señal portadora. El algoritmo auto-recuperable inserta información para contrarrestar las modificaciones sufridas por ataques de reemplazo de contenido al momento de pasar por el canal de transmisión. El esquema propuesto se puede observar en a Figura 4.2.

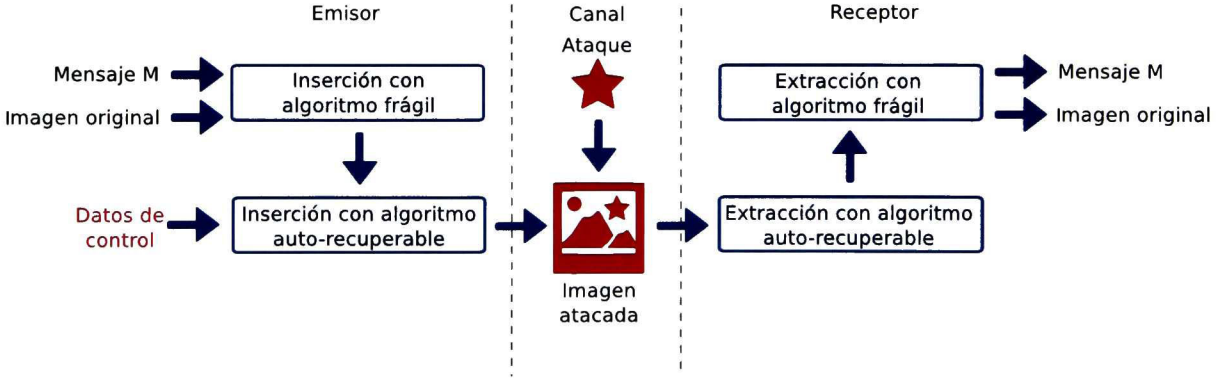


Figura 4.1: Características del esquema de marcado de agua digital reversible robusto propuesto.

4.3 Selección de técnicas y corpus de imágenes

La selección de técnicas se realizó con base en un análisis de los algoritmos revisados en el estado del arte, tomando como prioridad la distorsión generada por cada algoritmo seguido de su capacidad de carga útil que son capaz de soportar. La primera fase se discrimina todos aquellos algoritmos que no cumplen con los requisitos mínimos de un PSNR mayor a 40 dB y capacidad de carga útil mayor

a 1 bpp, en la Tabla 4.1 se presentan los algoritmos que cumplen con estos requisitos.

Year	Ref.	Autores	Payload (bpp)	PSNR (dB)	Técnica	Tipo de imagen	Calidad
2014	[46]	• Chakraborty *et al.*	2.50	44.1	Interpolación	Color	8 bit
2013	[56]	• Huang *et al.*	1.00	59.0	Desplazamiento de histograma	Médica	16 bit
2013	[47]	• Wang *et al.*	6.56	54.3	Desplazamiento de histograma	Estándar	8 bit
2013	[44]	Abokhdair y Manaf	1.54	53.2	Expansión del error	MRI	16 bit
2010	[39]	Chang y Kieu	1.21	52.3	Estrategia de ocultación complementaria	Estándar	8 bit

Tabla 4.1: Filtro de la selección de técnicas reversible frágil, donde el símbolo • indica los algoritmos seleccionados para el esquema propuesto.

Una vez realizado el primer filtro, se procedió a seleccionar los algoritmos a utilizar en el esquema propuesto. El algoritmo en [56] se seleccionó sobre otras técnicas con mayor carga útil como aquellas reportadas en [39, 44, 46, 47], debido a su alto PSNR. El algoritmo en [47] se seleccionó debido a que cuenta con una mayor capacidad de carga útil en comparación a los demás. Por último para analizar el comportamiento de la distorsión generada por la concatenación de un esquema A con un esquema B, se optó por seleccionar el algoritmo con menor PSNR, siendo este el algoritmo en [46].

En la selección del corpus de imágenes, se definió un conjunto de 2000 imágenes de manera aleatoria, en escala de grises con un tamaño de 512×512 píxeles con 8 bits de profundidad, seleccionadas del corpus de 10000 imágenes del segundo concurso de BOWS (*Break Our Watermarking System*) [78], este tipo de imágenes son consideradas estándar para las pruebas de los esquemas de marcado de agua.

4.4 Implementación de los esquemas

4.4.1 Algoritmos Reversible frágil

4.4.1.1. Algoritmo de Huang et al. [56]

El algoritmo Huang *et al.* [56] utiliza la técnica desplazamiento del histograma, aprovechando la alta correlación de los píxeles vecinos de cada bloque, hacen uso de un umbral K para la inserción de los bits de la marca de agua, dependiendo del valor de diferencia calculado de cada bloque, la estrategia de inserción se divide en dos categorías: positivos y negativos. En la Figura 4.2 se aprecia el proceso de inserción y en la Figura 4.3 el proceso de extracción en el algoritmo propuesto por Huang *et al.* [56].

Proceso de inserción

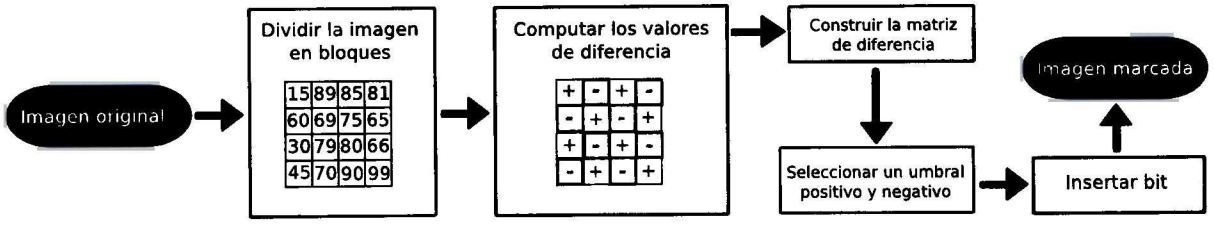


Figura 4.2: Diagrama del proceso de inserción del algoritmo de Huang *et al.* [56].

1. Dividir la imagen de entrada en bloques de 2×2, 4×4, 8×8 píxeles.

2. Calcular los valores de diferencia mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (a_i - bi) \tag{4.1}$$

donde n es el número de pares de píxeles, a_i son todos los píxeles marcados con $(+)$ y b_i son todos los píxeles marcados con $(-)$.

3. Seleccionar un umbral $K+$ mediante las Ecuaciones (4.2a, 4.2b) y un umbral $K-$ mediante las Ecuaciones (4.2c, 4.2d):

$$K_{ph} = \left\lceil \left(\frac{\alpha_{maxP} - \alpha_{zero} + 1}{Partion\,level} \right) \right\rceil \tag{4.2a}$$

$$K+ = K_{ph} + mod(K_{ph}, 2) \tag{4.2b}$$

$$K_{Nh} = \left\lceil \left(\frac{\alpha_{zero} - \alpha_{minN} + 1}{Partion\,level} \right) \right\rceil \tag{4.2c}$$

$$K- = -1 \cdot (K_{Nh} + mod(K_{Nh}, 2)) \tag{4.2d}$$

donde α_{maxP} es el máximo valor de diferencia de la parte positiva, α_{zero} es 0 para el centro de la coordenada, $Partion\,level$ es el número de partición, α_{minN} es el mínimo valor de diferencia de la parte negativa y $\lceil \cdot \rceil$ es la función techo.

4. Insertar bit con base en los valores de α

   - **Si** $\alpha \leq 0$.
     - **Caso 1:** $0 \leq \alpha \leq k$

       Si se inserta 1, el histograma de ese bloque se desplaza una distancia k hacia la derecha. Si se inserta 0, el bloque se mantiene intacto.

     - **Caso 2:** $k \leq \alpha \leq 2k$

       Si se inserta 1, el histograma de ese bloque se desplaza una distancia $2k$ hacia la derecha. Si se inserta 0, el bloque se se desplaza una distancia k hacia la derecha.

     - **Caso 3:** $2k \leq \alpha \leq 3k$

       Si se inserta 1, el histograma de ese bloque se desplaza una distancia $3k$ hacia la derecha. Si se inserta 0, el bloque se se desplaza una distancia $2k$ hacia la derecha.

   - **Si** $\alpha < 0$.
     - **Caso 1:** $-k \leq \alpha \leq 0$

Si se inserta 1, el histograma de ese bloque se desplaza una distancia k hacia la izquierda. Si se inserta 0, el bloque se mantiene intacto.

- **Caso 2:** $-2k \leq \alpha \leq -k$

  Si se inserta 1, el histograma de ese bloque se desplaza una distancia $2k$ hacia la izquierda. Si se inserta 0, el bloque se se desplaza una distancia k hacia la izquierda.

- **Caso 3:** $-3k \leq \alpha \leq -2k$

  Si se inserta 1, el histograma de ese bloque se desplaza una distancia $3k$ hacia la izquierda. Si se inserta 0, el bloque se se desplaza una distancia $2k$ hacia la izquierda.

Proceso de extracción

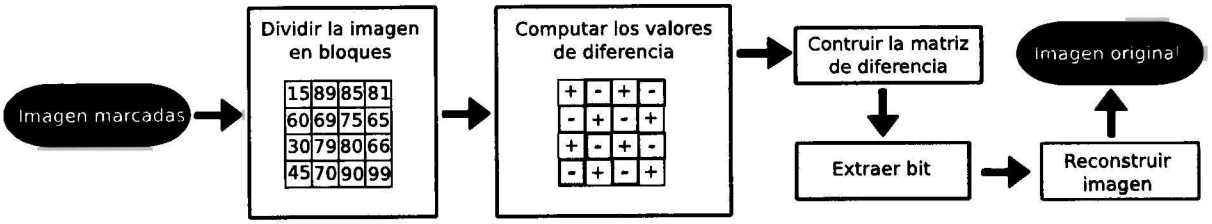


Figura 4.3: Diagrama del proceso de extracción del algoritmo de Huang *et al.* [56].

1. Dividir la imagen marcada en bloques de 2×2, 4×4 y 8×8 píxeles.

2. Calcular los valores de diferencia utilizando la Ecuación 4.1.

3. Calcular el umbral K:

$$\begin{aligned} K_{ph} &= \left\lceil \left(\frac{\alpha_{maxP} - \alpha_{zero} + 1}{Partion\,level} \right) \right\rceil \\ K &= K_{ph} + mod(K_{ph}, 2) \end{aligned}$$

donde α_{maxP} es el máximo valor de diferencia de la parte positiva, α_{zero} es 0 para el centro de la coordenada, $Partion\,level$ es el número de partición y $\lceil \cdot \rceil$ es la función techo.

4. Se extrae el bit utilizando el umbral K y se reconstruye la imagen original.

4.4.1.2. Algoritmo de Wang et al. [47]

El esquema propuesto por Wang *et al.* [47] está basado en la técnica de desplazamiento del histograma, este esquema divide el rango de intensidad en segmentos no solapados y busca el píxel pico es decir con mayor ocurrencia en el histograma de cada segmento, la inserción de bits únicamente se hace en los píxeles picos, excepto por el primer píxel pico de cada segmento, éste sirve como píxel de referencia al momento de la extracción. Este esquema hace uso de un mapa de localización en el cual se marcan todos los píxeles picos. En la Figura 4.4 se muestra un diagrama del proceso de inserción y en la Figura 4.6 se aprecia el proceso de extracción.

Proceso de inserción

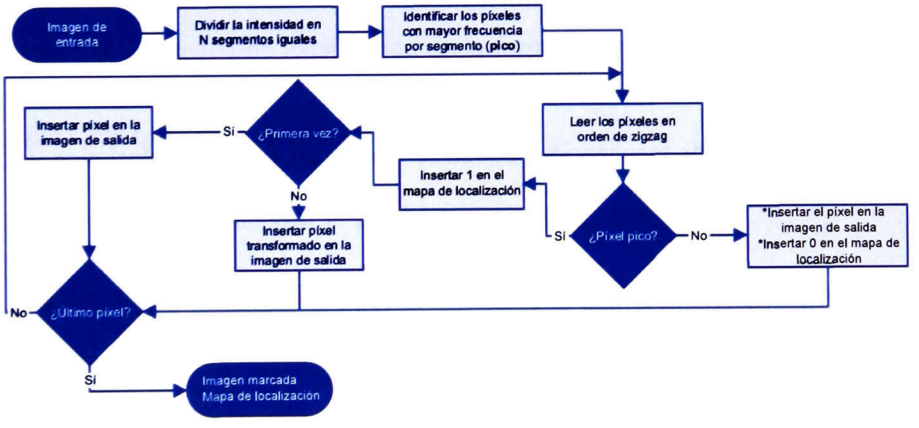


Figura 4.4: Diagrama de flujo del proceso de inserción del algoritmo de Wang *et al.* [47]

1. Dividir los valores de intensidad [1] de la imagen de entrada en segmentos no traslapados de igual tamaño.

[1] 0-255 para una imagen de 8 bit

2. Generar un histograma por cada bloque e identificar el valor de intensidad del píxel con la mayor frecuencia (píxel pico) en cada segmento.

3. Extraer los píxeles de la imagen de entrada utilizando el recorrido de la Figura 4.5, después se procede a extraer k bits del mensaje secreto M e insertar mediante la estrategia de sustitución de píxeles en los píxeles pico.

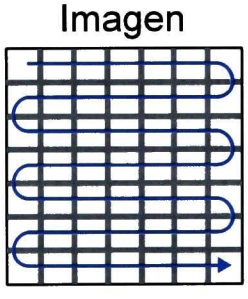


Figura 4.5: Recorrido de extracción de los píxeles de una imagen para el algoritmo [47].

4. Crear un mapa de localización, donde se inserta un 1 si es un píxel pico y 0 en caso contrario .

5. Indicar en un mapa de localización los píxeles pico. Insertando un 1 y en caso contrario insertando un 0.

6. Repetir los pasos 3 y 4 hasta insertar todos los bits del mensaje secreto M.

Proceso de extracción

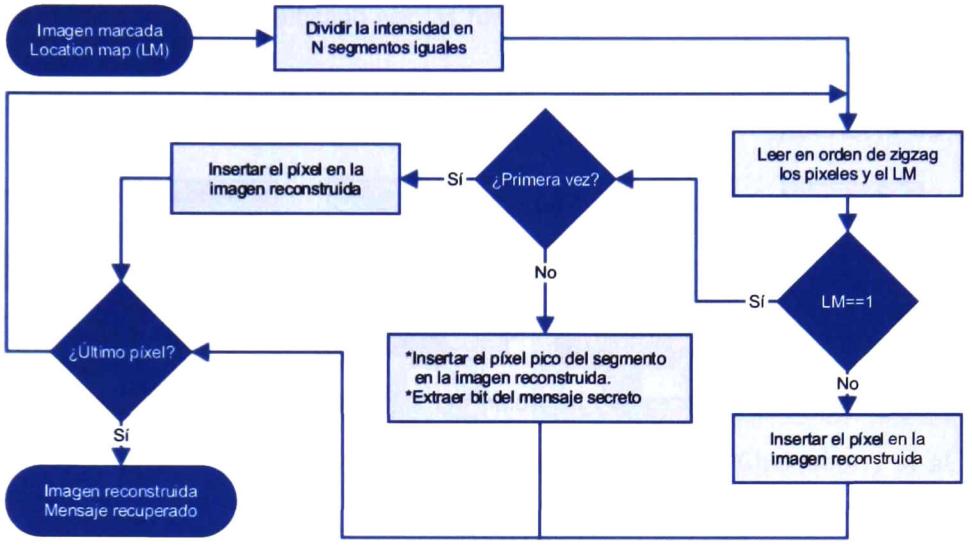


Figura 4.6: Diagrama de flujo del proceso de extracción del algoritmo de Wang *et al.* [47].

1. Dividir los valores de intensidad [2] de la imagen de entrada en segmentos no traslapados de igual tamaño.

2. Leer la imagen marcada y el mapa de localización de la forma que muestra la Figura 4.5.

3. Obtener el píxel pico por cada segmento de referencia.

4. Extraer los datos insertados y reemplazar el píxel con el píxel pico referencia.

5. Repetir los pasos 2 al 4 hasta recuperar la imagen original y la marca de agua.

4.4.1.3. Algoritmo de Chakraborty et al. [46]

Este esquema utiliza un método de interpolación usando funciones trigonométricas para expandir el tamaño de la imagen, la inserción de los bits de la marca de agua se realiza en los píxeles interpolados, este algoritmo no hace uso de un mapa de localización. El proceso de extracción recupera la marca y elimina los píxeles generados por la interpolación del proceso de inserción; por

[2] 0-255 para una imagen de 8 bit

lo tanto se recupera la imagen portadora.

Proceso de inserción:

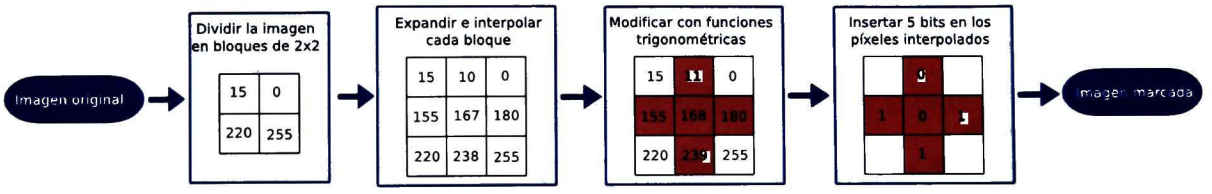


Figura 4.7: Diagrama del proceso de inserción del algoritmo de Chakraborty *et al.* [46].

1. Dividir la imagen de entrada en bloques de 2×2 píxeles.

2. Cada bloque de 2×2 píxeles es transformado a bloques de 3×3 píxeles mediante interpolación usando las siguientes formulas:

$$B_i(1,1) = B_o(1,1) \qquad B_i(3,3) = B_o(2,2) \qquad B_i(2,2) = \sqrt{\frac{(B_i(1,2))^2 + (B_i(3,2))^2}{2}}$$

$$B_i(1,3) = B_o(1,2) \quad B_i(1,2) = \sqrt{\frac{(B_i(1,1))^2 + (B_i(1,3))^2}{2}} \quad B_i(2,3) = \sqrt{\frac{(B_i(1,3))^2 + (B_i(3,3))^2}{2}}$$

$$B_i(3,1) = B_o(2,1) \quad B_i(2,1) = \sqrt{\frac{(B_i(1,1))^2 + (B_i(3,1))^2}{2}} \quad B_i(3,2) = \sqrt{\frac{(B_i(3,1))^2 + (B_i(3,3))^2}{2}}$$

donde B_o es lo bloque de la imagen original y B_i es el bloque interpolado.

3. Los nuevos valores agregados son modificados usando las siguientes funciones trigonométricas:

$$B_f(1,2) = B_i(1,2)\cos\left(\frac{B_i(1,1) + B_i(1,3)}{2}\right) \qquad B_f(2,2) = B_i(2,2)\cos\left(\frac{B_i(1,2)+B_i(3,2)}{2}\right)$$

$$B_f(2,1) = B_i(2,1)\cos\left(\frac{B_i(1,1) + B_i(3,1)}{2}\right) \qquad B_f(2,3) = B_i(2,3)\cos\left(\frac{B_i(1,3)+B_i(3,3)}{2}\right)$$

$$B_f(3,2) = B_i(3,2)\cos\left(\frac{B_i(3,1)+B_i(3,3)}{2}\right)$$

donde B_f es el bloque modificado por las funciones trigonométricas.

4. Extraer 5 bits de la marca de agua M e insertar en los píxeles interpolados.

Proceso de extracción:

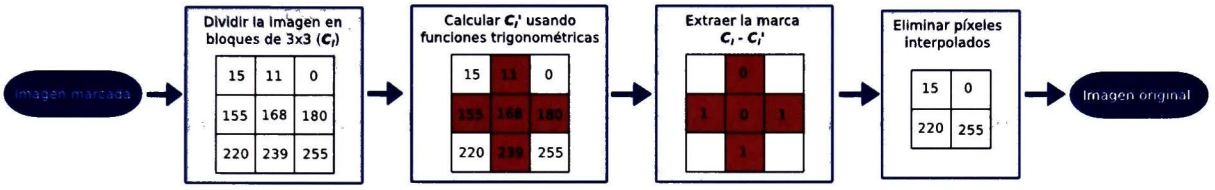


Figura 4.8: Diagrama del proceso de extracción del algoritmo de Chakraborty *et al.* [46].

1. Dividir la imagen de entrada en bloque de 3×3 píxeles llamados C_i.

2. Calcular un nuevo bloque usando funciones trigonométricas, llamado C_i'.

3. Extraer los bits de la marca restando los dos bloques $C_i - C_i'$.

4. Restaurar la imagen original eliminando los píxeles interpolados.

4.4.2 Reversibles auto-recuperables

4.4.2.1. Algoritmo de Zhang y Wang [76]

En este esquema los datos de la marca de agua que se ocultan se componen de dos partes: 1) bits de referencias, los cuales depende de la imagen original, 2) los bits de chequeo, que son calculados por el contenido original y los bits de referencia. El proceso de inserción implementa un algoritmo DE para insertar los bits de referencia y los bits de chequeo en todos los bloques de la imagen portadora, si los datos de la marca de agua son alterados en ciertas áreas, el contenido de la marca en otras áreas no son afectados. La imagen se puede recuperar utilizando los bits de referencia de los bloques que no fueron alterados.

Proceso de inserción:

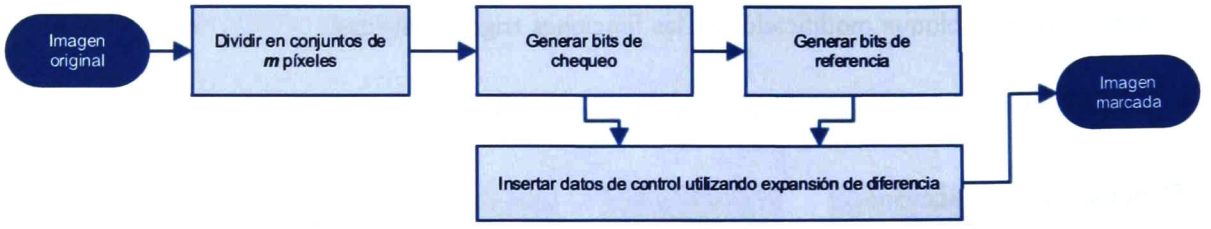


Figura 4.9: Diagrama del algoritmo de Zhang y Wang [76].

1. Dividir en bloques de 8×8, cada bloque se divide en 16 sub-bloques y se asignan los píxeles cambiables y los píxeles incambiables.

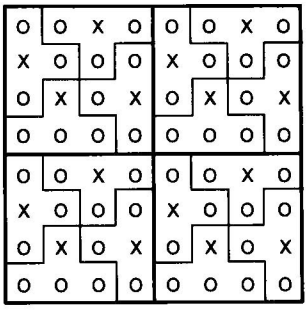


Figura 4.10: Bloque dividido en 16 sub-bloques, donde cada sub-bloque contiene un píxel incambiable etiquetado como (X) y tres píxeles cambiables etiquetados como (O).

2. Por cada píxel cambiable se comprueba si $g_m(i,j) \geq g_u$:

$$g_u + [g_m(i,j) - g_u] \cdot 2 + 1 \leq 255 \tag{4.3}$$

Si $g_m(i,j) < g_u$ entonces:

$$g_u + [g_m(i,j) - g_u] \cdot 2 \leq 255 \tag{4.4}$$

donde gm son los valores de gris de los píxeles cambiables por bloque y gu son los píxeles designados como incambiables de cada bloque. Cuando las Ecuaciones (4.3, 4.4) se cumplen, se asigna el píxel $g_m(i,j)$ como inutilizable, en caso contrario como utilizable.

3. Generar bits de referencia. Este paso produce un grupo de bits de referencia derivado de los

píxeles de la imagen original.

4. Calcular los bits de chequeo. Se crean bits de chequeo con el objetivo de identificar regiones alteradas, se crean a partir de los píxeles cambiables, los píxeles usables y los bits de referencias mediante una función hash de 64 bits.

5. Inserción utilizando el método DE usando la Ecuación 4.5:

$$\widetilde{g_m} = g_u + [g_m(i,j) - g_u] \cdot 2 + w \tag{4.5}$$

donde w son los bits de referencia o bits de chequeo.

Proceso de extracción:

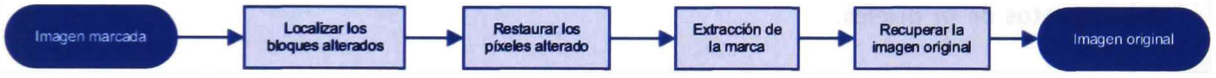


Figura 4.11: Diagrama del algoritmo de Zhang y Wang [76].

1. Dividir la imagen en $\frac{N}{64}$ bloques y $\frac{N}{4}$ sub-bloques de la misma manera que en el proceso de inserción, donde N es el numero total de píxeles en la imagen.

2. Extraer los bits de chequeo y los bits de referencia para poder identificar los bloques alterados y los bloques reservados.

3. Restaurar el valor original de los valores de grises de todos los píxeles en los bloques identificados como alterados.

4.4.2.2. Algoritmo de Bravo-Solorio et al. [77]

Este esquema utiliza un mecanismo de bloque seguro, resistente a ataques de reemplazo de contenido, para localizar los bloques manipulados, utiliza los píxeles sin alteración y bits de referencia para estimar los 5 MSB originales de los píxeles alterados, por medio de un mecanismo de restauración

iterativo y exhaustivo.

Proceso de inserción:

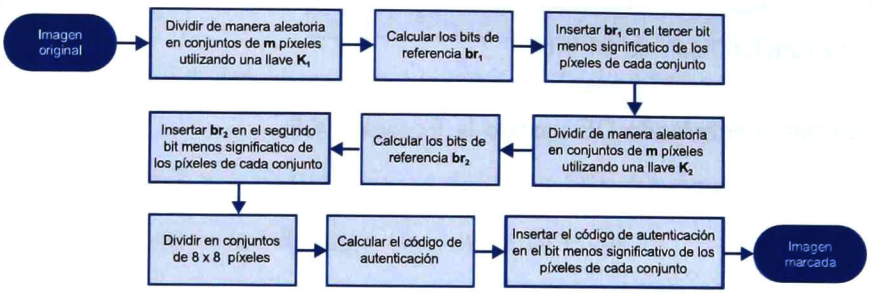


Figura 4.12: Diagrama del proceso de inserción del algoritmo de Bravo-Solorio *et al.* [77].

1. Dividir la imagen pseudo-aleatoriamente mediante el uso de una llave secreta k_1 en subconjuntos de m píxeles.

2. Calcular los bits de referencia br_i utilizando las Ecuaciones 4.6 e insertar el br_i en el tercer bit menos significativo de los píxeles de cada subconjunto.

$$br_i = H\left(\hat{x}_{i,1}, \ldots, \hat{x}_{i,m}\right) \tag{4.6a}$$

$$\hat{x_{i,j}} = \left\lfloor \frac{x_{i,j}}{8} \right\rfloor mod\, 16, \qquad j = 1, \ldots, m \tag{4.6b}$$

donde $H(\cdot)$ es una función hash, $\lfloor \cdot \rfloor$ es la función piso y $\hat{x} \in [0, 15]$ es el valor decimal de los bits $b_4, \ldots, b_7$ de cada píxel $x_{i,j}$.

3. Se calcula un segundo conjunto de bits de referencia br_2 utilizando las Ecuaciones 4.7. Se divide la imagen en subconjuntos de m píxeles cada uno usando una segunda llave secreta br_2. Se calculan una función hash con los 5 MSB de cada píxel de cada subconjunto por último se

inserta br_2 en el segundo bit de los píxeles de cada subconjunto.

$$br_i = H\left(\hat{x}_{i,1}, \ldots, \hat{x}_{i,m}\right) \tag{4.7a}$$

$$\hat{x}_{i,j} = \left\lfloor \frac{x_{i,j}}{8} \right\rfloor, \qquad j = 1, \ldots, m \tag{4.7b}$$

4. Dividir la imagen en bloques de 8×8 no traslapados.

5. Calcular el código de autenticación ca para cada bloque dado la Ecuación 4.8 e insertar éste en el bit menos significativo de cada píxel en cada bloque.

$$ca_i = I \parallel n_1 \parallel\parallel n_2 \parallel p_i \tag{4.8}$$

donde I es un índice exclusivo asociado a cada imagen, p_i es el índice del bloque y $\parallel n_1 \parallel\parallel n_2 \parallel$ es la concatenación de bits del tamaño de la imagen.

Proceso de extracción:

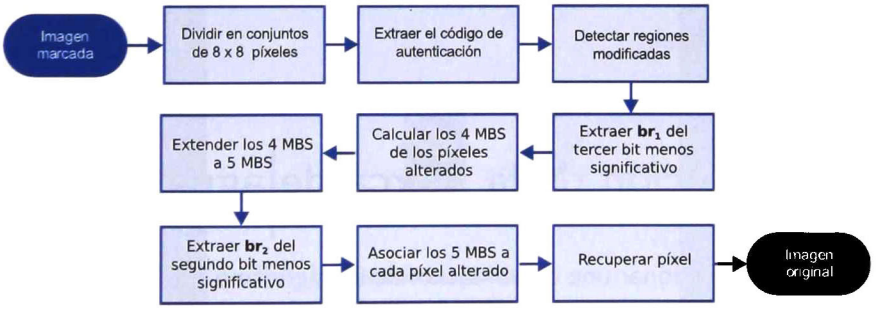


Figura 4.13: Diagrama del proceso de inserción del algoritmo de Bravo-Solorio *et al.* [77].

1. Dividir la imagen en bloques de 8×8 no traslapados.

2. Extraer el código de autenticación del bit menos significativo de cada bloque y asignar el código de autenticación correcto, siendo el que se repita más veces.

3. Localizar los bloques alterados, marcando como alterados todos aquellos que no coincidan con el código de autenticación correcto.

4. Dividir la imagen pseudo-aleatoriamente mediante el uso de una llave secreta k_1 en subconjuntos de m píxeles.

5. Se recuperan los bits de referencia br_1 del bit b_3, después se realiza el cálculo de los 4 MSB de cada píxel alterado por bloque, calculando códigos de prueba $cp_i = H(\hat{y}_{i,1}, \ldots, \hat{y}_{i,m})$ donde $\hat{y}_{i,j} = \lfloor \frac{x_{i,j}}{8} \rfloor \ mod 16$, si $y_{i,j}$ es píxel alterado, se asignan de manera exhaustiva todos los posibles valores de 4 bits a $\hat{y}_{i,j}$. Los códigos de prueba y los bits de referencia son comparados para identificar los 4 MSB que coincidan.

6. Se extienden los 4 MSB añadiendo al inicio un bit 1 y un bit 0, generando dos nuevos valores de 5 bits llamados candidatos de restauración.

7. Dividir la imagen en subconjuntos de m píxeles cada uno, pero ahora usando la segunda llave secreta k_2 y se asocia un solo candidato de restauración al píxel alterado.

8. Restaurar la imagen original.

4.5 Fase de inserción de la marca de agua

Esta etapa consiste en seleccionar una combinación de un algoritmo frágil con un algoritmo auto-recuperable, para realizar el proceso de inserción. El algoritmo frágil recibe como entrada una imagen portadora X a la cual se le inserta una marca de agua M, produciendo una primera imagen marcada Y'. El algoritmo auto-recuperable inserta datos de control proporcionando robustez al esquema,

teniendo como salida una segunda imagen marcada Y''. La distorsión generada se mide utilizando las métricas PSNR y Watson.

4.6 Fase de ataque

Para validar la robustez del esquema propuesto, primeramente se seleccionó una imagen de prueba con una forma simple para visualizar de manera fácil el área modificada en la imagen marcada, después se realizó una sustitución de regiones de píxeles de las imágenes marcadas por los píxeles de la imagen de prueba como se observa en la Figura 4.14, aumentando el área de la región modificada hasta llegar al límite de cada algoritmo auto-recuperable. Es importante mencionar que la fase de ataque siempre modificará la misma área en las imágenes marcadas debido a que los algoritmos auto-recuperable no son dependientes de la forma o posición del área afectada, es decir, no se ve afectado el desempeño de dichos algoritmos, por lo cual se seleccionó una posición y forma de manera arbitraria.

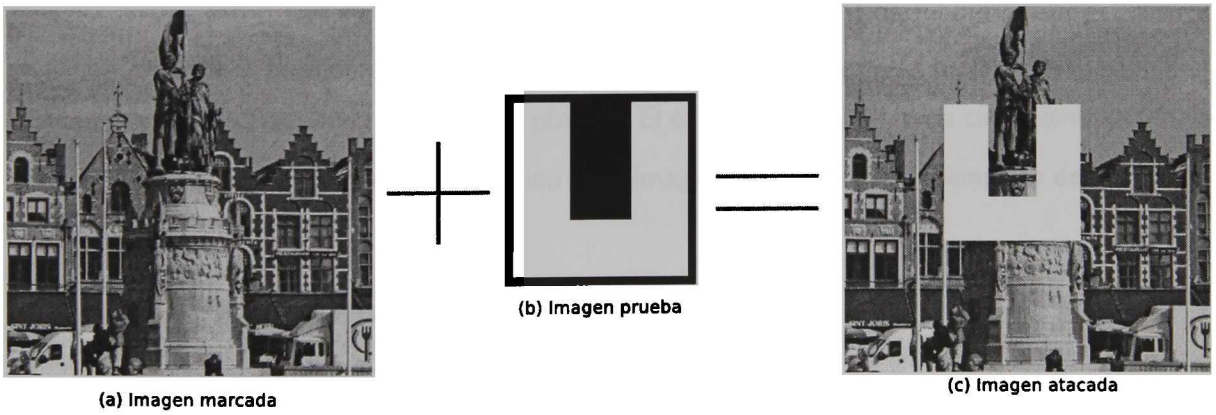


Figura 4.14: Ataque del 10 % de los píxeles de la imagen marcada.

4.7 Fase de extracción / reconstrucción

Con el fin de reconstruir la imagen portadora y extraer la marca de agua, primero se debe aplicar el proceso de extracción del algoritmo auto-recuperable, seguido del proceso de extracción del algoritmo reversible frágil. El algoritmo de auto-recuperación permite detectar las áreas modificadas de la imagen y restaurar las regiones modificadas, recuperando la primera imagen marcada Y'. El algoritmo frágil extrae la marca M y restaura la imagen original Y.

4.8 Resumen del capítulo

En este capítulo se explicaron las características del esquema propuesto. Asimismo se explicó el proceso de selección de los algoritmos de las diferentes familias: reversible frágil y reversible auto-recuperable, así como los procesos de inserción y de extracción de cada uno de los algoritmos seleccionados del estado del arte. También se describieron los tres módulos con los que cuenta el enfoque propuesto. El primer modulo es inserción, se encarga de insertar la marca y los datos de control para proporcionar robustez al esquema. El segundo modulo es ataque, se encarga de validar la robustez del esquema propuesto. El último módulo es detección/extracción, primero se comprueba si existen píxeles alterados, después se procede a restaurar la imagen original y extraer la marca de agua. El esquema propuesto trabaja con imágenes en escala de grises de 512×512 píxeles con una profundidad de 8 bits. Los resultados de la implementación son presentados en el siguiente capítulo.

5

Experimentación y resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se muestra los resultados de las diferentes pruebas realizadas, después de las implementaciones de los esquemas descritos en el capítulo anterior. En primer lugar, se realizó un estudio preliminar antes de la experimentación, para determinar la capacidad máxima de carga útil que cada algoritmo frágil utilizará en la experimentación. Después, se presentan la evaluación del esquema propuesta, la cual está dividida en tres etapas medidas en términos de distorsión visual, (PSNR y Watson) y robustez (máximo reemplazo de píxeles). El objetivo es validar, para cada combinación, la robustez de la marca de agua y la restauración de la imagen bajo ataques de reemplazo de contenido.

5.2 Estudio preliminar

Una vez terminada la implementación de los algoritmos, se realizaron algunas pruebas para ver el comportamiento de los algoritmos en el proceso de inserción. Las pruebas se dividieron en dos tipos:

algoritmos frágil y algoritmos auto-recuperable. El primero consiste en medir la distorsión de los algoritmos frágil con diferentes tamaños de carga útil, asimismo se midió la diferencia entre la marca original y la marca recuperada utilizando el BER [1]. El segundo se encarga de medir la distorsión generada para cada uno de los algoritmos auto-recuperable seleccionados de la literatura.

5.2.1 Reversible frágil

La experimentación de esta familia de algoritmos se realizó usando el conjunto de imágenes de prueba seleccionados en el capitulo anterior, a las cuales se les realizó el proceso de inserción utilizando cada uno de los algoritmos seleccionados en la metodología. Con el objetivo de analizar el comportamiento de la distorsión generada buscando no superar un umbral de 40 dB de PSNR y 0.1 de Watson, se estableció como marca de agua una cadena aleatoria binaria de diferentes tamaños (1,000 hasta 10,000 bits con incrementos de 1,000) y así determinar la capacidad máxima de carga útil de cada algoritmo reversible frágil.

Para evaluar el desempeño de los algoritmos se utilizaron dos métricas para medir la fidelidad entre la imagen marcada y la imagen portadora, estas métricas son: PSNR y Watson. La evaluación de la marca se realizó solamente a la máxima capacidad de carga útil seleccionada por cada algoritmo reversible frágil, además es importante mencionar que el efecto BER de los algoritmos reversible frágil se mantendrá después de la etapa auto-recuperable, dado que esta etapa garantiza que la imagen se mantenga intacta incluso después de ataques.

5.2.1.1. Algoritmo de Huang et al. [56]

En la Figura 5.1 se muestra la distorsión generada por el algoritmo de Huang *et al.* [56] para cada tamaño de carga útil, es importante mencionar que este esquema trabaja con con imágenes médicas a 16 bits, con imágenes a 8 bits solo soporta capacidades de inserción no mayores a 5,000 bits, si este limite es superado se pierde la capacidad de recuperar la imagen original, debido a esto,

[1] Bit Error Rate

el algoritmo se tuvo que sujetar a 5000 bits como capacidad máxima de carga útil para la fase de experimentación.

5.2.1.2. Algoritmo de Wang et al. [47]

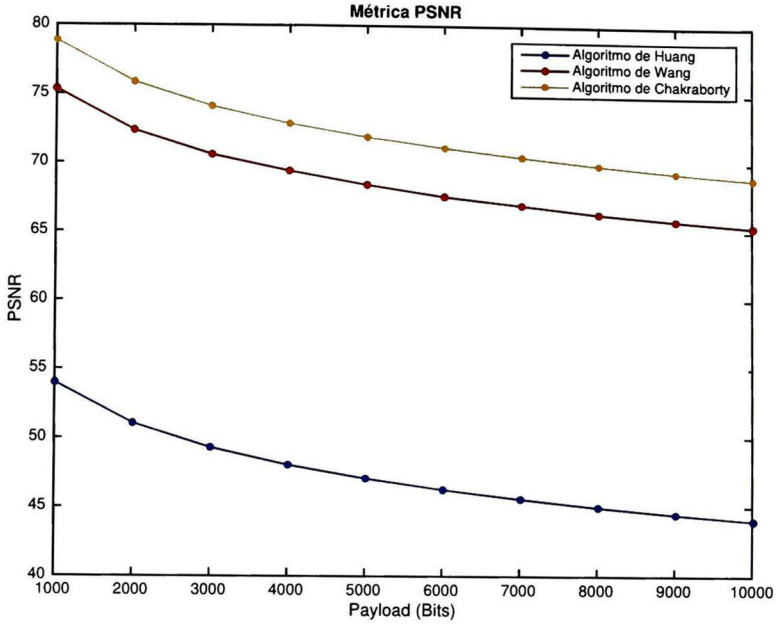
En la Figura 5.1 se puede observar que el algoritmo de Wang *et al.* [47] presenta una baja distorsión visual que se incrementa a altas capacidades de carga útil, este esquema mantiene la reversibilidad para una capacidad de carga de útil de 10000 bits obteniendo un BER de 0, en imágenes de 512×512 píxeles , por tal motivo, se seleccionó 10000 bits como capacidad de carga útil para las pruebas del esquema propuesto.

5.2.1.3. Algoritmo de Chakraborty et al. [46]

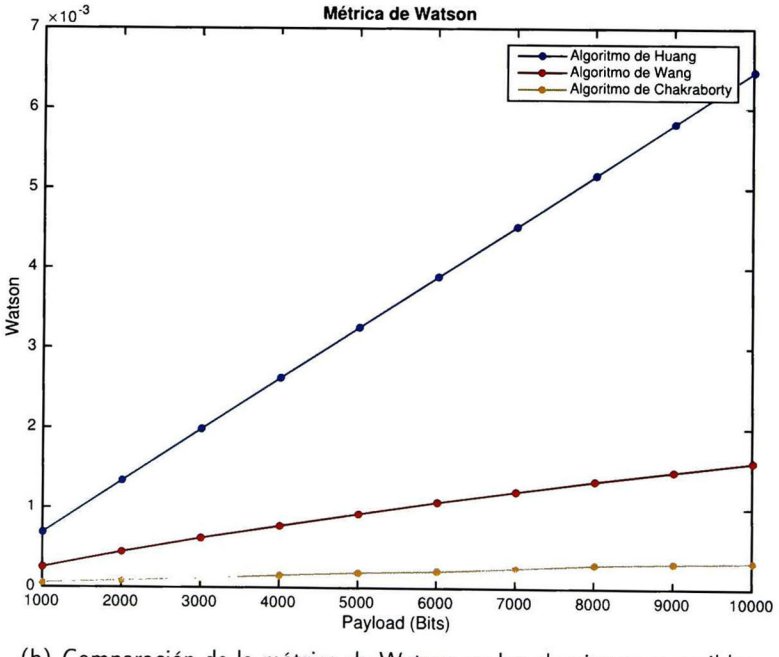
Como se aprecia en la Figura 5.1, este algoritmo presenta la menor distorsión perceptual en comparación a los demás algoritmo seleccionados de la literatura, aunque su desventaja es el incremento del tamaño de la imagen marcada con respecto a la imagen original, aumentando el tiempo de procesamiento de los algoritmos de la familia auto-recuperable. Este algoritmo es capaz de mantener la reversibilidad con una carga útil 10000 bits teniendo un BER de 0, en imágenes de 512×512 píxeles. debido a esto, se seleccionó 10000 bits como capacidad de carga útil para las pruebas del esquema propuesto.

5.2.2 Reversible auto-recuperable

La experimentación se realizó utilizando el conjunto de imágenes de prueba, a las cuales se les sometió a un proceso de inserción de una marca de agua utilizando cada uno de los algoritmos seleccionados en la metodología. Para la evaluación del desempeño de los algoritmos se utilizaron las métricas de PSNR y Watson.



(a) Comparación de la PSNR en los algoritmos reversibles



(b) Comparación de la métrica de Watson en los algoritmos reversibles

Figura 5.1: Distorsión perceptual de los algoritmos reversibles seleccionados.

En la Tabla 5.1 se observa que los algoritmos auto-recuperable generan mucha distorsión visual, debido a que se inserta información en todos los píxeles de la imagen para asegurar la reconstrucción de la imagen original, por lo tanto llega a afectar drásticamente la transparencia visual del esquema propuesto. Además es importante mencionar que el algoritmo en [77] presenta una distorsión menor que [76]; sin embargo, tiene un alto tiempo de cómputo en el proceso de restauración, debido a que realiza una búsqueda exhaustiva y este proceso se repite varias veces.

Ref	Autor	PSNR	Watson	Ataques	Robustez
[76]	Zhang y Wang	29.5753	0.1350	Reemplazo contenido	3.2 %
[77]	Bravo-Solorio *et al.*	37.9035	0.0679	Reemplazo contenido	20 %

Tabla 5.1: Esquemas de marcado de agua digital auto-recuperable

Para solucionar el problema del tiempo de cómputo se optó por utilizar el *Toolbox de computación paralela* de *MATLAB*, el cual permite utilizar los procesadores multi-núcleo para el manejo intensivo de los datos, sin necesidad de programación en CUDA o MPI. Ademas, para mejorar el tiempo de computo se reescribieron varios módulos utilizando la librería *MEX* de *MATLAB*, la cual permite construir y ejecutar funciones de C/C++, como si estuvieran incorporadas en *MATLAB*, obteniendo como resultado una mejora drástica con respecto a los tiempos iniciales, como se observa en la Tabla 5.2.

Área modificada	Tiempo Original	Tiempo Mejorado
3.2 %	10 minutos	29 segundos
10 %	40 minutos	4.16 minutos
15 %	70 minutos	31.4 minutos
20 %	90 minutos	49.5 minutos

Tabla 5.2: Tiempos de restauración de la imagen atacada para el algoritmo de Bravo-Solorio *et al.* [77].

5.3 Evaluación del esquema

En esta sección se muestra los resultados obtenidos del esquema propuesto para cada combinación en términos de robustez/distorsión frente a ataques de reemplazo de contenido.

5.3.1 Inserción

En esta etapa se insertó un flujo de bits como marca de agua en el conjunto de prueba, donde la diferencia entre la imagen marcada y la imagen portadora es medida usando la PSNR y Watson. Los resultados son mostrados en la Tabla 5.4.

	Id	Autor	Media PSNR (dB)	Des. Est. PSNR (dB)	Min PSNR (dB)	Max PSNR(dB)	Media Watson	Des. Est. Watson	Min Watson	Max Watson
Frágil	F1	Huang *et al.*	47.0399	±2.8497	39.6846	56.4064	0.1433	±0.0032	0.0007	0.0905
	F2	**Wang *et al.***	**65.3503**	**±0.0392**	**65.2116**	**65.4893**	**0.0016**	**±0.0015**	**0.0006**	**0.0271**
	F3	Chakraborty *et al.*	68.8480	±0.0441	68.7267	69.0040	0.0003	±0.0002	0.0002	0.0027
Auto-recuperable	A1	Zhang y Wang	29.5753	±4.1089	20.1751	46.9826	0.1350	±0.0675	0.0169	0.4146
	A2	**Bravo-Solorio *et al.***	**37.9035**	**±0.1205**	**36.7826**	**38.7137**	**0.0679**	**±0.0316**	**0.0422**	**0.7103**

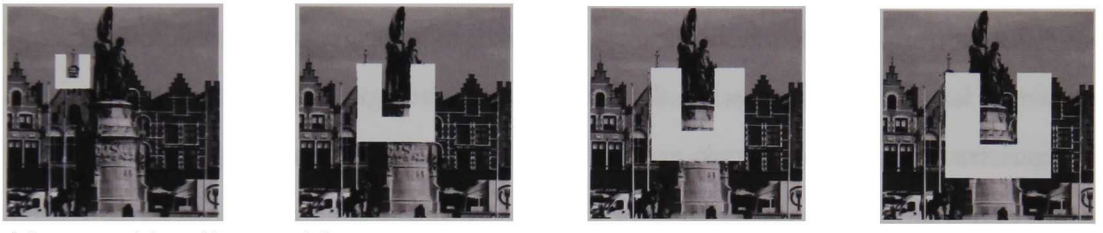
Tabla 5.3: Distorsión generada de los algoritmos frágil y auto-recuperable seleccionados de la literatura.

Combinación	Media PSNR (dB)	Des. Est. PSNR (dB)	Min PSNR (dB)	Max PSNR(dB)	Media Watson	Des. Est. Watson	Min Watson	Max Watson	Carga útil (Bits)
F1-A1	29.0203	±4.5156	20.2532	40.3449	0.1433	± 0.0830	0.0271	0.3953	5k
F1-A2	**37.3449**	**±0.3322**	**36.3405**	**37.9095**	**0.0688**	**±0.0497**	**0.0497**	**0.4546**	**5k**
F2-A1	29.5646	± 4.0990	20.1736	46.7693	0.1355	±0.0675	0.0174	0.4145	10k
F2-A2	**37.9053**	**±0.1335**	**36.5390**	**38.7487**	**0.0678**	**±0.0313**	**0.0419**	**0.7022**	**10k**
F3-A1	32.3986	±3.8787	23.1079	46.1320	0.0985	±0.0459	0.0202	0.2977	10k
F3-A2	**37.8981**	**±0.1213**	**36.9013**	**38.9089**	**0.0678**	**±0.0199**	**0.0420**	**0.3357**	**10k**

Tabla 5.4: Distorsión generada después del proceso de inserción.

5.3.2 Ataques

Para validar la robustez del esquema propuesto, las imágenes marcadas se sometieron a un ataque de reemplazo de contenido, donde un porcentaje de píxeles de la imagen se sustituyen por otra imagen. El porcentaje de reemplazo tiene como objetivo corroborar que cada una de las combinaciones del esquema propuesto tenga la misma robustez que el algoritmo auto-recuperable que estén usando, debido a esto se seleccionaron los siguientes porcentajes de sustitución de píxeles: 3.2 %, 10 % , 15 % y 20 %. En la Figura 5.2 se presenta un ejemplo del proceso de reemplazo sobre una imagen marcada, por cada porcentaje de sustitución.



(a) Ataque del 3.2 % de los píxeles

(b) Ataque del 10 % de los píxeles

(c) Ataque del 15 % de los píxeles

(d) Ataque del 20 % de los píxeles

Figura 5.2: Ejemplo de ataque a imagen marcada

5.3.3 Extracción/recuperación

Finalmente las imágenes modificadas pasaron por un proceso de extracción/recuperación, el cual comenzó detectando las regiones modificadas en la imagen atacada con el objetivo de recuperar los píxeles modificados de la imagen marcada de la fase de inserción, luego se procedió a extraer la marca y restaurar la señal portadora. El proceso de extracción/recuperación se realizó para cada uno de los porcentajes de sustitución de píxeles seleccionados en la etapa anterior. Es importante mencionar que la robustez del esquema propuesto es independiente de la forma y localización del área atacada, es decir puede soportar ataques de regiones disjuntas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5.

Combinación	Recuperar imagen original con 3.2 % de alteración	Recuperar imagen original con 10 % de alteración	Recuperar imagen original con 15 % de alteración	Recuperar imagen original con 20 % de alteración
F1-A1	Sí	No	No	No
F1-A2	Sí	Sí	Sí	Sí
F2-A1	Sí	No	No	No
F2-A2	Sí	Sí	Sí	Sí
F3-A1	Sí	No	No	No
F3-A2	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 5.5: Restauración después del ataque de reemplazo de contenido.

La Tabla 5.6 se concentran los resultados obtenidos después de realizar la experimentación. En las columnas 1-3 presentan a los algoritmos frágil con la distorsión generada por cada algoritmo, las columnas 4-6 muestran a los algoritmos auto-recuperable con su respectiva distorsión, las columnas 7-9 se presentan las combinaciones realizadas entre algoritmos frágil y algoritmos auto-recuperable, ademas se muestra la distorsión generada para cada combinación, la columna 10 presenta la capacidad de carga útil y en la última columna se muestra el máximo grado de robustez a ataques de reemplazo de contenido.

Frágil	PSNR	Watson	Auto-recuperable	PSNR dB	Watson	Combinacion	PSNR	Watson	Carga util (bits)	Robustez
Huang *et al.*	47.0399	0.0032	Zhang y Wang	29.5753	0.1350	F1-A1	29.0203	0.1433	5K	3.2 %
Huang *et al.*	**47.0399**	**0.0032**	**Bravo-Solorio *et al.***	**37.9035**	**0.0679**	**F1-A2**	**37.3496**	**0.0688**	**5K**	**20 %**
Wang *et al.*	65.3503	0.0016	Zhang y Wang	29.5753	0.1350	F2-A1	29.5646	0.1355	10K	3.2 %
Wang *et al.*	**65.3503**	**0.0016**	**Bravo-Solorio *et al.***	**37.9035**	**0.0679**	**F2-A2**	**37.9053**	**0.0678**	**10K**	**20 %**
Chakraborty *et al.*	68.848	0.000327	Zhang y Wang	29.5753	0.1350	F3-A1	32.3986	0.0985	10K	3.2 %
Chakraborty *et al.*	**68.848**	**0.000327**	**Bravo-Solorio *et al.***	**37.9035**	**0.0679**	**F3-A2**	**37.8981**	**0.0678**	**10K**	**20 %**

Tabla 5.6: Resultados de la distorsión perceptual media del esquema completo.

5.4 Análisis de resultados

En esta sección se presenta un estudio de cada una de las combinaciones realizadas para analizar el comportamiento de la distorsión generada por la concatenación de dos algoritmos de marcado de agua reversible, con la finalidad de poder determinar cual es la mejor combinación en términos de

distorsión/carga útil, teniendo en cuenta que se busca un esquema reversible para aplicaciones reales.

La exactitud de los algoritmos puede ser medida con base en la desviación estándar de la PSNR y Watson como se puede apreciar en la Tabla 5.3, donde los algoritmos en [46, 47] presentan la mayor exactitud entre los algoritmos frágil y el algoritmo en [77] entre los algoritmos auto-recuperable, debido a que tienen una menor dispersión en los datos. En el esquema propuesto las combinaciones que presentan una mayor exactitud son las que hacen uso de los algoritmos previamente mencionados, debido a que el esquema conserva la menor exactitud entre el algoritmo frágil y el auto-recuperable.

En la Tabla 5.4 se observa que en la etapa de inserción la distorsión del esquema propuesto esta dominada por la distorsión generada del esquema auto-recuperable sin importar que algoritmo frágil se encuentre antes, esto ocurre debido a que en la primera etapa el algoritmo frágil inserta información en un conjunto de píxeles, mientras en la segunda etapa el algoritmo auto-recuperable modifica todos los píxeles de la primera imagen marcada, por lo que puede aproximar algunos píxeles modificados por la primera etapa a su valor original, por consiguiente la distorsión generada por ambos algoritmos no es aditiva.

En la Tabla 5.5 se observa la robustez contra ataques de reemplazo de contenido de cada combinación, donde la robustez está dada por el algoritmo auto-recuperable y no es dependiente del algoritmo frágil. El esquema propuesto por Zhang y Wang [76] soporta hasta 3.2 % de área modificada de la imagen, debido a que la reconstrucción de los píxeles perdidos depende de encontrar una solución de un sistema de ecuación lineal binario. El esquema propuesto por Bravo-Solorio *et al.* [77] logra soportar de 20 %−23 % de área modificada de la imagen, dependiendo de las propiedades de textura de la imagen, esto se debe a que un píxel original puede ser predicho a través de sus vecinos auténticos.

La desventaja del algoritmo de Bravo-Solorio *et al.* [77] es el tiempo de cómputo, ya que realiza un análisis iterativo y exhaustivo para identificar los píxeles originales, como se observa en la Tabla 5.2, debido a esto se limitó a una robustez de 20 % para aplicaciones reales. Realizando un análisis del algoritmo [77], se llego a deducir teóricamente que es posible alcanzar aproximadamente 49 % de robustez, debido a que dicho algoritmo necesita como mínimo la mitad de bloques de píxeles para poder recuperar, de manera exhaustiva, el resto de los píxeles perdidos.

Con la finalidad de analizar el comportamiento de la distorsión generada de un esquema que concatena un algoritmo A con un algoritmo B, se propuso realizar una nueva experimentación utilizando un algoritmo frágil que tenga una mayor distorsión visual en comparación a los algoritmos auto-recuperables seleccionados previamente. El algoritmo seleccionado fue el de Coltuc y Tudoroiu [45] que proporciona una alta capacidad de carga útil aunque con alta distorsión visual.

La experimentación comenzó analizando el comportamiento de la distorsión ocasionada del algoritmo [45] utilizando los valores de expansión menor y mayor reportados en el trabajo de Coltuc y Tudoroiu ($n = 2$ y $n = 12$), donde n son las veces que se expande la diferencia para insertar hasta $\log_2 n$ bpp. Los resultados se presentan en la Tabla 5.7.

Id	Autor	Expansión	Media PSNR (dB)	Std PSNR (dB)	Min PSNR (dB)	Max PSNR(dB)	Media Watson	Std Watson	Min Watson	Max Watson
C1	Coltuc y Tudoroiu	2	26.5133	±6.7658	7.9300	49.9206	0.1673	0.1657	0.0118	2.8645
C2	Coltuc y Tudoroiu	12	15.2415	±3.3796	6.2572	27.8310	0.7331	0.3117	0.1402	4.3541

Tabla 5.7: Distorsión generada por el algoritmo de Coltuc y Tudoroiu.

Después se procedió a realizar la evaluación del esquema completo para cada una de las tres etapas: inserción, ataque y extracción/recuperación, midiendo la distorsión generada y la robustez para cada una de las combinaciones.

Como se puede apreciar en la Tabla 5.8, la distorsión esta dada por el algoritmo frágil a diferencia de la Tabla 5.6 donde esta dado por el algoritmo auto-recuperable, esto ocurre debido a que ambos algoritmos afectan a todos los píxeles de la imagen al momento de la inserción, manteniendo aproximadamente la distorsión del algoritmo que presente la mayor distorsión, es importante mencionar que mientras mayor sea la diferencia entre las distorsiones de los algoritmos frágil y auto-recuperable, menor será la distorsión añadida en la concatenación de los dos esquemas, por ejemplo las combinaciones con el algoritmo [77] sufre una menor distorsión en comparación al algoritmo [76], que se añade una distorsión de 3 dB.

Como se puede apreciar en la Tabla 5.8, la distorsión ya no presenta el mismo comportamiento que el visto en la Tabla 5.6, se puede observar que esta vez la distorsión esta dada por el algoritmo frágil, esto ocurre debido a que ambos algoritmos afectan a todos los píxeles de la imagen al momento de la inserción, manteniendo aproximadamente la distorsión del algoritmo que presente la mayor distorsión, es importante mencionar que mientras mayor sea la diferencia entre las distorsiones de los algoritmos frágil y auto-recuperable, menor será la distorsión añadida en la concatenación de los dos esquemas, por ejemplo las combinaciones con el algoritmo [77] sufre una menor distorsión en comparación al algoritmo [76], que se añade una distorsión de 3 dB.

Combinación	Media PSNR (dB)	Std PSNR (dB)	Min PSNR (dB)	Max PSNR (dB)	Media Watson	Std Watson	Min Watson	Max Watson	Robustez
C1-A1	21.7481	±5.1189	7.8938	40.7017	0.3164	±0.2309	0.0351	3.3922	3.2 %
C1-A2	**25.7856**	**±5.8836**	**7.9268**	**37.6514**	**0.1983**	**± 0.1686**	**0.0539**	**2.9249**	**20 %**
C2-A1	12.4016	±2.5979	6.1539	22.6634	1.0504	±0.3784	0.2753	4.9221	3.2 %
C2-A2	**15.2115**	**±3.3478**	**6.5504**	**27.4427**	**0.7391**	**±0.3116**	**0.1518**	**4.3353**	**20 %**

Tabla 5.8: Resultados del esquema propuesto utilizando un algoritmo frágil con mayor distorsión perceptual.

Finalmente después de analizar el efecto de la distorsión de la combinación de los dos métodos de inserción, se obtuvo como resultado la Ecuación 5.1, para aproximar la distorsión del esquema

propuesto para cualquier combinación de algoritmos, donde la distorsión final se aproxima a la máxima distorsión entre el algoritmo frágil y el algoritmo auto-recuperable:

$$distorsin_{C} \approx max\left(distorsin_{A}, distorsin_{B}\right) \tag{5.1}$$

5.5 Resumen del capítulo

En este capítulo se presentaron los resultados experimentales del esquema propuesto, donde primero se abordo un estudio preliminar para conocer la distorsión generada por cada algoritmo en el proceso de inserción, para luego proceder a realizar una comparativa con los resultados de la distorsión generada por la concatenación de dichos algoritmos, debido a que no existe manera de poder aproximar la distorsión generada por la concatenación de dos algoritmos de inserción que operan de maneras distinta. Por último se realizó un análisis de los resultados obtenidos, con base en los resaltados obtenidos se puede conocer el efecto de la distorsión generada por el esquema propuesto, así como también se puede conocer *a priori* la capacidad de recuperación que soportará cada combinación, debido a que no es dependiente del esquema completo, sino del algoritmo auto-recuperable, además, se demostró que el método propuesto presenta un mayor grado de robustez que los existentes en la literatura, alcanzando un 20 % de robustez al reemplazo de contenido, mejorando el 3.2 % obtenido por Menéndez-Ortiz *et al.*, también se consiguió una menor distorsión obteniendo 37 dB de PSNR y 0.06 de watson, en comparación a los resultados de [12] 29 de PSNR y 0.1 de Watson. La desventaja de este esquema se presenta cuando el área de alteración en la imagen es demasiado grande, incrementando el tiempo de cómputo en el proceso de restauración de los píxeles perdidos.

6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó un estudio con el objetivo de obtener un esquema de marcado de agua reversible robusto, que tenga la capacidad de reconstruir la imagen portadora y recuperar la marca de agua incluso bajo ataque de reemplazo de contenido.

Los resultados obtenidos muestran que las mejores combinaciones, son todas aquellas que utilicen el algoritmo de Bravo-Solorio *et al.* como algoritmo auto-recuperable, dado que proporciona un mayor grado de robutez (hasta un 20 %), además de contar con un menor impacto perceptual en comparación a los existentes en la literatura [12], cumpliendo así con los objetivos planteados al inicio de este trabajo de tesis. La limitante de este esquema se presenta cuando el área que se desea recuperar es muy extensa, dado que se incrementa el tiempo de cómputo mientras mayor sea la cantidad de píxeles alterados. En esta tesis se evaluó la robustez de [77] hasta un 20 %, teóricamente

es posible alcanzar hasta un 49 % de robustez, aunque el tiempo de cómputo requerido es muy alto. Además, es importante mencionar que la robustez del esquema propuesto nunca se verá afectada por el algoritmo reversible frágil seleccionado, debido a que la robustez solo depende del algoritmo auto-recuperable, por lo que se podría elegir cualquier algoritmo reversible frágil para la fase de inserción.

Dependiendo del tipo de uso o aplicación que se le desee dar al esquema, se podría seleccionar una combinación óptima de algoritmos, por ejemplo, en el área médica lo importante es un baja distorsión visual, dado que la inserción se realiza en los archivos médicos de los pacientes, una alta distorsión podría provocar un diagnóstico médico incorrecto, por consiguiente se podría utilizar un algoritmo frágil con baja distorsión perceptual como el presentado por Wang *et al.* [47]. Por otro lado en la exploración espacial lo que importa es la capacidad de inserción de información, debido a que se utilizan diversos sensores para recopilar una gran cantidad de información y la imagen marcada no es relevante, por lo tanto se podría utilizar un algoritmo con alta capacidad de inserción como el propuesto por Coltuc y Tudoroiu [45].

Es importante mencionar que en la literatura no existía una manera de aproximar la distorsión ocasionada por la concatenación de dos algoritmos de inserción de marcado de agua digital que operan de manera diferente. En este trabajo se descubrió de manera colateral que la distorsión generada de un sistema A concatenado con B no es aditiva, más bien, se aproxima a la distorsión máxima entre A y B.

6.2 Trabajo futuro

Algunos aspectos a tomar a consideración como trabajo futuro son la creación de un esquema reversible robusto que solo utilice un proceso de inserción y extracción, sin la necesidad de concatenar

un algoritmo frágil con un auto-recuperable, para esto se pretende realizar un análisis de otros algoritmos en la literatura para encontrar un relación entre lo métodos de inserción de la marca y poder unificar ambos en uno; otro aspecto a considerar como trabajo futuro es disminuir el tiempo de cómputo en el proceso de restauración de la imagen marcada, para lograr esto se pretende realizar un análisis de diferentes funciones *Hash* buscando aquellas que tengan un bajo costo computacional o alguna función que permita aproximar la cadena de salida con base en la entrada recibida.

Bibliografía

[1] I. J. Cox, M. L. Miller, J. A. Bloom, and C. Honsinger, *Digital watermarking and Steganography*. Springer, 2002, vol. 53.

[2] S. Katzenbeisser and F. Petitcolas, *Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking*, ser. Artech House computer security series. Artech House, 2000.

[3] P. B. Meggs, *Meggs A History of Graphic Design (Fourth Ed.)*, I. John Wiley & Sons, Ed. Wiley, John & Sons, Incorporated, 2006.

[4] H. Frank, "Identification of sound and like signals," Oct. 10 1961, uS Patent 3,004,104.

[5] W. Szepanski, "A signal theoretic method for creating forgery-proof documents for automatic verification," in *Carnahan Conf. on Crime Countermeasures, Lexington, KY*, vol. 101, no. 109, 1979, p. 368.

[6] L. Holt, B. Maufe, and A. Wiener, "Encoded marking of a recording signal," *UK Patent GB A*, vol. 2196167, 1988.

[7] N. Komatsu and H. Tominaga, "Authentication system using concealed images in telematics," *Memoirs of the school of Science and Engineering, Waseda University*, vol. 52, pp. 45–60, 1988.

[8] P. Singh and R. Chadha, "A survey of digital watermarking techniques, applications and attacks," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, no. 9, pp. 165–175, 2013.

[9] R. Anderson, *Information Hiding: First International Workshop.*, ser. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, 1996, vol. 1.

[10] P. W. Wong and E. J. Delp, *Security and Watermarking of Multimedia Contents II.* Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, January 2000, vol. 3971.

[11] P. Wong, E. Delp, I. . T. the Society for Imaging Science, Technology, and S. of Photo-optical Instrumentation Engineers, *Security and Watermarking of Multimedia Contents*, ser. Proceedings of SPIE–the International Society for Optical Engineering. SPIE, 1999.

[12] A. Menéndez-Ortiz, C. Feregrino-Uribe, and J. J. García-Hernández, "Reversible image watermarking scheme with perfect watermark and host restoration after a content replacement attack," *In The 2014 International Conference on Security and Management (SAM'14)*, vol. 13, pp. 385–391, 2014.

[13] R. G. Van Schyndel, A. Z. Tirkel, and C. F. Osborne, "A digital watermark," in *Image Processing, 1994. Proceedings. ICIP-94., IEEE International Conference*, vol. 2. IEEE, 1994, pp. 86–90.

[14] I. Pitas and T. H. Kaskalis, "Applying signatures on digital images," *Proc. IEEE Nonlinear Signal and Image Processing*, 1995.

[15] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 12, pp. 1673–1687, 1997.

[16] V. M. Potdar, S. Han, and E. Chang, "A survey of digital image watermarking techniques," in *Industrial Informatics, 2005. INDIN'05. 2005 3rd IEEE International Conference on.* IEEE, 2005, pp. 709–716.

[17] M.-S. Hsieh, D.-C. Tseng, and Y.-H. Huang, "Hiding digital watermarks using multiresolution wavelet transform," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 5, pp. 875–882, 2001.

[18] S. Rao, A. Jyothsna, and P. R. Pani, "Digital watermarking: Applications, techniques and

attacks," *International Journal of Computer Applications*, vol. 144, no. 7, pp. 29–34, April 2012.

[19] E. Hussein and M. A. Belal, "Digital watermarking techniques, applications and attacks applied to digital media: A survey," in *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 1, no. 7, September 2012.

[20] G. Coatrieux, L. Lecornu, B. Sankur, and C. Roux, "A review of image watermarking applications in healthcare," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE.* IEEE, 2006, pp. 4691–4694.

[21] J.-M. Seol and S.-W. Kim, "A scalable fingerprinting scheme for tracing traitors/colluders in large scale contents distribution environments," in *Intelligent Systems Design and Applications, 2005. ISDA'05. Proceedings. 5th International Conference on.* IEEE, 2005, pp. 228–233.

[22] M. D. Munoz-Hernandez, J. J. Garcia-Hernandez, and M. Morales-Sandoval, "A collusion-resistant fingerprinting system for restricted distribution of digital documents," *PloS one*, vol. 8, no. 12, 2013.

[23] H. Rawat, A. Kumar, and S. Kumar, "Robust digital image watermarking scheme for copyright protection," *International Journal of Computer Applications*, vol. 75, no. 18, pp. 27–32, 2013.

[24] G. Chareyron, D. Coltuc, and A. Trémeau, "Watermarking and authentication of color images based on segmentation of the xyz color space," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 50, no. 5, pp. 411–423, 2006.

[25] S.-Y. Shin, H.-M. Yoo, Y.-H. Ko, H.-S. Kang, and J.-W. Suh, "Reversible watermarking without underflow and overflow problems," in *Circuits and Systems (MWSCAS), 2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on.* IEEE, 2012, pp. 980–983.

[26] H. Peterson, A. Ahumada, and A. B. Watson, "The visibility of dct quantization noise," in *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 24. Citeseer, 1993, pp. 942–942.

[27] Z. Wang and A. Bovik, *Modern Image Quality Assessment*, ser. Synthesis lectures on image. Morgan & Claypool Publishers, 2006.

[28] A. Menéndez-Ortiz, C. Feregrino-Uribe, J. J. García-Hernández, and Z. J. Guzman-Zavaleta, "A suervey on watermarking applications, attacks and reversible watermarking: an approach from the robustness point of view," 2014, en proceso de publicación.

[29] J.-b. Feng, I.-C. Lin, C.-S. Tsai, and Y.-P. Chu, "Reversible watermarking: current status and key issues," *IJ Network Security*, vol. 2, no. 3, pp. 161–170, 2006.

[30] A. Khan, S. A. Malik *et al.*, "A high capacity reversible watermarking approach for authenticating images: Exploiting down-sampling, histogram processing, and block selection," *Information Sciences*, vol. 256, pp. 162–183, 2014.

[31] R. Naskar and R. Chakraborty, *Reversible Digital Watermarking- Theory and Practices*. Morgan and Claypool, 2014.

[32] J. Tian, "Reversible data embedding using a difference expansion," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, vol. 13, no. 8, pp. 890–896, 2003.

[33] D. M. Thodi and J. J. Rodriguez, "Prediction-error based reversible watermarking," in *Image Processing, 2004. ICIP'04. 2004 International Conference on*, vol. 3, 2004, pp. 1549–1552.

[34] Z. Ni, Y.-Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible data hiding," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 3, pp. 354–362, 2006.

[35] B. Schneier, *Applied cryptography*, second ed. ed., Incorporated, Ed. Wiley and Sons, 1996.

[36] R. L. Rivest *et al.*, "Rfc 1321: The md5 message-digest algorithm," *Internet activities board*, vol. 143, 1992.

[37] D. Eastlake and P. Jones, "Us secure hash algorithm 1," RFC 3174, September 2001.

[38] H.-t. Wu, J. Huang, Y. Zhang, and J. You, "Reversible image watermarking by rhombus prediction and histogram modification," in *Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2012 International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 165–169.

[39] C.-C. Chang and T. D. Kieu, "A reversible data hiding scheme using complementary embedding strategy," *Information Sciences*, vol. 180, no. 16, pp. 3045–3058, 2010.

[40] T. Efimushkina and K. Egiazarian, "High-capacity reversible q-ry data hiding with location map-free capability," *4th International Conference on Imaging for Crime Detection and Prevention 2011 (ICDP 2011)*, pp. 39–45, 2011.

[41] D. Coltuc and J.-M. Chassery, "High capacity reversible watermarking," in *Image Processing, 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 2565–2568.

[42] C. Wang, X. Li, and B. Yang, "High capacity reversible image watermarking based on integer transform," in *Image Processing (ICIP), 2010 17th IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 217–220.

[43] V. Sachnev, H. Kim, S. Suresh, and Y. Shi, "Reversible watermarking algorithm with distortion compensation," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, no. 1, pp. 1–6, 2011.

[44] N. O. Abokhdair and A. B. A. Manaf, "A prediction-based reversible watermarking for mri images," *International Journal of Computer, Information, Systems and Control Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 189–192, 2013.

[45] D. Coltuc and A. Tudoroiu, "Multibit versus multilevel embedding in high capacity difference expansion reversible watermarking," in *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2012 Proceedings of the 20th European.* IEEE, 2012, pp. 1791–1795.

[46] S. Chakraborty, P. Maji, A. K. Pal, D. Biswas, and N. Dey, "Reversible color image watermarking using trigonometric functions," in *Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies (ICESC), 2014 International Conference on.* IEEE, 2014, pp. 105–110.

[47] Z.-H. Wang, C.-F. Lee, and C.-Y. Chang, "Histogram-shifting-imitated reversible data hiding," *Journal of Systems and Software*, vol. 86, no. 2, pp. 315–323, 2013.

[48] Y.-Y. Tsai, D.-S. Tsai, and C.-L. Liu, "Reversible data hiding scheme based on neighboring pixel differences," *Digital Signal Processing*, vol. 23, no. 3, pp. 919–927, 2013.

[49] M. Fujiyoshi, "A histogram shifting-based blind reversible data hiding method with a histogram peak estimator," in *Communications and Information Technologies (ISCIT), 2012 International Symposium on.* IEEE, 2012, pp. 313–318.

[50] L. Luo, Z. Chen, M. Chen, X. Zeng, and Z. Xiong, "Reversible image watermarking using interpolation technique," *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 1, pp. 187–193, 2010.

[51] I. Caciula and D. Coltuc, "Capacity control of reversible watermarking by two-thresholds embedding: Further results," in *Signals, Circuits and Systems (ISSCS), 2013 International Symposium on.* IEEE, 2013, pp. 1–4.

[52] X.-T. Wang, C.-C. Chang, T.-S. Nguyen, and M.-C. Li, "Reversible data hiding for high quality images exploiting interpolation and direction order mechanism," *Digital Signal Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 569–577, 2013.

[53] T. Naheed, I. Usman, and A. Dar, "Lossless data hiding using optimized interpolation error expansion," in *Frontiers of Information Technology (FIT), 2011*, Dec 2011, pp. 281–286.

[54] G. Coatrieux, W. Pan, N. Cuppens-Boulahia, F. Cuppens, and C. Roux, "Reversible watermarking based on invariant image classification and dynamic histogram shifting," *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 1, pp. 111–120, 2013.

[55] J. Li, X. Li, and B. Yang, "Reversible data hiding scheme for color image based on prediction-error expansion and cross-channel correlation," *Signal Processing*, vol. 93, no. 9, pp. 2748–2758, 2013.

[56] L.-C. Huang, L.-Y. Tseng, and M.-S. Hwang, "A reversible data hiding method by histogram shifting in high quality medical images," *Journal of Systems and Software*, vol. 86, no. 3, pp. 716–727, 2013.

[57] Z. J. G. Zavaleta, C. F. Uribe, J. A. M. Villanueva, and R. Cumplido, "A reversible data hiding algorithm for radiological medical images," in *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2008. CCE 2008. 5th International Conference on.* IEEE, 2008, pp. 280–285.

[58] T. Naheed and I. Usman, "Intelligent reversible digital watermarking technique using interpolation errors," in *Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA), 2012 11th International Conference on*, July 2012, pp. 1062–1067.

[59] Y. Yan, W. Cao, and S. Li, "High capacity reversible image authentication based on difference image watermarking," in *Imaging Systems and Techniques, 2009. IST'09. IEEE International Workshop on.* IEEE, 2009, pp. 179–182.

[60] C. W. Honsinger, P. W. Jones, M. Rabbani, and J. C. Stoffel, "Lossless recovery of an original image containing embedded data," Aug. 21 2001, uS Patent 6,278,791.

[61] C. De Vleeschouwer, J.-F. Delaigle, and B. Macq, "Circular interpretation of bijective transformations in lossless watermarking for media asset management," *Multimedia, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 1, pp. 97–105, 2003.

[62] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, W. Su, and Q. Sun, "Robust lossless image data hiding," in *Multimedia and Expo, 2004. ICME'04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2004, pp. 2199–2202.

[63] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, W. Su, Q. Sun, and X. Lin, "Robust lossless image data hiding designed for semi-fragile image authentication," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 4, pp. 497–509, 2008.

[64] D. Zou, Y. Q. Shi, Z. Ni, and W. Su, "A semi-fragile lossless digital watermarking scheme based on integer wavelet transform," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 10, pp. 1294–1300, 2006.

[65] X. Wu, "Reversible semi-fragile watermarking based on histogram shifting of integer wavelet coefficients," in *Digital EcoSystems and Technologies Conference, 2007. DEST'07. Inaugural IEEE-IES*. IEEE, 2007, pp. 501–505.

[66] K.-S. Kim, M.-J. Lee, Y.-H. Suh, and H.-K. Lee, "Robust lossless data hiding based on block gravity center for selective authentication," in *Multimedia and Expo, 2009. ICME 2009. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 1022–1025.

[67] E. Chrysochos, V. Fotopoulos, A. Skodras, and M. Xenos, "Reversible image watermarking based on histogram modification," in *Proc. 11th Panhellenic Conf. Informatics (PCI 2007)*, 2007, pp. 93–104.

[68] D. Coltuc and J.-M. Chassery, "Very fast watermarking by reversible contrast mapping," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 14, no. 4, pp. 255–258, 2007.

[69] G. Coatrieux, J. Montagner, H. Huang, and C. Roux, "Mixed reversible and roni watermarking for medical image reliability protection," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*, 2007, pp. 5653–5656.

[70] T. Gao and Q. Gu, "Reversible watermarking algorithm based on wavelet lifting scheme," *International journal of wavelets, multiresolution and Information processing*, vol. 6, no. 04, pp. 643–652, 2008.

[71] M. J. Saberian, M. A. Akhaee, and F. Marvasti, "An invertible quantization based watermarking approach," *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference on*, pp. 1677–1680, 2008.

[72] C.-C. Chang, P.-Y. Lin, and J.-S. Yeh, "Preserving robustness and removability for digital watermarks using subsampling and difference correlation," *Information Sciences*, vol. 179, no. 13, pp. 2283–2293, 2009.

[73] Q. Gu, G. Han, T. Gao, and Z. Chen, "A novel adaptive reversible watermarking algorithm based on wavelet lifting scheme," in *Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on.* IEEE, 2009, pp. 1–4.

[74] C.-Y. Yang, C.-H. Lin, and W.-C. Hu, "Reversible watermarking by coefficient adjustment method," in *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 2010 Sixth International Conference on.* IEEE, 2010, pp. 39–42.

[75] H.-H. Tsai, H.-C. Tseng, and Y.-S. Lai, "Robust lossless image watermarking based on α trimmed mean algorithm and support vector machine," *Journal of Systems and Software*, vol. 83, no. 6, pp. 1015–1028, 2010.

[76] X. Zhang and S. Wang, "Fragile watermarking with error-free restoration capability," *Multimedia, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 8, pp. 1490–1499, 2008.

[77] S. Bravo-Solorio, C.-T. Li, and A. K. Nandi, "Watermarking method with exact self-propagating restoration capabilities," in *Proceedings of the 2012 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS)*. IEEE, 2012, pp. 217–222.

[78] W. V. Laboratory. Break our watermarking system. [Online]. Available: http://bows2.ec-lille.fr/

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN

Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM
Carretera a Soto la Marina Km. 5.5 C.P. 87130
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México
Tel: +52 (834) 107 0220 Fax: +52 (834) 107 0224
E-mail: admin@tamps.cinvestav.mx
www.tamps.cinvestav.mx

Cinvestav
Tamaulipas

2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón

Los abajo firmantes, integrantes del jurado para el examen de grado que sustentará el C. Dan Williams Robledo Cruz, declaramos que hemos revisado la tesis titulada:

"Esquema de marcado de agua digital reversibles robusto a reemplazo de contenido para imágenes digitales"

Y consideramos que cumple con los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Computación.

Atentamente,

Dr. César Torres Huitzil

Dr. Wilfrido Gómez Flores

Dr. José Juan García Hernández