

ÍNDICE

Capítulo 1	Introducción general	1
1.1	<i>Objetivos</i>	2
1.2	<i>Metodología</i>	2
1.3	<i>Hipótesis</i>	3
1.4	<i>Esbozo de la tesis</i>	3
Capítulo 2	Marca de agua digital y su robustez	5
2.1	<i>Introducción</i>	5
2.1.1	<i>Criptografía</i>	6
2.1.2	<i>Esteganografía</i>	6
2.1.3	<i>Marca de agua digital</i>	7
2.2	<i>Características de la marca de agua</i>	8
2.3	<i>Tipos de marca de agua</i>	9
2.4	<i>Distorsiones y ataques</i>	11
2.4.1	<i>Ruido aditivo</i>	12
2.4.2	<i>Filtrado lineal</i>	12
2.4.3	<i>Recorte de la imagen</i>	13
2.4.4	<i>Distorsiones geométricas</i>	14
2.4.5	<i>Compresión</i>	14
2.4.6	<i>Modificaciones del histograma</i>	15
2.5	<i>Aplicaciones del marcado de agua</i>	15
2.5.1	<i>Monitoreo de emisiones de contenido</i>	15
2.5.2	<i>Demostración de propiedad</i>	15
2.5.3	<i>Control de copias</i>	16
2.5.4	<i>Autenticación</i>	16
2.6	<i>Esquema general del marcado y recuperación de la marca</i>	17
2.7	<i>Codificación de la marca de agua</i>	18
2.8	<i>Codificación de canal</i>	19
2.9	<i>Detección y corrección de errores</i>	19
2.10	<i>Códigos convolucionales</i>	20
2.10.1	<i>Diagrama de estados</i>	22
2.10.2	<i>Diagrama de trellis o enrejado</i>	23
2.10.3	<i>Corrección de errores</i>	24
2.10.4	<i>Codificación de la marca de agua</i>	26

Capítulo 3	Marca de agua en el dominio transformado	29
3.1	<i>Introducción</i>	29
3.2	<i>Transformada Discreta de Fourier</i>	30
3.3	<i>Transformada wavelet</i>	32
3.3.1	<i>Transformada discreta wavelet en 1-D</i>	35
3.3.2	<i>Transformada discreta wavelet en 2-D</i>	37
3.4	<i>Transformada contourlet</i>	39
3.4.1	<i>Pirámide Laplaciana</i>	41
3.4.2	<i>Multiresolución</i>	43
3.4.3	<i>Banco de filtros direccionales</i>	46
3.4.3	<i>Descomposición Direccional y Multiescala</i>	51
3.5	<i>Espectro disperso</i>	53
Capítulo 4	Recuperación de la marca de agua	55
4.1	<i>Introducción</i>	55
4.2	<i>Recuperación de la marca de agua</i>	55
4.3	<i>Decodificación de la marca de agua</i>	58
4.3.1	<i>Decodificador de Viterbi</i>	58
4.4	<i>El sistema visual humano</i>	59
4.5	<i>Índice estructural de similaridad</i>	61
4.6	<i>Algoritmo de inserción y recuperación de la marca de agua</i>	64
4.6.1	<i>Algoritmo 1</i>	64
4.6.1.1	<i>Inserción de la marca de agua</i>	64
4.6.1.2	<i>Recuperación de la marca de agua</i>	66
4.6.2	<i>Algoritmo 2</i>	66
4.6.2.1	<i>Inserción de la marca de agua</i>	66
4.6.2.2	<i>Recuperación de la marca de agua</i>	67
Capítulo 5	Resultados	71
5.1	<i>Introducción</i>	71
5.2	<i>Espectro disperso mejorado sin codificación convolucional</i>	72
5.3	<i>Espectro disperso mejorado con codificación convolucional</i>	74
5.4	<i>Capacidad del sistema de marcado de agua</i>	81
5.5	<i>Prueba a diferentes ataques</i>	83
5.5.1	<i>Compresión JPEG</i>	83
5.5.2	<i>Ruido Gaussiano</i>	92
5.5.3	<i>Ruido salt & pepper “sal y pimienta”</i>	96
5.5.4	<i>Filtrado Gaussiano paso bajas</i>	101

<i>5.5.5 Recorte de la imagen</i>	104
Capítulo 6 Conclusiones	109
<i>6.1 Trabajo futuro</i>	110
Referencias	112
Anexo 1	115
<i>Anexo 1.1 Pseudocódigo del algoritmo 1</i>	115
<i>Anexo 1.2 Pseudocódigo del algoritmo 2</i>	116
<i>Anexo 1.3 Funciones utilizadas en los algoritmos 1 y 2</i>	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema general del encriptado y desencriptado	6
Figura 2.2 Sistema de marcado de agua	7
Figura 2.3 (a) Imagen original. (b) Marca de agua. (c) Imagen con marca de agua visible. (d) Imagen con marca de agua invisible.	10
Figura 2.4 Ejemplo de filtrado. (a) imagen original. (b) Imagen suavizada con filtro paso bajas Gaussiano de tamaño 5×5 y $\sigma=1$.	13
Figura 2.5 Ejemplo de imagen recortada	13
Figura 2.6 Ejemplo de distorsión geométrica: rotación.	14
Figura 2.7 Esquema general de marcado y recuperación de marca de agua informado.	18
Figura 2.8 Esquema general de marcado y recuperación de marca de agua ciego.	18
Figura 2.9 Codificación	20
Figura 2.10 Ejemplo de codificador convolucional. $V = 2$, $K = 3$. Por cada bit que entra al codificador salen 2 bits codificados.	21
Figura 2.11 Diagrama de estados de código convolucional $V = 2$, $K = 3$.	22
Figura 2.12 Diagrama de <i>trellis</i> de código convolucional $V = 2$, $K = 3$.	23
Figura 2.13 En azul palabras del código, en rojo vectores de S_n .	24
Figura 2.14 En azul palabras del código, en rojo palabras del código luego de transmisión por canal AWGN.	25
Figura 2.15 Codificador de marca de agua binaria. $V = 3$, $K = 5$.	27
Figura 3.1 División del plano tiempo-frecuencia hecha por la STFT. La resolución es la misma en cualquier región del plano tiempo-frecuencia.	32
Figura 3.2 Función de escalamiento Haar.	33
Figura 3.3 “ <i>wavelet madre</i> ” Haar.	34
Figura 3.4 División del plano tiempo-frecuencia hecho por la transformada <i>wavelet</i> .	35
Figura 3.5 Banco de filtros <i>wavelet</i> 1-D	36
Figura 3.6 Respuesta al impulso del banco de filtros pasa banda. Se divide el ancho de banda original BW .	36
Figura 3.7 Síntesis <i>wavelet</i> 1-D	36

Figura 3.8 Análisis <i>wavelet</i> en 2-D. “L” denota banda de paso baja, “H” denota banda de paso alta.	37
Figura 3.9 Análisis <i>wavelet</i> en imágenes	38
Figura 3.10 Descomposición <i>wavelet</i> de la imagen “Bárbara” a nivel 3.	39
Figura 3.11 Aproximación del contorno suave a diferentes resoluciones [16].	40
Figura 3.12 Esquema de la pirámide Laplaciana [17]. H es el filtro pasobajas de análisis y G el de síntesis. $\downarrow M$ representa el submuestreo y $\uparrow M$ el sobremuestreo.	41
Figura 3.13 Se obtiene la aproximación c a partir de la imagen original x filtrada paso bajas por H y submuestreada por M . Sobremuestreando c y luego de un filtro de síntesis se obtiene la predicción p . La diferencia entre la imagen original x y la predicción p nos da los detalles d .	42
Figura 3.14 Primeros 4 niveles de de la pirámide Gaussiana y Laplaciana [18]. Pirámide Gaussiana columna superior, pirámide Laplaciana columna inferior.	43
Figura 3.15 Síntesis Laplaciana. \hat{x} es la imagen reconstruida [17].	43
Figura 3.16 Subespacios multiescala generados por la pirámide Laplaciana [17].	45
Figura 3.17 Ejemplo de imagen remuestreada. (a) Imagen de “Bárbara”. (b) “Bárbara” remuestreada por la matriz $R = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.	47
Figura 3.18 Imagen rotada por matriz de muestreo <i>quincunx</i> Q_0 .	48
Figura 3.19 Respuesta en frecuencia de (a) filtro en forma de diamante (b) filtro en forma de abanico. [17]	48
Figura 3.20 (a) Filtro de abanico. (b) Filtro de cuadrantes. (c) cuatro direcciones de descomposición [17].	49
Figura 3.21 Partición direccional en frecuencia para $l=3$ [17].	49
Figura 3.22 Subespacios multidireccionales generados por el banco de filtros direccionales [17].	50
Figura 3.23 Subespacios generados por la descomposición multiescala multidirección [17].	51

Figura 3.24 Descomposición piramidal direccional. (a) Se realiza la descomposición piramidal; la descomposición direccional es aplicada solamente al canal paso altas. (b) División en frecuencia resultante: el número de direcciones aumenta con la frecuencia.	52
Figura 3.25 Descomposición <i>contourlet</i> de la imagen “Bárbara” con 2 niveles de descomposición. 4 direcciones en el primer nivel y 8 direcciones en el segundo nivel.	52
Figura 4.1 Probabilidades condicionales $p(r/s_1)$ y $p(r/s_2)$.	56
Figura 4.2 Comparación entre decisión dura y decisión suave.	59
Figura 4.3 Ejemplo de la característica número 2 del sistema visual humano. El brillo absoluto de los cuadrados interiores es el mismo.	60
Figura 4.4 Descomposición <i>contourlet</i> empleada en el sistema de marcado de agua.	65
Figura 4.5 Diagrama de bloques de algoritmo de inserción de marca de agua propuesto.	70
Figura 5.1 PSNR contra factor de multiplicación γ sin utilizar codificación convolucional.	73
Figura 5.2 SSIM contra factor de multiplicación γ sin utilizar codificación convolucional.	73
Figura 5.3 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada sin utilizar codificación convolucional.	74
Figura 5.4 PSNR contra factor de multiplicación γ . La marca de agua fue codificada utilizando codificación convolucional previa a su inserción.	75
Figura 5.5 SSIM contra factor de multiplicación γ . La marca de agua fue codificada utilizando codificación convolucional previa a su inserción.	75
Figura 5.6 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.	76
Figura 5.7 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.	77
Figura 5.8 Comparación de la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 1.	78
Figura 5.9 Comparación de la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 2.	79

Figura 5.10 Comparación de la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 1.	79
Figura 5.11 Marca de agua "Ingeniería" de tamaño 9×72 pixeles.	80
Figura 5.12 Marca de agua recuperada para espectro disperso mejorado sin codificación convolucional. Porcentaje de compresión JPEG=77%, PSNR= 40, SSIM=.9578, BER=.0586, γ =.2946.	80
Figura 5.13 Marca de agua recuperada para espectro disperso mejorado utilizando codificación convolucional y decisión dura en el decodificador. Porcentaje de compresión JPEG=77%, PSNR= 40, SSIM=.9577, BER=.0478, γ =.0478.	80
Figura 5.14 Marca de agua recuperada para espectro disperso mejorado utilizando codificación convolucional y decisión suave en el decodificador. Porcentaje de compresión JPEG=77%, PSNR= 40, SSIM=.9577, BER=0, γ =.0478.	81
Figura 5.15 PSNR de la imagen marcada contra tamaño de la marca de agua en bits.	82
Figura 5.16 SSIM de la imagen marcada contra tamaño de la marca de agua en bits.	82
Figura 5.17 PSNR de la imagen comprimida para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG.	84
Figura 5.18 SSIM de la imagen comprimida para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG.	84
Figura 5.19 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG. La decodificación se realizó utilizando decisión dura.	85
Figura 5.20 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG. La decodificación se realizó utilizando decisión suave.	85
Figura 5.21 Comparación entre decisión suave y decisión dura. Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 1 contra porcentaje de compresión JPEG.	86
Figura 5.22 Comparación entre decisión suave y decisión dura. Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 2 contra porcentaje de compresión JPEG.	87
Figura 5.23 Comparación entre decisión suave y decisión dura. Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 3 contra porcentaje de compresión JPEG.	87
Figura 5.24 Marca de agua binaria "Ingeniería"	88

Figura 5.25 (a) Imagen de "Lena". (b) Imagen marcada con la marca de agua invisible "Ingeniería" PSNR=33.52dB, SSIM=.8282.	88
Figura 5.26 Histograma de la imagen "Lena" original. Entropía=7.2894 bits	88
Figura 5.27 Histograma de la imagen "Lena" marcada con marca de agua "Ingeniería". Entropía=7.3432 bits	89
Figura 5.28 (a) Imagen marcada comprimida. Porcentaje de compresión JPEG=80%, PSNR=31.2dB, SSIM=.79. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.	89
Figura 5.29 Marca de agua binaria "Puma"	90
Figura 5.30 (a) Imagen "Bárbara". (b) Imagen marcada con la marca de agua "Puma". PSNR=36.24dB, SSIM=.9291.	90
Figura 5.31 Histograma de la imagen "Bárbara" original. Entropía=7.6321 bits.	91
Figura 5.32 Histograma de la imagen "Bárbara" marcada con marca de agua "Puma". Entropía=7.6576 bits.	91
Figura 5.33 (a) Imagen marcada con marca de agua "Puma" y comprimida. Porcentaje de compresión JPEG=80%, PSNR=28.72dB, SSIM=.8466. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.	92
Figura 5.34 PSNR de la imagen "ruidosa" contra potencia del ruido Gaussiano.	93
Figura 5.35 PSNR de la imagen "ruidosa" contra potencia del ruido Gaussiano.	93
Figura 5.36 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido Gaussiano utilizando codificación convolucional con decisión dura.	94
Figura 5.37 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido Gaussiano utilizando codificación convolucional con decisión suave.	94
Figura 5.38 (a) Imagen marcada con ruido Gaussiano de varianza .01. PSNR=19.91dB, SSIM=.3864. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.	95
Figura 5.39 PSNR de la imagen "ruidosa" contra porcentaje de ruido <i>salt & pepper</i> .	96
Figura 5.40 PSNR de la imagen "ruidosa" contra porcentaje de ruido <i>salt & pepper</i> (acercamiento de 0 a 20%)	97

Figura 5.41 SSIM de la imagen “ruidosa” contra porcentaje de ruido <i>salt & pepper</i> .	97
Figura 5.42 SSIM de la imagen “ruidosa” contra porcentaje de ruido <i>salt & pepper</i> (acercamiento de 0 a 20%)	98
Figura 5.43 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido <i>salt & pepper</i> utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.	98
Figura 5.44 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido <i>salt & pepper</i> (acercamiento de 0 a 20%) utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.	99
Figura 5.45 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido <i>salt & pepper</i> utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.	99
Figura 5.46 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido <i>salt & pepper</i> (acercamiento de 0 a 20%) utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.	100
Figura 5.47 (a) Imagen marcada con 6% de ruido <i>salt & pepper</i> . PSNR=17.33dB, SSIM=.3724. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.	101
Figura 5.48 PSNR de la imagen filtrada contra desviación estándar del <i>kernel</i> Gaussiano.	102
Figura 5.49 SSIM de la imagen filtrada contra desviación estándar del <i>kernel</i> Gaussiano.	102
Figura 5.50 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen filtrada utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.	103
Figura 5.51 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen filtrada utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.	103
Figura 5.52 (a) Imagen marcada filtrada con filtro pasobajas Gaussiano de tamaño 5×5 y varianza $\sigma=1.2$. PSNR=24.4dB, SSIM=.7296. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.	104
Figura 5.53 PSNR de la imagen recortada contra porcentaje recortado de la imagen marcada.	105

Figura 5.54 SSIM de la imagen recortada contra porcentaje recortado de la imagen marcada.	105
Figura 5.55 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen recortada utilizando codificación convolucional con decisión dura.	106
Figura 5.56 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen recortada utilizando decisión suave en la decodificación.	106
Figura 5.57 (a) Imagen marcada recortada al 35% PSNR=8.9151dB, SSIM=.3755. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.	107

