



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**  
**DE TECNOLOGÍA DIGITAL**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN**  
**SISTEMAS DIGITALES**

**“TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR PARA**  
**TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE VIDEO”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**P R E S E N T A:**

**ABRIL FERNANDA GARCÍA RAMÍREZ**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:**

**DRA. MIREYA SARAÍ GARCÍA VÁZQUEZ**  
**DR. ALEJANDRO A. RAMÍREZ ACOSTA**

**JUNIO 2011**

**TIJUANA, B.C., MÉXICO**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Tijuana, B.C. siendo las 18:30 horas del día 13 del mes de JUNIO del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CITEDI para examinar la tesis titulada:

**TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR PARA TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE VIDEO.**

Presentada por el alumno:

**GARCÍA**  
Apellido paterno

**RAMÍREZ**  
Apellido materno

**ABRIL FERNANDA**  
Nombre(s)

Con registro: 

A	0	9	0	5	5	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DIGITALES**

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

  
\_\_\_\_\_  
DR. MIREYA SARA GARCÍA VÁZQUEZ

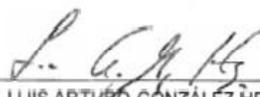
  
\_\_\_\_\_  
DR. ALEJANDRO ALVARO RAMÍREZ ACOSTA

  
\_\_\_\_\_  
DR. LUIS TOJAR AGUILAR BUSTOS

  
\_\_\_\_\_  
DR. JUAN JOSE TAPIA ARMENTA

  
\_\_\_\_\_  
DR. EDUARDO ASBUN VALDEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
\_\_\_\_\_  
DR. LUIS ARTURO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ



S. E. P.  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
DE TECNOLOGÍA DIGITAL  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Tijuana, Baja California el día 16 del mes de JUNIO del año 2011, el (la) que suscribe ABRIL FERNANDA GARCÍA RAMÍREZ alumno (a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DIGITALES con número de registro A090553, adscrito al CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA DIGITAL manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Mireya S. García y el Dr. Alejandro A. Ramírez y cede los derechos del trabajo intitulado TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR PARA TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE VIDEO, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección Av. del Parque No. 1310, Mesa de Otay, Tijuana, Baja California, México C.P. 22510. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
ABRIL F. GARCÍA RAMÍREZ

Nombre y firma

## AGRADECIMIENTOS

El primer pensamiento de gratitud que dedico por el esfuerzo durante este trayecto es a Dios a quien debo mi vida entera y que me ha cuidado siempre en la soledad y la tristeza, en mis alegrías y buenos momentos, sin su ayuda y bendición no me hubiese sido posible lograr nada.

A mis padres y mi hermana, quienes han sido mi principal motivación quienes han confiado plenamente en mí y que con su amor incondicional y comprensión han llenado mi vida y me han impulsado a seguir adelante a pesar de las dificultades.

A Judicaël quien siempre ha confiado en mí, que con su amor y apoyo moral ha estado conmigo en los momentos más duros en estos dos años de la maestría.

A mi familia aquí en Tijuana, mi tía Eugenia, mis primos Montserrat, Javier y Alfonso, y mi sobrinita Charllotte quienes con su cariño y comprensión me cuidaron en esta ciudad lejos de mis padres.

A mis directores de tesis la Dra. Mireya y el Dr. Alejandro, por su dirección y guía en esta investigación.

A los profesores de CITEDI, el Dr. Tapia quien me apoyó desde la entrada a este centro, al Dr. José Núñez por su amistad y consejos, al Dr. Víctor por sus consejos y apoyo entre tantos otros quienes en este camino me ayudaron.

A los compañeros de PDS Gustavo Vidal, Luis Zúñiga, Luis Miguel y Juan Colores, quienes con su amistad nos apoyamos con los que compartimos momentos buenos y a quienes les tengo un cariño fraterno.

Gracias a CONACYT por el apoyo financiero.

Finalmente gracias a este centro de posgrado CITEDI y a mi alma máter el Instituto Politécnico Nacional, mi noble escuela, a la que amo tanto y a la que le tengo tanta veneración, porque mi sangre es guinda y soy Politécnica por convicción, no por circunstancia.

# ÍNDICE

Lista de figuras.....	iii
Lista de tablas .....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 La transmisión de video en sistemas inalámbricos .....	2
1.2 Los errores en canales inalámbricos.....	3
1.3 ¿Por qué proteger la información? .....	4
1.4 Métricas para evaluar el desempeño de sistemas de transmisión.....	5
1.5 Objetivo de la investigación.....	6
1.5.1 Objetivos Específicos.....	6
1.6 Aportaciones del trabajo de tesis.....	7
1.7 Organización de la tesis.....	8
2 ESTÁNDAR DE COMPRESIÓN DE VIDEO H.264/AVC .....	9
2.2 Compresión de Video .....	10
2.2.1 Secuencias de video codificadas .....	11
2.3 Transmisión y almacenamiento de Video.....	15
2.3.1 Mecanismos de transmisión .....	16
3 RESISTENCIA A ERRORES EN H.264.....	18
3.1 Técnicas directivas.....	18
3.1.1 Partición de datos .....	19
3.1.2 FMO: Flexible Macroblock Ordering .....	19
3.1.3 Refrescar bloque Intra mediante control R-D .....	21
3.2 Técnicas de Cancelamiento de Errores .....	21
3.2.1 Cancelamiento Espacial de Errores.....	22
3.2.2 Cancelamiento Temporal de Errores.....	24
3.2.3 Cancelamiento Híbrido de Errores. (Espacio/temporal) .....	27
3.3 Técnicas interactivas de resistencia a errores .....	27
3.3.1 Codificación selectiva para cancelamiento de errores.....	28
3.3.2 Retransmisión sin espera .....	29
3.3.3 Retransmisión multicopia con aplicaciones para flujo priorizado de video sobre Internet .....	29
3.4 Conclusión .....	30
4 TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR ESPACIALES.....	31
4.1 Interpolación Direccional.....	32
4.1.1 Resultados de implantación para DI.....	37
4.1.2 Conclusión.....	46
4.2 Proyección sobre conjuntos convexos (POCS).....	47
4.2.1 Resultados de implantación.....	55
4.2.2 Conclusión.....	61
5 TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR TEMPORALES .....	62
5.1 BMA (Boundary Matching Algorithm).....	63

5.1.1 Resultados de implantación para BMA.....	66
5.1.2 Conclusión.....	92
5.2 DMVE (Decoder Motion Vector Estimation).....	92
5.2.1 Resultados de implantación para DMVE.....	93
5.2.2 Conclusión.....	99
Conclusión general.....	100
Productos obtenidos de esta investigación.....	101
Publicaciones:.....	101
Presentaciones:.....	102
REFERENCIAS.....	102

## Lista de figuras

Figura 1.1 Arquitectura simplificada general de un sistema de comunicación. ....	(1)
Figura 2.1 Área de aplicación de la estandarización. ....	(9)
Figura 2.2. Cuadros Progresivo y Entrelazado y Campos. ....	(11)
Figura 2.3. Subdivisión de una imagen en macrobloques. ....	(12)
Figura 2.4. Subdivisión de una imagen en tiras (slices) cuando no se usa FMO. ....	(12)
Figura 2.5. Subdivisión de un cuadro QCIF en tiras usando FMO. ....	(13)
Figura 2.6 Segmentaciones de macrobloques por compensación de movimiento. Arriba: segmentación de macrobloques. Abajo: segmentación de particiones de 8x8. ....	(14)
Figura 2.7 Ejemplo de secuencia de elementos RSPB. ....	(15)
Figura 3.1. Patrones FMO. (a): En forma de Tablero de ajedrez (disperso). (b): Intercalado. ....	(20)
Figura 3.2. Ilustración de restricciones de suavidad espacial. ....	(23)
Figura 3.3. Ilustración de la predicción temporal por compensación de movimiento. ....	(25)
Figura 4.1. Porción compuesta de la imagen con el macrobloque perdido y las vecindades de pixeles adyacentes. ....	(33)
Figura 4.2. Detección de bordes (a) esquema del clasificador de bordes y (b) las ocho categorías de bordes direccionales. ....	(34)
Figura 4.3. Consideraciones hechas para categoría direccional D0. ....	(36)
Figura 4.4. Consideraciones hechas para categoría direccional D4. ....	(36)
Figura 4.5. Opción de tamaño de Macro Bloque en el menú de la interfaz gráfica en Matlab para cancelamiento de errores espaciales. ....	(38)
Figura 4.6. Opción de tipo de distribución de error en el menú de la interfaz gráfica en Matlab para cancelamiento de errores espaciales. ....	(38)
Figura 4.7. Imagen de Lena en formato TIFF. ....	(39)
Figura 4.8. Interfaz gráfica con la imagen de Lena con pérdidas. A la izquierda se muestra la opción en el menú para el tamaño de bloque (8x8). A la derecha la opción del tipo de error. ....	(39)
Figura 4.9. Imagen de Lena cancelada con DI. ....	(40)
Figura 4.10. Imagen de Lena (a) dañada (b) cancelada con DI. ....	(41)
Figura 4.11. Imagen de Foreman (a) sin errores (b) con MB de error de tamaño 8x8 con una distribución de error de tablero de ajedrez. ....	(41)
Figura 4.12. Imagen de Foreman cancelada con DI (a) interfaz gráfica (b) ampliada. ....	(42)
Figura 4.13. Imagen de Foreman (a) dañada (b) cancelada con DI. ....	(43)
Figura 4.14. Imagen de Stefan (a) sin errores (b) con MB de error de tamaño 8x8 con una distribución de error en forma de múltiples ráfagas. ....	(43)
Figura 4.15. Imagen de Stefan cancelada con DI (a) interfaz gráfica (b) ampliada. ....	(44)
Figura 4.16. Imagen de Lena cancelada con DI para errores de ráfagas. ....	(45)
Figura 4.17. Imagen de Foreman cancelada con DI para errores de ráfagas. ....	(45)
Figura 4.18. Imagen de Bridge-close cancelada con DI para errores de ráfagas. ....	(45)
Figura 4.19. Imagen de Stefan cancelada con DI para errores de ráfagas. ....	(46)
Figura 4.20. Diagrama a bloques del proceso de restauración iterativa de POCS adaptativo. ....	(47)
Figura 4.21. Representación de clasificación de tipos de áreas (a) monótona (b) de borde. ....	(48)
Figura 4.22. Ilustración de la señal espacial de las Proyecciones Sobre Conjuntos Convexos (POCS). ....	(50)
Figura 4.23. Filtro pasa bajas. ....	(52)
Figura 4.24. Filtro pasa banda. ....	(53)
Figura 4.25. Rectas consideradas para crear sistema de ecuaciones lineales en el plano de la imagen correspondiente al filtro pasa banda (en las ecuaciones se considera midpoint = origen = 0). ....	(53)
Figura 4.26. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área Monótona Clara, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados. ....	(56)
Figura 4.27. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 152 iteraciones. ....	(56)
Figura 4.28. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área monótona clara. ....	(57)

Figura 4.29. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área Monótona Oscura, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados. ....	(57)
Figura 4.30. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 100 iteraciones. ....	(58)
Figura 4.31. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área monótona oscura. ....	(58)
Figura 4.32. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área de Borde Sencillo, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados. ....	(59)
Figura 4.33. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 213 iteraciones. ....	(59)
Figura 4.34. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área de borde sencillo. ....	(59)
Figura 4.35. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área de Borde Compuesto, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados. ....	(60)
Figura 4.36. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 300 iteraciones. ....	(60)
Figura 4.37. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área de borde sencillo. ....	(61)
Figura 5.1. Cálculo de MAD usando información espacial entre cuadros (Actual y Previo). ....	(63)
Figura 5.2. MV de los bloques vecinos al bloque perdido para el cálculo de MAD. ....	(64)
Figura 5.3. Simulaciones de tres tipos de distribución de error (a) macrobloques distribuidos de manera uniforme (b) tablero de ajedrez (c) ráfagas. ....	(67)
Figura 5.4. Imagen decodificada de Foreman (a) sin errores (b) con distribución de error de tablero de ajedrez con MB's de tamaño 8x8. ....	(67)
Figura 5.5. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.4 (b). ....	(68)
Figura 5.6. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Foreman con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 8x8. ....	(69)
Figura 5.7. Imagen decodificada de Foreman (a) con distribución de error de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA. ....	(70)
Figura 5.8. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Foreman con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 16x16. ....	(71)
Figura 5.9. Imagen decodificada de Mobile (a) sin errores (b) con distribución de error uniforme con MB's de tamaño 8x8. ....	(71)
Figura 5.10. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.9 (b). ....	(72)
Figura 5.11. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Mobile con el tipo de MV usado para una distribución de error uniforme de tamaño de MB de 8x8. ....	(73)
Figura 5.12. Imagen decodificada de Bus (a) sin errores (b) con distribución de error uniforme con MB's de tamaño 8x8. ....	(74)
Figura 5.13. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.12 (b). ....	(74)
Figura 5.14. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 8x8. ....	(75)
Figura 5.15. Imagen decodificada de Bus (a) con distribución de error de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA. ....	(76)
Figura 5.16. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 16x16. ....	(77)
Figura 5.17. Imagen decodificada de Bus (a) sin errores (b) con distribución de error en forma de ráfagas con MB's de tamaño 8x8. ....	(77)
Figura 5.18. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.17 (b). ....	(78)
Figura 5.19. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error de ráfagas de tamaño de MB de 8x8. ....	(79)
Figura 5.20. Imagen decodificada de Bus (a) con distribución de error en forma de ráfagas en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA. ....	(79)
Figura 5.21. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error en forma de ráfagas de tamaño de MB de 16x16. ....	(80)
Figura 5.22. Imagen decodificada de Stefan (a) sin errores (b) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez con MB's de tamaño 8x8. ....	(81)

Figura 5.23. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.22 (b).	(82)
Figura 5.24. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Stefan con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 8x8.	(83)
Figura 5.25. Imagen decodificada de Stefan (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.	(83)
Figura 5.26. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Stefan con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 16x16.	(84)
Figura 5.27. Imagen decodificada de Stefan (a) sin errores (b) con distribución de error en forma de ráfagas con MB's de tamaño 8x8.	(85)
Figura 5.28. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.27 (b).	(85)
Figura 5.29. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Stefan con el tipo de MV usado para una distribución de error de ráfagas de tamaño de MB de 8x8.	(86)
Figura 5.30. Imagen decodificada de News (a) sin errores (b) con distribución de error en forma uniforme con MB's de tamaño 8x8.	(87)
Figura 5.31. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.30 (b).	(87)
Figura 5.32. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de News con el tipo de MV usado para una distribución de error uniforme de tamaño de MB de 8x8.	(88)
Figura 5.33. Imagen decodificada de News (a) con distribución de error en forma uniforme en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.	(89)
Figura 5.34. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de News con el tipo de MV usado para una distribución de error uniforme de tamaño de MB de 16x16.	(90)
Figura 5.35. Imagen decodificada de Bus (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con BMA con MV vecinos.	(91)
Figura 5.36. Imagen reconstruida con BMA usando solamente la mediana de MV's vecinos.	(91)
Figura 5.37. Cálculo de MAD con ancho variable de líneas de pixeles para DMVE.	(93)
Figura 5.38. Imagen decodificada de Foreman (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.	(94)
Figura 5.39. Imagen decodificada de Foreman (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.	(94)
Figura 5.40. Imagen decodificada de Mobile (a) con distribución de error en forma de ráfagas en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.	(95)
Figura 5.41. Imagen decodificada de Mobile (a) con distribución de error en forma de ráfagas en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.	(96)
Figura 5.42. Imagen decodificada de Stefan (a) con distribución de error en forma de uniforme en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.	(97)
Figura 5.43. Estadística de incidencia de MV aplicados en cada MB de error para la imagen cancelada en fig. 5.42 (b).	(97)
Figura 5.44. Imagen decodificada de News (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.	(98)
Figura 5.45. Estadística de incidencia de MV aplicados en cada MB de error para la imagen cancelada en fig. 5.44 (b).	(98)

## Lista de tablas

Tabla 1. Características de POCS (Projections Onto Convex Sets). .....	(23)
Tabla 2. Características de Interpolación espacial basada en DCT. ....	(23)
Tabla 3. Características de Reemplazo Temporal (TR). .....	(25)
Tabla 4. Características de BMA (Boundary Matching Algorithm). ....	(26)
Tabla 5. División y características de las tres principales vertientes de técnicas de resistencia al error. ....	(29)

# **Técnicas de cancelamiento de error para transmisión inalámbrica de video**

## **Resumen**

La presente investigación está orientada al análisis y optimización de algunos métodos de cancelamiento de error usados para restaurar o minimizar los daños en la señal de video que se transmite a través de medios inalámbricos. Para ello, existen diferentes enfoques para proteger el sistema de transmisión de video, algunos de estos son aplicados en la parte de entrada, otros en la parte de la recepción y algunos otros enfoques utilizan una cooperación entre el transmisor y el receptor de la señal para garantizar la información del video. En el flujo de video previamente comprimido, la información que viaja a través del canal de transmisión es vulnerable a sufrir pérdidas por lo que al recibir la señal de video existe una alta probabilidad de que ésta sea degradada incluso teniendo los óptimos mecanismos para proteger de los errores al sistema. Por lo tanto, del lado del receptor llegará una señal con pérdidas lo que resultará en una señal de video con una pobre calidad visual. Es importante señalar que la información dentro de un video se compone de varias imágenes tomadas en fracciones de segundo. Esta información es clasificada por sus componentes espaciales (dentro de una imagen) y temporales (dentro de la secuencia de video) para favorecer la recuperación de los datos perdidos en la transmisión. En esta investigación se implantaron cuatro técnicas de cancelamiento de error, de las cuales dos son técnicas espaciales que se aplican sobre una sola imagen, otras dos temporales (utilizan una imagen anterior de la secuencia de video). La aportación de este trabajo consiste primero en las optimizaciones hechas a una técnica espacial, con una mejora visual respecto al algoritmo original que fue creado para errores de bloques aislados. También se realizaron optimizaciones para las técnicas temporales en la búsqueda de información de movimiento disponible, con lo que se obtuvieron mejoras en la reconstrucción visual.

Palabras clave: Transmisión inalámbrica de video, resistencia a errores, cancelamiento del error, PSNR.

## **Error concealment for wireless video transmission**

### **Abstract**

This research focuses on restoring or minimizing damage when the video signal has been transmitted through wireless environments. There are many different approaches to protect video transmission system, some of these are applied at the transmitter, others at the receiver and some other approaches use a cooperation between transmitter and receiver signal to ensure the video information. In the pre-compressed video stream, the information traveling through the transmission channel is vulnerable to losses as to receive the video signal there is a high probability that it is degraded even with the best mechanisms to protect the system errors. Therefore, the information obtained at the receiver will result in a video signal with a poor visual quality. If in the transmitter exists the propagation of errors we should apply efficient algorithms and low computational complexity to restore the video signal which is delivered to end users. It is important to note that a video is composed of several images taken in a second. This information is classified by spatial components (within an image) and temporal (within the video sequence) to facilitate the recovery of data lost in transmission. In this research, four error concealment techniques were implemented, two are spatial techniques which are applied on a single image, other two are temporal techniques (using several images from a video sequence) and finally we propose an algorithm which extracts both spatial and temporal information for error concealment. Contribution of this work consists of optimizations made to a space technology, with a visual improvement on the original algorithm was developed for isolated block error. Optimizations were also made for temporal techniques in the search of available motion information, which were obtained improvements in visual reconstruction, although there is further work to develop to improve the objective quality (PSNR) and subjective (visual quality of the image ) of the reconstructed video signal.

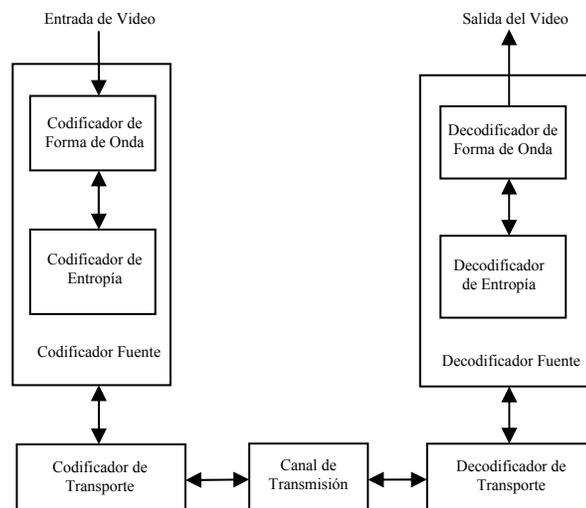
Keywords: Wireless video transmission, error resilience, error concealment, PSNR.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las nuevas tecnologías involucradas con las aplicaciones de video no conversacionales (difusión, almacenamiento ó streaming) y conversacionales (telefonía ó conferencias) [1] conllevan a desarrollar una investigación pertinente para que la transmisión y almacenamiento de la información sea confiable y para preservar la calidad de la misma. La señal de video crudo tiene una gran cantidad de datos que normalmente es de 1 Mb/s [2] lo que dificulta su transmisión por canales inalámbricos los cuales no soportan tal cantidad de información. Para transmitir estas señales es necesario reducir la cantidad de datos (bits), esto se logra por medio de técnicas de compresión de video.

Al reducir la cantidad de información con dichas técnicas, se pueden excluir ciertos datos, lo que puede resultar en la degradación de la señal de video, esto genera la disminución en la calidad de las imágenes en la secuencia de video. Cabe mencionar que esta investigación está enfocada a la transmisión de datos sobre canales inalámbricos. Dichos canales son característicamente ruidosos, esto quiere decir que son propensos a presentar interferencias de naturaleza diversa (en el aire o el vacío).

Además, es importante entender como se ha dado la evolución que ha tenido alrededor de las últimas dos décadas [1], [2], [3], [4], el desarrollo de las normatividades que regulan la transmisión de las señales de video y que en este trabajo de investigación se aborda.



**Figura 1.1. Arquitectura simplificada general de un sistema de comunicación.**

En la figura 1.1 se muestra la arquitectura general de un sistema de comunicación, con el fin de mostrar las partes principales que integran al mismo, ya que en el resto del trabajo se hará referencia a la parte del sistema en que se enfoca esta investigación. Primero se encuentra el codificador a la entrada del sistema, seguido del canal de transmisión y finalmente está el decodificador donde se obtiene la salida de la señal.

A continuación se describirá brevemente la función de las partes que componen estos tipos de sistemas. La señal de video de entrada, va al codificador [2]. El flujo de bits generado en el codificador fuente pasa al codificador de transporte; en el codificador fuente tenemos varios mecanismos para comprimir la señal de entrada. Una vez que el flujo de bits comprimido ha viajado a través del canal de transmisión, llega al decodificador, que está conformado por el decodificador de transporte y el decodificador fuente, esta información llega primero al decodificador de transporte para desempaquetar la información, luego de-modularla con su respectivo protocolo de transporte como en el codificador de transporte. Después esa información a la salida del decodificador de transporte pasa al decodificador fuente, donde tal flujo de bits se decodifica entrópicamente para extraer los signos codificados producto de la codificación de longitud variable o aritmética que son revertidos, luego se obtiene la señal con los coeficientes de la transformada, para finalmente re-escalar la imagen y obtener la señal de video reconstruida para el despliegue.

## **1.1 La transmisión de video en sistemas inalámbricos**

Al utilizar datos de video se hace necesario consecuentemente transmitirlos para la difusión de los mismos con distintos fines de uso, en la figura 1.1 se mostró que un sistema general de transmisión cuenta con un canal de transporte entre el transmisor y el receptor del mismo. Existen diversos tipos de canales transmitir el flujo de video y puede darse en diferentes medios como se menciona a continuación.

Como se mencionó anteriormente, existen distintas áreas de aplicación para los datos de video codificado [1], según lo marca el actual estándar de codificación de video H.264/AVC en el que se basa este trabajo de tesis, que son las siguientes:

- Difusión por cable, satélite, cable módem, DSL, terrestre, etc.

- Almacenamiento serie o interactivo en dispositivos ópticos ó magnéticos, DVD, etc.
- Servicios conversacionales sobre ISDN, cable módem, DSL, LAN, DSL, redes móviles e inalámbricas, módems, etc. ó mezclas de éstas.
- Video por demanda ó servicios streaming multimedia sobre ISDN, cable módem, DSL, LAN, redes inalámbricas, etc.

En el caso de los servicios de mensajería multimedia (MMS), sobre ISDN, DSL, Ethernet, LAN, redes móviles e inalámbricas, etc., solo se van a mencionar estas áreas de aplicación sin explicar a detalle, porque en la presente investigación se aborda únicamente, la transmisión del video a través de canales inalámbricos. Por ejemplo, para los servicios de telefonía móvil de tercera generación (3G) [5], también se ha hecho posible la transmisión de video en ambientes inalámbricos que soportan las actuales estandarizaciones con el H.264/AVC. En el caso de la transmisión de video por canales inalámbricos se debe prestar especial atención en las características de dichos canales pues un problema característico en cualquier sistema de comunicaciones según Wang [2], es que la información puede ser modificada o dañada durante la transmisión independientemente del canal de transmisión usado debido al ruido del canal.

## **1.2 Los errores en canales inalámbricos**

En los sistemas de comunicación la información que se maneja puede sufrir alteraciones o pérdidas, para el caso particular de este estudio del medio inalámbrico el cual es característicamente ruidoso [1], [6], [7], [8] trayendo como consecuencia degradaciones de canal como pueden ser, los errores llamados de bits y de ráfagas.

Estos errores pueden producir daños severos al momento de recibir la señal de video, los errores pueden ser producidos por imperfecciones físicas del canal de transmisión, por ejemplo, la pérdida de datos puede ocurrir debido a una desincronización en la información si está organizada en paquetes. Es así que se pueden perder cantidades de datos conforme a la organización de la información, la pérdida de un dato muy pequeño (un solo bit de la cabecera de un paquete) puede ocasionar la pérdida de todo un paquete de datos o de varios paquetes.

Dependiendo del método de codificación y del contenido de información afectado, el impacto de los errores de bits aleatorios puede ir desde insignificante hasta visiblemente desagradable. A continuación se discutirá la importancia del proteger la señal de video de estos errores que degradan dicha señal.

### **1.3 ¿Por qué proteger la información?**

Como se ha mencionado con anterioridad al codificar la información de video y transmitirla a través de canales inalámbricos el resultado de dichos procesos puede ocasionar la pérdida de la información a consecuencia de la presencia de errores que ocasionan algún tipo de distorsiones visuales evidentes, como imágenes borrosas, efectos de bloques (blocking) en la secuencia de video, pérdida de tiras completas de pixeles que naturalmente afectan la calidad visual de las secuencias de video, estos daños en una secuencia de video deben ser eliminados de alguna forma o controlados antes de su propagación. Con el propósito de detener la propagación de errores que afecten la señal de video codificada se han creado distintos enfoques de resistencia a errores, una clasificación que se ha dado para agrupar este tipo de técnicas es aquella que depende del lugar dentro del sistema de comunicación [2] existen los enfoques directivos que se encuentra ubicados en la parte del decodificador y cuya prioridad es la de hacer al sistema más robusto asegurando la señal transmitida, los enfoques de post-procesamiento (cancelamiento) que son aplicados en la parte del decodificador y que se encargan de minimizar las distorsiones o pérdidas que llegan al decodificador, finalmente se encuentran los enfoques interactivos los cuales mediante una cooperación entre el codificador y el decodificador realizan la recuperación de la señal dañada ó perdida, más adelante se explicará (capítulo 3) cada uno de estos enfoques y algunas de las técnicas propias de cada uno de ellos.

Debido a que el sistema visual humano (HVS: Human Visual System) es demasiado sensible a la intensidad luminosa, los sistemas de comunicación de video deben ser más robustos a los errores, es por ello con las técnicas aplicadas en el codificador se previene la propagación de los errores y también los errores provocados por la transmisión y en el decodificador se aplican técnicas que explotan las limitaciones de la vista humana.

## 1.4 Métricas para evaluar el desempeño de sistemas de transmisión

La calidad de los sistemas de transmisión de video puede ser evaluada a partir de un análisis subjetivo de las señales de video recibidas. Como el HVS: Human Visual System (Sistema Visual Humano), tiene limitaciones en cuanto a la percepción del espectro de la señal, se explota este hecho considerando la calidad de la percepción visual humana.

La evaluación de la calidad de las imágenes o de señales de video depende de varios factores tales como la apreciación visual del espectador (HVS), como se mencionó anteriormente y de la iluminación, o el enfoque de la cámara, entre otros, a este tipo de evaluación se le conoce como calidad subjetiva, pero además de esta evaluación existen otros parámetros los que se basan en las distorsiones entre imágenes, para este tipo de evaluaciones se considera una calidad de tipo objetiva. En el caso de la evaluación de la calidad visual con pruebas subjetivas, ya ha sido realizada la formalización de ellas con las recomendaciones de la ITU-R, alrededor del año 2002, con la ITU-T en el año de 1999 [9], [10] y con el ITU-R 500. Existen otro tipo de métricas de calidad (objetivas) que han sido ampliamente utilizadas, las cuales son clasificadas como “Métricas basadas en pixel”, entre las que se encuentran el Error Cuadrático Medio (MSE: Mean Squared Error) o el pico de radio señal a ruido (PSNR: Peak signal-to-noise ratio), por mencionar algunas.

Para el caso del cálculo del MSE, se tiene que es la media del cuadrado de las diferencias entre los valores de niveles de gris de los pixeles en dos imágenes o secuencias  $x_0$  y  $x_r$ :

$$MSE = \frac{1}{TMN} \sum_t \sum_m \sum_n [x_0(m, n, t) - x_r(m, n, t)]^2 \quad 1.1$$

para aquellas imágenes de tamaño  $M \times N$  y  $T$  cuadros en la secuencia. La raíz cuadrada del error cuadrático medio de las imágenes RMSE (Root Mean Squared Error), se calcula de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad 1.2$$

El PSNR es una medida dada en escala logarítmica y depende del Error Cuadrático Medio (el MSE citado anteriormente) entre una imagen original y la imagen dañada, relativo a  $(2^n - 1)$  (el cuadrado del valor de la señal más alto posible en la imagen, donde  $n$  es el número de bits por muestra en la imagen), dado en decibeles y está definido como:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \quad 1.3$$

El PSNR tiene ciertas ventajas como, el que puede ser calculado de manera fácil y rápida, y además es una de las medidas de calidad más usadas, por ser ampliamente utilizada para comparar la calidad de imágenes de video compresas y de-compresas [2].

Sin embargo, el PSNR presenta algunas desventajas, primero se requiere de una imagen original sin errores para la comparación lo que en algunas de las ocasiones puede no ser posible, además que la imagen original no garantiza que esta tenga una fidelidad adecuada. Otro problema con la evaluación del PSNR es que no tiene una buena correlación con las métricas subjetivas, ya que un alto PSNR indica que la calidad de la imagen es alta, y por el contrario un valor de PSNR bajo indica mala calidad de la imagen, pero al comparar el valor de PSNR con la imagen puede ser que esto no concuerde.

## 1.5 Objetivo de la investigación

Diseñar un nuevo algoritmo de cancelamiento de error para transmisión de video en dispositivos móviles

### 1.5.1 Objetivos Específicos

- Analizar diversos enfoques de resistencia a errores, directivos, de post-procesamiento e interactivos.
- Comparar los diversos enfoques de resistencia a errores.
- Profundizar en el estudio de las técnicas de post-procesamiento (cancelamiento de errores).
- Analizar dos técnicas de cancelamiento espaciales.

- ❖ Interpolación Direccional (DI).
- ❖ Proyección sobre Conjuntos Convexos (POCS).
- Analizar dos técnicas de cancelamiento temporales
  - ❖ BMA (Boundary Matching Algorithm).
  - ❖ DMVE (Decoder Motion Vector Estimation).
- Proponer un algoritmo espacio-temporal de cancelamiento de error.

## 1.6 Aportaciones del trabajo de tesis

El desarrollo de este trabajo consiste primeramente en el estudio y análisis de los distintos enfoques de resistencia a los errores en sistemas de transmisión de video, una vez concluidos se eligieron los algoritmos adecuados para ser implantados, después de ser implantados algunos de los más representativos, se realizaron las pruebas necesarias para analizar los resultados obtenidos para finalmente concluir cuáles son las debilidades y fortalezas de dichas implementaciones. Para realizar los algoritmos de prueba, se utilizó MATLAB siendo la plataforma de prueba experimental para realizar la implantación de dichos algoritmos. Es importante mencionar que los errores que aparecen en las imágenes a las que se les aplica el cancelamiento de error, con las técnicas elegidas y desarrolladas en este trabajo de investigación también fueron simulados. Con el propósito de emular un ambiente lo más próximo a escenarios reales los errores mencionados anteriormente tienen distribuciones o configuraciones específicas que aparecen típicamente en la transmisión inalámbrica de señales de video. En las técnicas espaciales, se realizaron pruebas y mejoras en una de las técnicas de cancelamiento clásicas llamada DI (Directional Interpolation) que es una técnica orientada a restaurar errores sencillos, con macrobloques de error aislados, la reconstrucción visual obtenida con el algoritmo de DI modificado en este trabajo supera al algoritmo original ya que reconstruye una imagen con distintos tipos de errores, con pérdidas de macrobloques continuos. Para las técnicas temporales se realizó la simulación del proceso de estimación y compensación de movimiento que se dan en el codificador. Se implantaron dos técnicas temporales, de las cuales se realizaron algunas modificaciones de implantación propias, que permite una mejor selección de los datos de movimiento perdidos para la reconstrucción.

## **1.7 Organización de la tesis**

Este trabajo de investigación está dividido de la siguiente manera, el capítulo 1 trata acerca del ámbito de la transmisión del video, así como el porqué de la importancia de proteger las señales de video contra las distorsiones que degradan la señal y describe brevemente el trabajo así como los objetivos de esta investigación y sus aportaciones. El capítulo 2 abarca la parte del estándar para compresión de video H.264, sus principales características y funcionalidades, orientado a la organización y transmisión de señales de video. Enseguida se presenta el capítulo 3, en el cual se habla de los tipos de enfoques de resistencia a errores clasificados de acuerdo al lugar dentro del sistema de transmisión de video en donde trabajan. En el capítulo 4 se detallan algunas de las técnicas de cancelamiento de errores existentes que se aplican en el lado del decodificador de tipo espaciales que fueron aplicadas, así como los resultados que se obtuvieron de dichas pruebas, dentro del capítulo 5 se explican otro tipo de técnicas de cancelamiento de error conocidas como temporales, las cuales utilizan la información de cuadros consecutivos de la señal de video, para realizar el cancelamiento de errores. Finalmente se dan las conclusiones generalizadas del trabajo de tesis, y las perspectivas futuras para desarrollar acerca del mismo, así como los productos obtenidos y las referencias bibliográficas.

## 2 ESTÁNDAR DE COMPRESIÓN DE VIDEO H.264/AVC

El VCEG y MPEG crearon el Equipo de Video Conjunto (JVT: Joint Video Team), donde surgió la propuesta del estándar de codificación de video H.264 ISO/IEC [11].

El estándar H.264 ISO/IEC define el proceso de decodificación de manera que cualquier decodificador que trabaje bajo el estándar produzca la misma salida dado un flujo codificado de bits. En este capítulo se describe la organización de una secuencia de video en base al último estándar, definiendo en la siguiente sección la estructura básica, luego se describe el proceso de codificación de la señal de video, y finalmente los mecanismos para transmitir dicha señal.

### 2.1 Estructura de capas del estándar H.264

El estándar H.264 se compone principalmente de dos capas estas son: la Capa de Abstracción de Red (NAL: *Network Abstraction Layer*) y la Capa de Codificación de Video (VCL: *Video Coding Layer*) (ver fig. 2.1). La capa NAL tiene como propósito primordial la “compatibilidad de red” [12], es decir abstrae los datos para hacer compatible al flujo de bits de salida del codificador con casi todos los canales de comunicación o medios de almacenamiento.

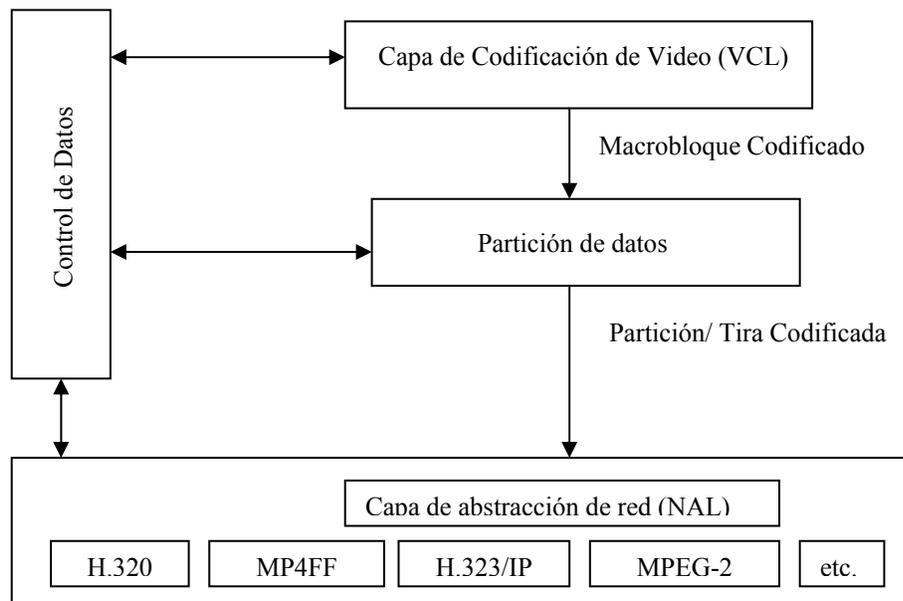


Figura 2.1. Área de aplicación de la estandarización

Esta unidad de red, especifica los datos en un formato de bytes (*byte-stream*) o de paquetes. El formato de bytes define patrones de bytes o de bits utilizados en el estándar H.320 o en el MPEG-2. Y el formato de paquetes, define paquetes de datos identificables por protocolos de transporte para aplicaciones de RTP/UDP/IP [13]. Los datos de video codificado son organizados en unidades NAL, cada una de las cuales es un paquete que contiene un número entero de bytes. El primer byte de cada unidad NAL es un byte de cabecera, que contiene una indicación del tipo de dato correspondiente en la unidad NAL y los bytes restantes contienen la carga útil del tipo indicado en la cabecera [11]. La VCL constituye el núcleo de los datos codificados y su diseño sigue el enfoque de codificación de video híbrido conocido como *basado en bloques*. Consiste en la secuencia de video a codificar, cuadros o campos dentro de la secuencia de video con tres arreglos de muestras (luminancia, crominancia o RGB), tiras dentro de cada cuadro y macrobloques dentro de cada tira (slice), así como bloques dentro de cada macrobloque [14].

## 2.2 Compresión de Video

Cuando hablamos de compresión de video (ó codificación de video) nos referimos a la compactación o condensación de una secuencia de video en una pequeña cantidad de bits. La compresión de datos se logra mediante la eliminación de información redundante que no afecta a la fidelidad de la reproducción del video [8]. Existen principalmente dos tipos de compresión, la compresión con pérdidas (lossy) y la compresión sin pérdidas (lossless), la primera comprime los datos con redundancia de tipo *estadística*, y la otra comprime datos con redundancia de tipo subjetiva, que son elementos de la secuencia de video que pueden ser removidos sin afectar significativamente la calidad visual desde la percepción del observador. Cuando se comprime la información de video principalmente se utilizan dos tipos de redundancia [9]:

- Redundancia espacio-temporal: Normalmente, los valores de los pixeles que están altamente correlacionados con sus vecinos, ya sea dentro del mismo cuadro de la imagen o a través de los cuadros de la secuencia de video.
- Redundancia psico-visual: El sistema visual humano no es sensitivo equitativamente para todos los patrones. Los algoritmos de compresión de este tipo descartan la información que no es visible para el observador (altas frecuencias).

### 2.2.1 Secuencias de video codificadas

Una secuencia de video codificada, en el estándar H.264/AVC, consiste en una secuencia de imágenes codificadas, una imagen codificada puede representar ya sea un *cuadro* completo o solo un *campo* [11], como fue para el caso de video MPEG-2 [15]. Por lo general, un cuadro de video se puede considerar que contiene dos campos intercalados, un campo superior y un campo inferior. Si los dos campos del cuadro fueron capturados en diferentes instantes de tiempo, el cuadro es considerado como un *cuadro entrelazado*, en caso contrario es considerado como un *cuadro progresivo*, como ilustra la figura 2.2. Estos tienen a su vez un “número de cuadro”, que es señalado en el flujo de bits, el cual no necesariamente está asociado al orden de decodificación y cada campo codificado de un cuadro entrelazado o progresivo tiene un “contador de orden de imagen”, el cual define el orden de decodificación de los campos.

La primera imagen de la secuencia de video es codificada en modo Intra, esta imagen puede ser decodificada sin decodificar ninguna otra imagen previa. Las imágenes codificadas previamente (imágenes de referencia) pueden ser usadas para predicción *Inter* de imágenes codificadas adicionales. Las imágenes de referencia se organizan dentro de una o dos listas (conjunto de números correspondientes e imágenes de diferencia), descritas como lista 0 y lista 1.

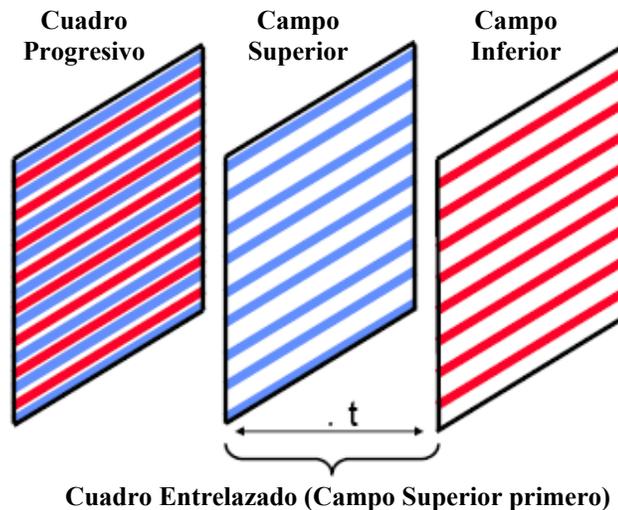
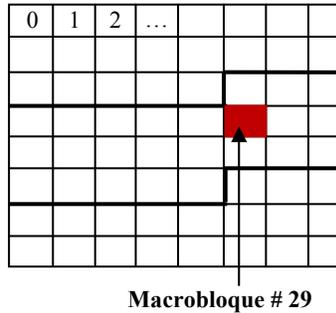


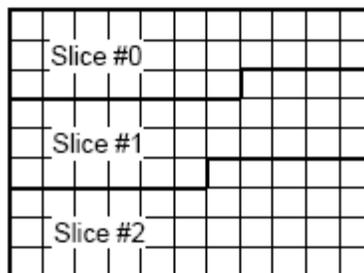
Figura 2.2. Cuadros Progresivo y Entrelazado y Campos (imagen tomada de [2]).

Una imagen codificada consiste en un número de macrobloques (MB) (fig. 2.3), estos macrobloques contienen muestras de luminancia de 16x16 y dos muestras asociadas de crominancia (8x8 Cb y 8x8 Cr en el estándar actual).



**Figura 2.3 Subdivisión de una imagen en macrobloques.**

Dentro de una imagen de la secuencia de video, los macrobloques son organizados en tiras (slices), donde una tira es un conjunto de macrobloques en orden de recorrido de trama (raster scan), estos macrobloques se procesan en orden de recorrido de tramas (no necesariamente contiguos) cuando no se usa la codificación FMO, que se explica más adelante. La imagen puede ser dividida en varias tiras como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Subdivisión de una imagen en tiras (slices) cuando no se usa FMO (tomada de [2]).**

El ordenamiento Flexible de Macrobloques (FMO: Flexible Macroblock Ordering) modifica la manera en cómo se organizan las tiras y macrobloques dentro de una imagen, usando el concepto de “grupos de tiras”. Usando FMO, una imagen puede ser dividida en varios patrones (mapas) tales como tiras entrelazadas, distribución de macrobloques dispersos, uno ó más grupos de tiras “sobresalientes” y un grupo de tiras “sobrante”, o un mapeo de tipo “tablero de ajedrez”. En la figura 2.5 se ilustran los dos últimos ejemplos citados.

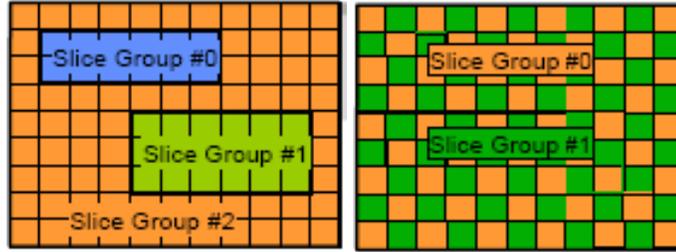
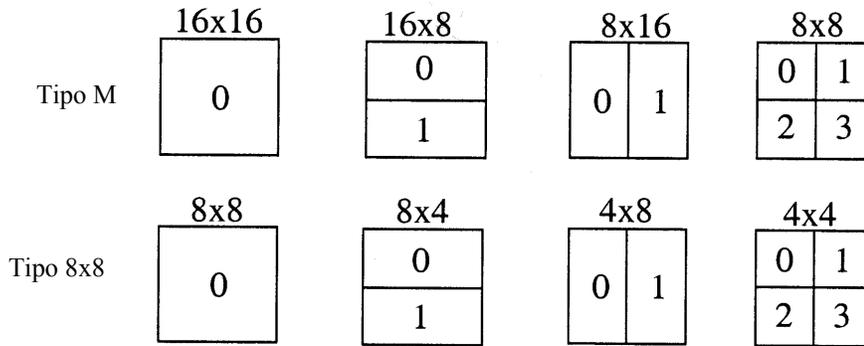


Figura 2.5 Subdivisión de un cuadro QCIF en tiras usando FMO (imagen tomada de [2]).

Una *tira I*, debe contener solo macrobloques tipo I (como se explicará más adelante), una *tira P* puede contener macrobloques P e I, una *tira B* puede contener macrobloques B e I. Los *macrobloques I* son predichos usando la predicción *Intra* a partir de muestras codificadas en la tira actual. Una predicción se forma ya sea para el macrobloque completo ó para cada muestra de luminancia de bloques de 4x4 (y asociados a muestras de crominancia) en el macrobloque. Los *macrobloques P* son predichos usando predicción *Inter* a partir de la(s) imagen(es) de referencia. Un macrobloque codificado en modo inter puede ser dividido en particiones de macrobloques, es decir, bloques de tamaño 16x16, 16x8, 8x16 ó muestras de luminancia 8x8 (y sus muestras crominancia asociadas), como se observa en la figura 2.6. Si se eligen particiones de tamaño 8x8, cada sub-macrobloque puede ser dividido además en particiones de sub-macrobloques de tamaño 8x8, 8x4, 4x8 ó muestras luminancia de 4x4 (y sus muestras asociadas de crominancia). Cada partición de macrobloque puede ser predicha a partir de una imagen en lista 0. Si presenta, cada partición de sub-macrobloque en un sub-macrobloque se predice a partir de la misma imagen en la lista 0.

Los macrobloques B son predichos usando predicción *Inter* a partir de la(s) imagen(es) de referencia. Cada partición de macrobloque puede ser predicho a partir de una o dos imágenes de referencia, una imagen en lista 0, y/o una imagen en lista 1. Si presenta cada partición de sub-macrobloque en un sub-macrobloque se predice a partir de una o dos imágenes de referencia, una imagen en lista 0 y/o una imagen en lista 1.



**Figura 2.6. Segmentaciones de macrobloques por compensación de movimiento. Arriba: segmentación de macrobloques. Abajo: segmentación de particiones de 8x8 (tomada de [2]).**

Después de la predicción Inter cuadro, o predicción espacial basada en las muestras de cuadros previamente decodificados con respecto al cuadro actual (bajo predicción), el residuo o predicción resultante se divide en bloques de 4x4 u 8x8 muestras, los cuales se convierten al dominio de la frecuencia y los coeficientes resultantes se cuantifican ya que el estándar H.264 se basa en la codificación de macrobloques y utiliza transformadas para remover la redundancia espacial [16]. Los cuadros de entrada al codificador, así como los residuos, resultado de la predicción, contienen una correlación o redundancia espacial alta.

La transformada utilizada es de tamaño adaptivo de 4x4 y de 8x8; los estándares anteriores utilizaban únicamente la transformada DCT de 8x8. Una transformada de 4x4 es mucho menos compleja, ya que necesita menos multiplicaciones para llevar a cabo una transformación. También, si el codificador decide procesar un bloque de menor tamaño, las distorsiones en los bordes del mismo bloque se reducen significativamente.

Para mejorar la eficiencia de la compresión, el H.264 emplea una estructura de transformación jerárquica, esto es, los coeficientes de DC de bloques vecinos de 4x4 de luminancia se agrupan en bloques de 4x4 y se aplica de nuevo la transformada Hadamard [17].

Existe una alta correlación entre coeficientes transformados de DC de bloques vecinos, cuyas muestras son muy similares. Por lo tanto, el estándar especifica la transformada Hadamard para los coeficientes de DC de bloques transformados de luma de 16x16, y la transformada Hadamard de 2x2 para los coeficientes de DC de bloques transformados de crominancia.

En estándares anteriores (MPEG-1, 2, 4, H.261 y H.263), la codificación de la entropía se basa en tablas previamente definidas, las cuales contienen los códigos de longitud variable (VLCs, *variable length code*) [18], donde el conjunto de palabras de código en las tablas se basa en distribuciones de probabilidad de datos obtenidos en secuencias de video genérico, en lugar de utilizar la codificación Huffman o aritmética exacta para la codificar la secuencia en cuestión.

El estándar H.264/AVC utiliza diferentes VLCs a fin de igualar el símbolo que representa un dato de video, con un código basado en las características del contexto en el que se encuentra el símbolo. Todos los elementos de la sintaxis se codifican utilizando el código Exp-Golomb, excepto los datos residuales [19]. A fin de leer los datos residuales (coeficientes transformados y cuantizados) se utiliza una búsqueda en zigzag o una búsqueda alternada (campos de cuadros de video no entrelazados). Para codificar los datos residuales, se utiliza un método más sofisticado llamado código de longitud variable adaptivo basado en el contexto (CAVLC, Context Based Adaptive Variable Length Code). También se utiliza otro método llamado CABAC, pero es más complejo que el CAVLC [17].

### 2.3 Transmisión y almacenamiento de Video

Como se explicó en la sección 2.2 una secuencia de video codificada consiste en un grupo de imágenes, pero para ser más explícitos, consiste en una serie de unidades NAL, cada una de las cuáles contiene una serie de elementos RSPB tal como se describe en [8]. En la figura 2.7 se muestra una secuencia típica de unidades RSPB que se transmiten por separado en una unidad NAL.

Conjunto de parámetros de secuencia	SEI	Tira I	Delimitador de imagen	Tira P	Tira P
-------------------------------------	-----	--------	-----------------------	--------	--------

**Figura 2.7 Ejemplo de secuencia de elementos RSPB.**

Para organizar la información de la secuencia de video el estándar H.264 maneja el concepto de *conjunto de parámetros* que contiene la información necesaria de la secuencia de video y las imágenes que la conforman para poder ser almacenada y

transmitida. Existen dos tipos de conjuntos de parámetros, el *conjunto de parámetros de secuencia* y el *conjunto de parámetros de imagen*. Un conjunto de parámetros de secuencia es aquel que contiene los datos de una secuencia completa (conjunto de imágenes codificadas consecutivas) a la que serán aplicados. Estos parámetros incluyen, un identificador de secuencia (`seq_parameter_set_id`), los límites en los números de cuadro y un contador de orden de la imagen, el número de cuadros de referencia que pueden ser usados para la decodificación, el alto y ancho de la imagen decodificada y la elección del tipo de codificación progresivo o entrelazado (cuadro ó cuadro/campo).

Por otra parte el conjunto de parámetros de imagen incluye parámetros como un identificador (`pic_parameter_set_id`), un `seq_parameter_set_id` seleccionado, una bandera para seleccionar la codificación de entropía VLC ó CABAC, el número de grupos de tiras en uso (y una definición del tipo de mapa o distribución de grupo de tira), el número de referencia de las imágenes en la lista 0 y 1 que pueden ser usadas para predicción, entre otros. Uno o más de estos conjuntos de parámetros (de secuencia e imagen) se envían al decodificador antes de decodificar las cabeceras de las tiras o los datos de las tiras. De esta forma es como se pueden habilitar el envío de cuadros ó tiras de una imagen, accediendo a los parámetros correspondientes al conjunto de secuencia o de imagen respectivamente. En la siguiente sección se aborda directamente la transmisión de la secuencia de video y las especificaciones en base al estándar.

Para transmitir la señal de video codificado se requiere no solo transmitir o almacenar puramente el video ya que dentro del sistema de comunicación los datos que se envían son de diferentes tipos, como audio, video e información relacionada, es decir, involucra el manejo de diversa información multimedia. Existen distintas opciones para combinar (multiplexación) el transporte y almacenamiento de datos multimedia pero a la fecha no se ha encontrado una solución única para todos los escenarios de aplicación.

### **2.3.1 Mecanismos de transmisión**

El método de transmisión de las unidades NAL no se especifica en el estándar, es decir que no se define un mecanismo de transmisión obligatorio, pero es importante hacer la diferencia entre lo que son los mecanismos de transmisión basados en paquetes (redes de paquetes) y la transmisión de un flujo de datos continuo (canales de circuitos

conmutados). Para la transmisión en redes basadas en paquetes, cada unidad NAL debe ser transportada en paquetes separados y organizada en la secuencia correcta antes de ser decodificada. En los canales de transporte de circuitos conmutados, un prefijo de código de inicio (código delimitador identificable único) es colocado antes de cada unidad NAL para hacer un *byte stream* (flujo de byte) antes de la transmisión.

Tanto el estándar MPEG-4 como el H.264, ninguno de estos estándares han definido un mecanismo de transporte en específico para datos visuales codificados. Enseguida se mencionarán algunas de las posibles soluciones de transporte dependiendo del método de transmisión.

- *Sistemas MPEG-2*: En la parte 1 del estándar MPEG-2 se definen dos métodos de multiplexación de audio, video e información asociada, como se explica en [8].
- *Protocolo en Tiempo Real (RTP: Real Time Protocol)*: Es un protocolo de empaquetamiento, que puede ser usado en conjunto con UDP (User Datagram Protocol) para transporte de datos multimedia en tiempo real a través de redes que usan el Protocolo de Internet (IP).

También en MPEG-4 parte 6 se define una sesión de protocolo opcional, el Marco de Trabajo para Integración de Multimedia de Entrega (Delivery Multimedia Integration Framework), que maneja la gestión de sesiones de flujos de datos MPEG-4 (visuales y de audio), para una amplia variedad de protocolos de transporte de red.

### 3 RESISTENCIA A ERRORES EN H.264

El problema para los sistemas de transmisión inalámbrica del video es que dada la naturaleza del canal que añade ruido a la señal de video, se generan degradaciones severas en esta como las que se menciona en [1] (errores de bits y errores de ráfagas debido al desvanecimiento y reflexiones múltiples), por lo que el flujo de bits codificados se hace vulnerable a los errores de transmisión, que además de generar la pérdida de datos también puede hacer que se pierda la sincronización total de algún paquete[8].

Dentro de la transmisión de señales de video, es importante el estudio de las degradaciones que afectan la señal de video transmitida, para crear ó mejorar los mecanismos de control y minimización de los errores de transmisión.

Para dividir los diferentes esquemas de resistencia y control de errores, se ha hecho una clasificación [2] de las diferentes técnicas existentes. En primer lugar tenemos las técnicas aplicadas en el codificador que tienen como objetivo prevenir al sistema de la pérdida de información para hacerlo robusto a los errores del canal, éstas son designadas como técnicas directivas (*Forward error concealment*) [3]. Otro tipo de técnicas son aquellas que trabajan del lado del decodificador y que son responsables de restaurar la señal que ha sido dañada, con la información disponible recibida correctamente, ya sea en una imagen fija o en varias de las imágenes dentro de la secuencia de video, este tipo de técnicas son conocidas como técnicas de post-procesamiento o de cancelamiento de errores (*error concealment by postprocessing*) [8] [20]. Finalmente se tienen aquellas técnicas que mediante un canal de retroalimentación envía al codificador una petición para enviar la información que fue detectada como errónea en el decodificador, estas técnicas son conocidas como técnicas interactivas (*interactive error concealment*) [2].

#### 3.1 Técnicas directivas

Estas técnicas están orientadas a trabajar en la parte del codificador, con el propósito de hacer más robusta la transmisión de datos de video y detener la propagación de errores en la misma. Los algoritmos utilizados en la codificación fuente como en los mecanismos de control y transporte son diseñados para evitar o minimizar los efectos de la transmisión y propagación de errores. Para el control clásico de errores, existen métodos

como FEC (Forward Error Correction) [21], que es un método para recuperación sin pérdidas [2], este método es adecuado para errores de tipo aleatorio pero inadecuado para errores de ráfagas [3]. Algunas técnicas añaden información redundante para proteger la información que es más importante, otras trabajan separando la información de manera que la pérdida de información no se propague al resto de la información. El estándar actual H.264/AVC, cuenta con herramientas de codificación para resistencia a errores, algunas de las técnicas directivas que se aplican en el codificador H.264 se explican.

### **3.1.1 Partición de datos**

Teniendo en consideración que algunos elementos de la sintaxis en el flujo de bits son más importantes que otros, la partición de datos habilita la protección desigual del error (UEP: Unequal Error Protection). Los datos de codificación de una tira (slice) son divididos en tres particiones (DP A, DP B, DP C) en base al estándar H.264/AVC [3], [8],

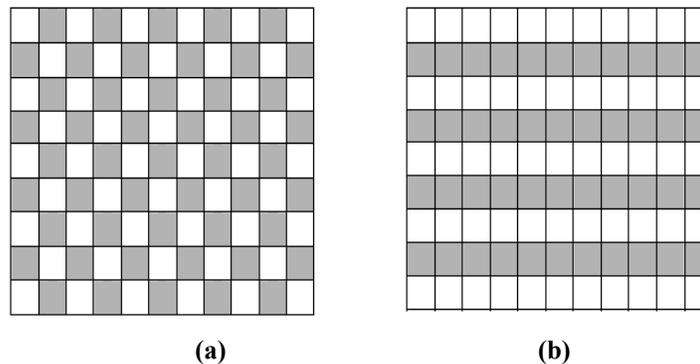
La partición A (DP A), contiene la información correspondiente a la cabecera de la tira y de los datos en cada macrobloque (MB), como el tipo de MB's, parámetros de cuantificación, e información de movimiento, que es la información más importante en comparación con el resto de información, si se pierde esta información los datos en DP A las otras dos particiones quedan inutilizables.

La partición de datos B ó DP B contiene los datos de codificación residuales (patrones de bloques codificados en modo Intra ó CPB's: Coded Block Patterns y los coeficientes de transformada de bloques Intra) para los macrobloques de las tiras I. Finalmente, en la partición C (DP C), tenemos los datos residuales de los MB's Inter (bloques P: predictivos y B: bidireccionales), esta partición es la menos importante en comparación con las otras dos antes mencionada. Sin embargo, es la partición de segmentos codificados más grande, así como el número más grande de cuadros que son codificados como cuadros P.

### **3.1.2 FMO: Flexible Macroblock Ordering**

Una de las herramientas de resistencia a errores que posee el codificador H.264/AVC es la de Ordenamiento Flexible de Macrobloques (FMO) que fue usado primero en

MPEG-2 con el Estructuramiento de Tiras (Slice Structure) [5] y se ha seguido usando en los estándares posteriores. Con FMO se tiene la posibilidad de dividir a la imagen en una o varias tiras y además de esto se pueden elegir en H.264/AVC diferentes estructuras para ordenar las tiras conocidas también como mapas de tiras, estas configuraciones (*slice group mapping*) han demostrado como se menciona en [12] que cada una de ellas puede ser útil en distintas aplicaciones. Este esquema agrupa inteligentemente los MB's dentro de una tira de un tamaño que es menor (o igual a) el tamaño de la unidad de transporte máximo (MTU: Maximum Transportation Unit) aquí la MTU [13] representa el tamaño más grande de un paquete que puede ser transportado a través de las redes sin ser dividido. Estas estrategias procuran evitar la propagación de errores desde un paquete corrupto a los paquetes subsecuentes. De esta forma las tiras pueden ser decodificadas independientemente, es decir, sin necesidad de los datos provenientes de otras tiras, ya que sus elementos de sintaxis pueden ser analizados a partir del mismo flujo de bits de las muestras (macrobloques) en el área de la imagen de esta tira. La figura 3.1 muestra dos modos de FMO en la forma de tablero de ajedrez e intercalado [22], [23] respectivamente, con dos tiras (slices) para un cuadro. Los bloques de cada color pertenecen a una tira distinta.



**Figura 3.1. Patrones FMO. (a): En forma de Tablero de ajedrez (disperso). (b): Intercalado**

El objetivo de FMO es dispersar los posibles errores del cuadro entero, lo más balanceadamente posible, para evitar la acumulación de errores en una región limitada, debido a que los MB's son organizados en distintas tiras.

### 3.1.3 Refrescar bloque Intra mediante control R-D

Una solución para el problema de la acumulación y propagación de error debido a la codificación predictiva, puede ser insertando periódicamente MB's codificados en modo Intra en el flujo de bits. Esta técnica es conocida como la Actualización Intra Adaptativa (AIR: Adaptive Intra Refresh) en MPEG-4. A diferencia de los estándares anteriores (por ejemplo en el MPEG-4, H.263) el estándar de codificación de video H.264 emplea un refrescamiento inteligente mediante el uso del control de la razón de distorsión R-D (rate-distortion) como se describe en [6-13], en donde una opción de codificación de bloque apropiada  $O^*$  será seleccionada la cuál minimiza la función de costo de Lagrange.

$$O^* = \arg \min(D(o) + \lambda R(o)) \quad 3.1$$

Donde  $O$ , es un modo de codificación de bloque (modo Inter/Intra y el tamaño del bloque) seleccionado a partir de un conjunto de los  $X$  modos de codificación como se definen en [25],  $D(o)$  es la distorsión insertada debido a la codificación con el modo  $O$ ,  $R(o)$  es la razón de codificación correspondiente, y  $\lambda$  es el parámetro de Lagrange para una ponderación adecuada de la razón  $R(o)$  y la distorsión  $D(o)$  se calcula mediante la Suma de la Diferencia Absoluta (SAD: Sum Absolute Difference) en modo de complejidad baja y por la Suma de la Diferencias Cuadradas (SSD: Sum of Square Difference) en modo de complejidad alta.

Para aplicaciones de video en tiempo real y conversacionales (de video conferencia), no es recomendable insertar cuadros I debido a una restricción que existe (bit-rate) y al retardo resultante. La importancia de este esquema reside en que ayuda a eliminar las distorsiones visuales causadas por los errores en la predicción Inter, sin embargo o resulta tan efectivo para los errores causados por la predicción Intra cuadro [3].

### 3.2 Técnicas de Cancelamiento de Errores

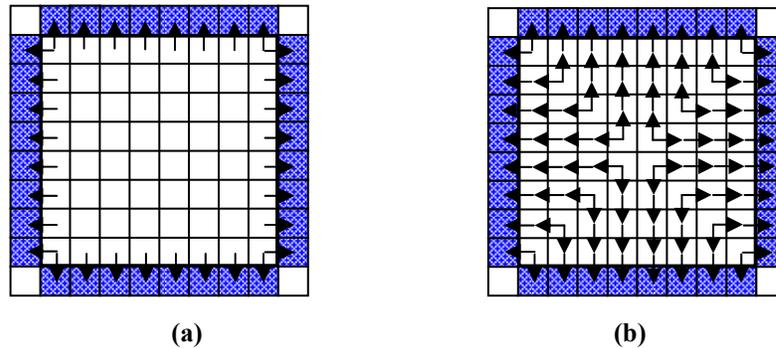
Debido a que la señal de video se codifica eliminando diversos tipos de redundancia en una sola imagen y/o en varias de las imágenes de la secuencia de video, estas similitudes (redundancia) son usadas para restaurar la señal dañada.

Las técnicas de cancelamiento de errores (EC) intentan recuperar las áreas dañadas, aprovechando al máximo las redundancias espaciales y/o temporales dentro de una imagen o la secuencia de video completa [26]. Pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de información disponible en tres categorías [26], [27], en primer lugar están las técnicas que aprovechan la alta correlación dentro de una imagen [28], generalmente estas técnicas son aplicadas a imágenes Intra codificadas y se conocen como técnicas espaciales, después se tienen las técnicas que explotan la alta correlación temporal [28], que son mayormente aplicadas a los cuadros Inter codificados dentro de la secuencia de video, se conocen como técnicas temporales y finalmente están las técnicas que utilizan ambos tipos de información, tanto espacial como temporal, estas son llamadas técnicas híbridas (espacio-temporales).

### **3.2.1 Cancelamiento Espacial de Errores**

las técnicas de cancelamiento de error espaciales frecuentemente utilizan interpolaciones lineales sencillas para restaurar el macrobloque perdido [30], [31], en el caso de querer recuperar la información de bordes en una imagen, para preservar dichos bordes en una imagen está el método de Interpolación Direccional [32] después Kwok y Sun proponen otro método con el mismo enfoque para seguimiento de bordes con una Interpolación Multi-Direccional [33] y también proponen una técnica iterativa usando la Proyección sobre Conjuntos Convexos (POCS) [34].

También está una técnica espacial que aprovecha las características de homogeneidad de una imagen es la de Recuperación de Máxima Suavidad [35] un esquema de dicha técnica se muestra en la figura 3.2, las referencias [36], [37], recuperan los coeficientes perdidos de la Transformada Discreta de Coseno (DCT), estas técnicas a diferencia de las anteriores trabajan en el dominio de la frecuencia (espectral), Tsekeridou y Pitas proponen el cancelamiento de errores “split-match” basado en los principios de acoplamiento de bloques (block-matching) en imágenes I [26], Salama y Shirani utilizan un enfoque probabilístico con estimación Máximo a Posteriori con [38], [39], el cancelamiento de error secuencial [40], [41] es propuesto por Li y Orchard, otro algoritmo de cancelamiento de error es la Extrapolación de Frecuencia Selectiva (FSE), que fue presentado con su sistema en [42].



**Figura 3.2. Ilustración de restricciones de suavidad espacial. Una flecha entre dos pixeles es incluida en la medida de suavidad. La medida ilustrada en (a), es apropiada cuando únicamente los coeficientes DC se han perdido, mientras en (b), es más efectivo cuando los coeficientes DC y varios de los coeficientes de baja frecuencia han sido perdidos.**

En la tabla 1 y 2 se explican algunas características de dos técnicas espaciales, que describen algunos aspectos de su funcionamiento, primero está la técnica de POCS, la técnica de POCS es elegida por ser una técnica clásica que tiene como propósito preservar los bordes, se muestran sus características principales, algunas ventajas y sus desventajas y del mismo modo se mencionan estos puntos en la tabla 2 para la técnica de Interpolación espacial basada en DCT, ambas técnicas trabajan en el dominio frecuencial.

Tabla 1. Características de POCS (Projections Onto Convex Sets)

Características	Desventajas
Utiliza información espacial de los MB's vecinos adyacentes [24]	Es una técnica iterativa que requiere alta complejidad de implementación
Utiliza el operador Sobel para detectar la presencia de bordes en el área de la imagen compuesta que contiene al MB perdido y sus MB's colindantes	No puede utilizar información temporal en cuadros Intra (MB's Intra codificados), a menos que use compensación de movimiento (para MB's Inter codificados) para inicializar el cálculo
Técnica que aprovecha las propiedades de homogeneidad ( suavidad) en una imagen, para recuperar la información perdida	Si existen dos o más bordes (bordes compuestos) en el área del MB perdido el algoritmo solo reconstruye el borde con mayor presencia.
Aplicable a bloques Intra e imágenes fijas	Se pueden presentar en los resultados de reconstrucción borrosos, si la información perdida dentro del MB no se prolonga al área de los MB's vecinos.
También puede utilizar bloques inter codificados.	

Tabla 2. Características de Interpolación espacial basada en DCT

Características	Desventajas
Técnica aplicada en el dominio de la frecuencia. Se tiene por objeto interpolar los coeficientes DCT perdidos de un bloque dañado,	Es un método que se limita únicamente a ser aplicado para imágenes fijas o bloques Intra-codificados
La interpolación es calculada mediante una medida dada por [2], con una minimización de diferencia espacial.	Para cuadros intercodificados no puede ser aplicado
En un método, en la localidad de un pixel este es interpolado a partir del valor de los coeficientes de los otros dos pixeles de sus límites cercanos [31]	Puede ser aplicado a valores de pixel originales no a valores de predicción
En otro, el valor de coeficiente DCT de un pixel en el macrobloque perdido es interpolado desde los valores de los coeficientes de los pixeles en los cuatro límites con los MB's vecinos adyacentes.	Pueden obtenerse imágenes borrosas si se realiza un cálculo erróneo [2]

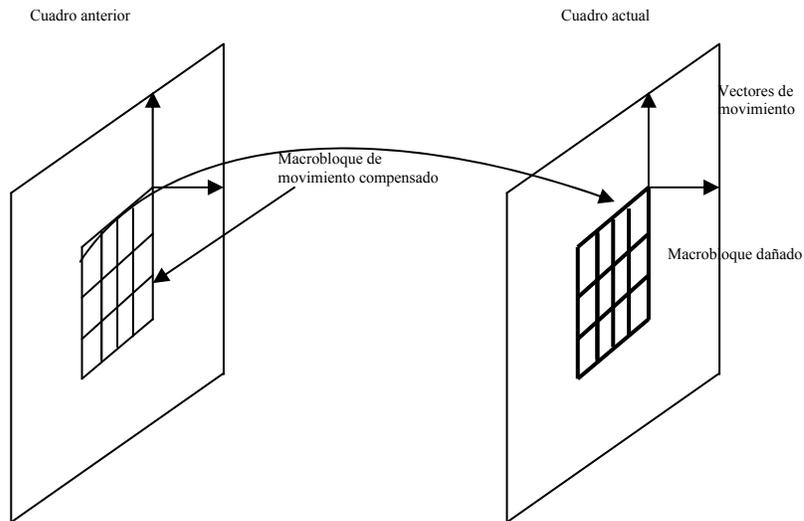
### 3.2.2 Cancelamiento Temporal de Errores

En una secuencia de video decodificada la mayoría de cuadros de imágenes contienen datos de predicción de movimiento (cuadros Inter codificados o cuadros P) [1], [12], por lo que es más probable que se den mayor número de pérdidas de este tipo de parámetros de información, las técnicas temporales aprovechan las dependencias temporales dentro de la señal de video [43], [44] ya que es mayor la correlación existente entre cuadros adyacentes de la imagen que la correlación espacial dentro de una imagen.

El “cancelamiento de error temporal” incluye dos etapas, primero la etapa de “estimación de movimiento”, seguida de la etapa de “compensación de movimiento” [44], Para realizar el cancelamiento de error, estas técnicas están basadas en encontrar el objeto u objetos perdidos en el área dañada de la imagen buscando dicha información en cuadros anteriores o en el cuadro de referencia.

La mayoría de estos esquemas trata de recuperar los MV perdidos en una imagen de la secuencia de video, la técnica más sencilla consiste en recuperar el MV en la misma posición de la imagen de referencia (cuadro anterior), dicha técnica es conocida como

Reemplazo Temporal, por sus siglas en inglés TR (Temporal Replacement) [32], [45], se ésta técnica se ejemplifica en la figura 3.3, es una buena técnica para ser aplicada en secuencias de video con áreas de poco movimiento (estacionarias y cuasi-estacionarias), pero no para las áreas de movimiento rápido [44].



**Figura 3.3. Ilustración de la predicción temporal por compensación de movimiento.**

Otros métodos temporales clásicos de recuperación de MV's, son el de Promedio de Vectores de Movimiento (AMV: Average Motion Vector) [46], y el de la Mediana de Vectores de Movimiento (MMV: Median Motion Vector) [47], estos métodos tienen como ventaja la característica de baja complejidad computacional, sin embargo una mala aproximación del cálculo del MV, trae como consecuencia distorsiones visuales muy notorias que degradan la calidad de la imagen reconstruida.

La técnica de BMA (Boundary Matching Algorithm) es una técnica que se ha adoptado en el software de referencia del estándar H.264, recupera los MV perdidos, con la elección de uno de los MV pertenecientes a un conjunto de MV candidatos establecidos en [48], dicho MV es el que minimiza una medida de distorsión dada por el valor del Promedio de la Diferencia Absoluta (MAD: Mean Absolute Difference).

El algoritmo de DMVE (Decoder Motion Vector Estimation) [49], tiene como objetivo calcular con precisión los MV perdidos utilizando una extensión de ancho variable de líneas de MB's. Esto significa que DMVE utiliza varias líneas de los bordes exteriores de píxeles (de uno a ocho) de los MB's perdidos en el cuadro actual y en el

cuadro de referencia anterior para calcular MAD, y elegir finalmente el MV que tenga el mínimo valor de distorsión de MAD de manera similar a como lo hace BMA.

En la tabla 3 y 4 se presentan las características de dos de las técnicas de cancelamiento temporales que han sido estudiadas y aplicadas en las investigaciones acerca del cancelamiento de error temporal [50 - 55] más representativas, en la tabla 3 se presenta la técnica de Reemplazo Temporal, dentro de sus características se mencionan algunas ventajas y también se muestran algunas desventajas. En la tabla 4 se muestra la técnica BMA con los mismos aspectos descritos para la tabla anterior.

Tabla 3. Características de Reemplazo Temporal (TR)

Características	Desventajas
El bloque perdido es reemplazado por el bloque ubicado en la misma posición en el cuadro anterior [32], [45]	Deja resultados catastróficos en escenas de mucho movimiento o de cambio de escena
Da resultados buenos en secuencias de poco o nulo movimiento	En la práctica es casi imposible tener información de los MV recibida correctamente
Requiere información de los MV, para la recuperación	Necesita información a priori del movimiento en la secuencia de video
Sencillo, poca complejidad de implementación	

Tabla 4. Características de BMA (Boundary Matching Algorithm)

Características	Desventajas
Técnica recomendada en H.264 no-normativa [48], [52]	Requiere información de movimiento para ser implementado
Se basa en la suposición de suavidad de las fronteras del MB (MacroBloque) perdido y sus MB vecinos	Tiene limitaciones debido a que solo trabaja para funciones horizontales y verticales
Elige un conjunto de 8 MV candidatos para calcular una diferencia de los límites del MB perdido y sus vecinos	Falla cuando un borde sobrepasa el límite del bloque [52]
Algunas técnicas derivadas, (OBMA [52] ó DMVE [49], EBMA [51])	Tiene mayor complejidad computacional

### **3.2.3 Cancelamiento Híbrido de Errores. (Espacio/temporal)**

Este tipo de técnicas explotan la correlación espacial y temporal [44] dentro de una imagen y en la secuencia de video completa, combinando los dos tipos de redundancias, algunos de estos algoritmos se aplican en base a medidas que determinan el tipo de actividad en la señal de video para determinar el tipo de cancelamiento [26], [56-61].

Existen técnicas que aplican cancelamiento espacial o temporal, se aplicará cancelamiento espacial en un primer momento si el cuadro de la secuencia de video es Intra (cuadro I) o cancelamiento temporal si es un cuadro Inter (cuadro P), para finalmente hacer un refinamiento espacial del resultado de la reconstrucción como en [56]. Jo y Kim [57], proponen estimar en primera instancia analizar el contenido de la información del MB o MB's perdidos, para decidir por medio de un umbral el tipo de cancelamiento inicial. Otro enfoque se basa en un método de cancelamiento temporal conocido como Interpolación de Campo de Movimiento (MFI: Motion Field Interpolation) propuesto inicialmente por Al-Mualla [58]. En esta técnica se hace un cancelamiento híbrido mejorando MFI a una técnica selectiva (SMFI), donde se propone utilizar en vez de cuatro MV de los MB's vecinos, solamente dos de ellos y después de ello analizar la medida de distorsión resultante entre los bordes del MB reconstruido, si se tiene un valor mayor a un umbral determinado se aplica una Interpolación Lineal, en caso contrario se deja tal reconstrucción, es decir, va a buscar otro MB perdido. La ventaja de estas técnicas es que pueden realizarse independientemente del tipo de información disponible, ya que tienen mayor flexibilidad en cuanto a si la información dañada pertenece a un cuadro Intra o Inter, si se dispone de información de movimiento o no.

### **3.3 Técnicas interactivas de resistencia a errores**

Las técnicas de resistencia a errores donde ocurre un diálogo entre el codificador y el decodificador, son conocidas como técnicas interactivas y para llevar a cabo esta comunicación entre codificador y decodificador se requiere que el sistema posea un canal de retroalimentación.

Dichas técnicas pueden ser aplicadas ya sea en la parte de la codificación fuente, ó en el nivel de transporte [2], [11], [12]. En el lado del codificador fuente, los parámetros de

codificación pueden adaptarse basados en la información que le brinda el decodificador. Por otra parte, a nivel de transporte, la información de retroalimentación se puede emplear para cambiar el porcentaje del ancho de banda total utilizado para FEC o para la retransmisión. En este contexto, es necesario que el codificador sepa cuando un paquete de información fue correctamente recibido o con errores.

### **3.3.1 Codificación selectiva para cancelamiento de errores**

La característica principal en este esquema de recuperación, es que siempre que el decodificador encuentra un error, éste envía una petición al codificador. Así, el siguiente marco de video será codificado en modo intra, lo cual detendrá el error de propagación, en un solo envío de ida y vuelta. La codificación en modo intra, reducirá la ganancia de compresión y bajo la misma cantidad de tasa de bits degradará, por lo tanto, la calidad de video. Para mejorar aún más la eficiencia de codificación, Wada propuso dos métodos que se explican enseguida para utilizar la recuperación selectiva como se explica en [62]. Cuando se detecta un paquete perdido el decodificador, envía la información identidad de los paquetes dañados al codificador. Así se realiza al mismo tiempo el cancelamiento de error en los bloques dañados en el decodificador y la decodificación sigue realizándose de manera normal. Los métodos que son propuestos para detener la propagación del error en el codificador son, primero, cuando el área afectada es calculada a partir de los bloques que fueron dañados y se sigue la codificación normal sin usar el área afectada. En el otro método, se realiza el mismo procedimiento de cancelamiento que se utiliza en el decodificador. Lo que se hace es re-ejecutar una decodificación local, desde el punto en que se encuentran los bloques cancelados hasta los bloques codificados actualmente.

Con respecto a esta técnica, se tiene el intercambio de mensajes entre el codificador y el decodificador sobre lo que fue correctamente recibido y lo que no. Además de esta forma, el codificador determina que buffer del cuadro de video fue dañado en el decodificador y así usará el buffer del cuadro no dañado para la predicción.

### **3.3.2 Retransmisión sin espera**

Cuando se hace uso de la retransmisión de datos, la espera que realiza el decodificador para las solicitudes de retransmisión de datos, no solo puede hacer que las muestras de video se congelen momentáneamente, sino que también se producirá una especie de retardo. Este método evita la espera normal en el momento de las peticiones de retransmisión por parte del decodificador. En lugar de esperar la llegada de los datos retransmitidos, la parte de vídeo dañado se cancela con algún método de cancelamiento de errores elegido. Después se continúa el proceso de decodificación normal mientras que una trama de los píxeles afectados y su información asociada de codificación (el modo de codificación y vectores de movimiento) se registra. Los píxeles dañados son corregidos al momento de la retransmisión de datos, así que se reproducen como si la transmisión de pérdida no hubiese ocurrido. Aunque se debe considerar que este esquema puede eliminar el retardo con los esquemas convencionales de retransmisión sin comprometer la calidad del video.

### **3.3.3 Retransmisión multicopia con aplicaciones para flujo priorizado de video sobre Internet**

El número de retransmisiones admisibles cuando el decodificador envía peticiones de retransmisión es limitado, debido que los sistemas de transmisión para video en tiempo real requiere distintos tiempos de retardo que generalmente están en el orden de los milisegundos, y dependen del tipo de aplicación, ya que en video conferencia se tiene un tiempo de espera diferente al de la recepción de HDTV en un equipo móvil ; por lo que la tasa de error residual (datos residuales como parámetros del proceso de codificación) después de la retransmisión podrá tener pérdidas muy altas en redes tales como Internet y redes inalámbricas. Para reducir esta tasa de error residual, una manera es enviando múltiples copias de un paquete perdido en cada prueba de retransmisión simple. Cuando estas tasas se incrementan, lo que debe hacerse, es transmitir parcialmente las capas superiores en la red u omitirse por completo.

### 3.4 Conclusión

En esta sección se muestra de manera breve las principales características de las técnicas de resistencia a errores en la tabla 5 con el objetivo de resaltar las diferencias más relevantes del estudio previo del estado del arte concerniente al contexto de protección y resistencia a errores.

Tabla 5. División y características de las tres principales vertientes de técnicas de resistencia al error.

Directivas (Forward)	Post-procesamiento	Interactivas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tienen por objeto detener la propagación de errores y hacer más robusto al sistema</li> <li>• Algunas técnicas incrementan la tasa de bits ya que añaden información redundante</li> <li>• La implantación de estas técnicas puede requerir de la modificación del sistema</li> <li>• Insuficientes para protección del <i>canal inalámbrico</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su objetivo es restaurar la información recibida en el receptor (decodificador)</li> <li>• No incrementan la tasa de bits, ni introduce ningún retardo</li> <li>• No requiere ninguna modificación en el codificador, ni en el sistema</li> <li>• Puede ser combinado fácilmente con los otros dos tipos de técnicas de resistencia al error</li> <li>• Aprovechan las limitaciones de la visión humana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de la información de retroalimentación</li> <li>• Implícitamente requiere un canal para la retroalimentación</li> <li>• Puede introducir retardos en espera de la respuesta del codificador</li> <li>• Su implementación tiene por lo regular alto grado de complejidad</li> </ul>

## 4 TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR ESPACIALES

### INTRODUCCIÓN

Las técnicas de cancelamiento espaciales aprovechan la información que se repite dentro de una imagen, esta redundancia de información se usa para reconstruir las áreas perdidas dentro de la misma. Estas técnicas son preferiblemente aplicables cuando no se tienen datos obtenidos a partir de los procesos de predicción de movimiento (ME: Motion Estimation y MC: Motion Compensation), es decir, es mejor realizar el cancelamiento de errores a imágenes Intra-codificadas.

El cancelamiento de error espacial es de gran utilidad para imágenes con áreas que presentan mucha variación de textura así como diversidad en las intensidades, secuencias de video con gran actividad de movimiento ó en cambios de escena dentro de una secuencia [32].

Algunas de estas técnicas utilizan los datos de valores reales que proporcionan las intensidades en los píxeles (dominio espacial), pero también pueden hacer la recuperación con los valores de los coeficientes de la DCT, producto de los procesos de transformación en el codificador (dominio frecuencial).

En este capítulo se explica y se desarrolla la parte operacional de una técnica basada en interpolaciones conocida como DI (Directional Interpolation) [32], [33], cabe mencionar que existen otros tipos de técnicas espaciales las cuales no solo trabajan en el dominio espacial, también lo hacen en el dominio de la frecuencia (Transformada Discreta de Fourier, Transformada Discreta Coseno, Transformada Wavelet, entre otras). También se muestran los resultados de la implantación de dicha técnica así como el análisis de los resultados obtenidos y conclusiones de esta técnica.

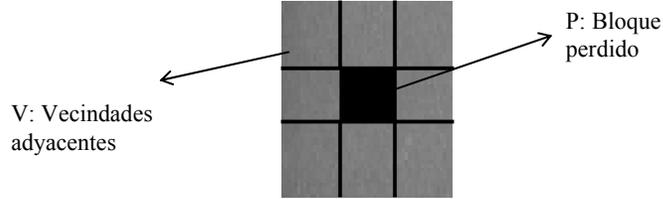
Otra de las técnicas espaciales que se aborda en este capítulo es el de Proyección sobre Conjuntos Convexos (POCS: Projections Onto Convex Sets) basada en la teoría de Conjuntos Convexos [63]. [64], este algoritmo iterativo trata de encontrar la solución más óptima para llegar a la convergencia de dicha solución con una minimización del error y tiene como propósito fundamental la restauración de bordes, identificando los bordes que pasan a través del área dañada y que se extiende en las vecindades espaciales. Después de explicar los fundamentos teóricos en que se basa el algoritmo de POCS se dan a conocer algunos de los resultados obtenidos de la implantación de la misma.

## 4.1 Interpolación Direccional

Las técnicas espaciales basadas en interpolaciones están relacionadas con las similitudes que existen en una sola imagen entre sus píxeles colindantes, éstas técnicas pueden trabajar ya sea en el dominio de la frecuencia y/o en el dominio espacial. Dado que el reconocimiento de la integridad de bordes tiene gran impacto para la percepción visual humana la técnica de Interpolación Direccional explota este hecho [26]. Es una técnica espacial orientada a preservar los bordes en una imagen, aprovechando la correlación espacial colindante al macrobloque perdido, y la orientación de los bordes en las áreas vecinas al macrobloque, para encontrar la orientación de borde dentro del macrobloque perdido. La técnica de Interpolación Direccional propuesta por Sun y Kwok para múltiples direcciones hace uso de algunas de las propiedades (valores conocidos) a-priori más representativas de las imágenes de una secuencia de video, para restringir el conjunto de posibles valores que pueden representar un número infinito de soluciones [33]. Estas propiedades incluyen:

- 1) Suavidad: Esta propiedad permite que los valores reconstruidos sean homogéneos con las áreas adyacentes (correctamente recibidos ó cancelados), que no haya variaciones bruscas entre estos valores.
- 2) Continuidad de bordes: Los bordes deben extenderse y deben ser continuos a través de los objetos en la imagen.
- 3) Consistencia con los valores conocidos: Requiere que los valores de las muestras recibidas correctamente no se vean alterados por el proceso de restauración y que los valores restaurados caigan dentro de un rango conocido (por ejemplo, los valores de 0 a 255 de muestras de luminancia de la imagen).

Para hacer el cancelamiento, el método de DI toma primero una porción compuesta de la imagen, esta área contiene al macrobloque perdido y a los ocho macrobloques adyacentes a él, tal como lo muestra la figura 4.1.



**Figura 4.1. Porción compuesta de la imagen con el macrobloque perdido y las vecindades de píxeles adyacentes.**

Después, utilizando los valores de las intensidades de dicha porción se determina si existe un borde predominante en el área de imagen tomada, esto lo hace mediante un clasificador de borde. El clasificador trabaja en la zona de los macrobloques adyacentes y determina que bordes caracterizan los bordes más definidos (véase fig. 4.2.a). Se crea un conjunto acumulador con las distintas orientaciones de borde que tienen un número determinado de direcciones clasificadas. La restauración de los macrobloques perdidos en la imagen se realiza extendiendo los bordes presentes en las vecindades colindantes de sus correspondientes macrobloques que pasen por el macrobloque perdido.

Las orientaciones de borde más probables deben ser elegidas correctamente con algún conocimiento de las características del borde alrededor del macrobloque perdido. Una buena medida de aproximación para hacer esta clasificación e identificar los bordes es a través del uso de las medidas del gradiente, en el dominio espacial. Los componentes del gradiente son calculados por medio de:

$$g_x = x_{i+1,j-1} - x_{i-1,j-1} + 2x_{i+1,j} - 2x_{i-1,j} + x_{i+1,j+1} - x_{i-1,j+1} \quad 4.1$$

$$g_y = x_{i-1,j+1} - x_{i-1,j-1} + 2x_{i,j+1} - 2x_{i,j-1} + x_{i+1,j+1} - x_{i+1,j-1} \quad 4.2$$

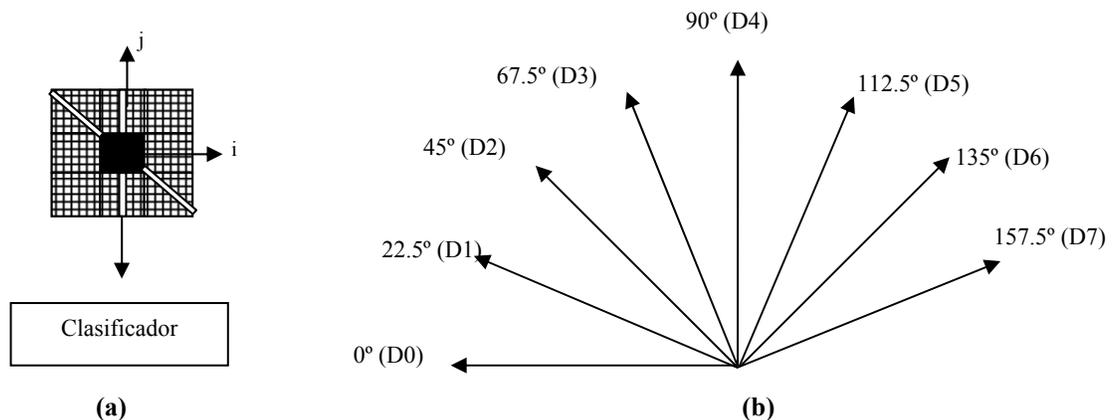
Las ecuaciones anteriores son equivalentes a convolucionar sobre cada valor de pixel, las siguientes máscaras del operador Sobel de tamaño 3x3:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad 4.3$$

La magnitud y la dirección angular del gradiente en la coordenada  $(i, j)$  están dadas por:

$$G = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad \theta = \tan^{-1}(g_x/g_y) \quad 4.4$$

Se ha seleccionado el operador de Sobel por su propiedad de circularidad como se menciona en [27], el cual ha demostrado brindar una mayor precisión en la estimación del valor del gradiente, por encima de los operadores de gradiente estándar. La medida del gradiente se calcula para cada coordenada  $(i, j)$  en la zona que rodea al macrobloque perdido, después se aproxima su respectivo valor de dirección angular  $\theta$  a su ángulo correspondiente de  $22.5^\circ$  más cercano, de forma que caiga en una de las ocho categorías direccionales espaciadas equitativamente alrededor de  $180^\circ$  como se ilustra en la figura 4.2.b, que van de D0 a D7 que son los contadores correspondientes a estas categorías.



**Figura 4.2. Detección de bordes (a) esquema del clasificador de bordes y (b) las ocho categorías de bordes direccionales.**

Se utiliza un mecanismo de votación que incrementa el contador de la categoría seleccionada con el valor de la magnitud del gradiente dibujando una línea a través del pixel de coordenadas  $(i, j)$  con orientación  $\theta$  que pase por el bloque perdido. Esto se describe mediante el siguiente pseudo-código:

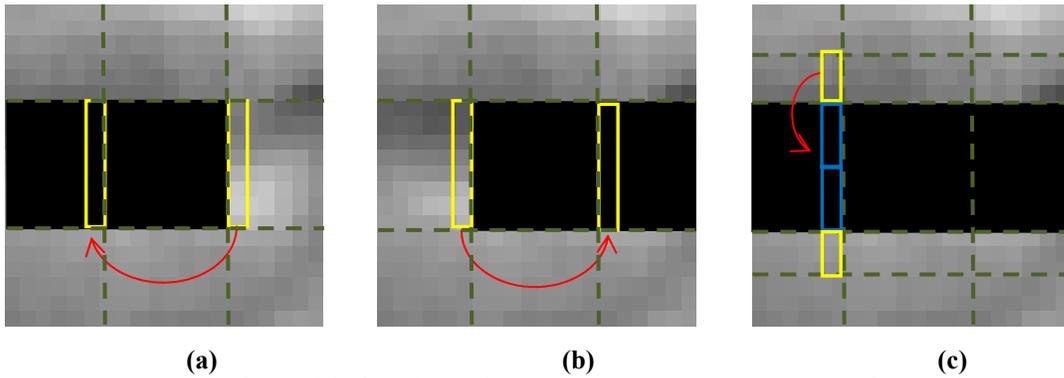
```
Hacer [ para todos los pixeles de coordenadas (i,j) en V ] {
    Calcular G y  $\theta$  a partir de la eq. (4.1.4)
    k = [redondear ( $\theta/22.5^\circ$ )+8] mod 8
```

si [la línea dibujada a través de (i,j) con  
 el ángulo  $\theta$  que interseca a P] {  
 $D_k = D_k + G$  }  
 }

Una vez que se ha terminado el proceso de votación para todas las localidades de la porción de la imagen *img*, obtenemos la información del valor máximo dentro del arreglo  $D_k$  en el que se acumularon los valores de la magnitud del gradiente. Una de las características del algoritmo de Interpolación Direccional inicialmente propuesto en [32] y [33] es que utiliza todos los macrobloques vecinos adyacentes, ya que considera que se han recibido correctamente todos los MB's vecinos alrededor del macrobloque dañado. Para la implantación de DI de este trabajo se hacen ciertas consideraciones tanto en la identificación de orientación de bordes como en la interpolación para la reconstrucción del macrobloque dañado, ya que se toman en cuenta únicamente los macrobloque vecinos (superior, inferior, derecho e izquierdo) cancelados o recibidos sin errores, es decir que si no se cuenta con el MB superior, este macrobloque no se considera en la votación del Gradiente y tampoco para la interpolación de píxeles.

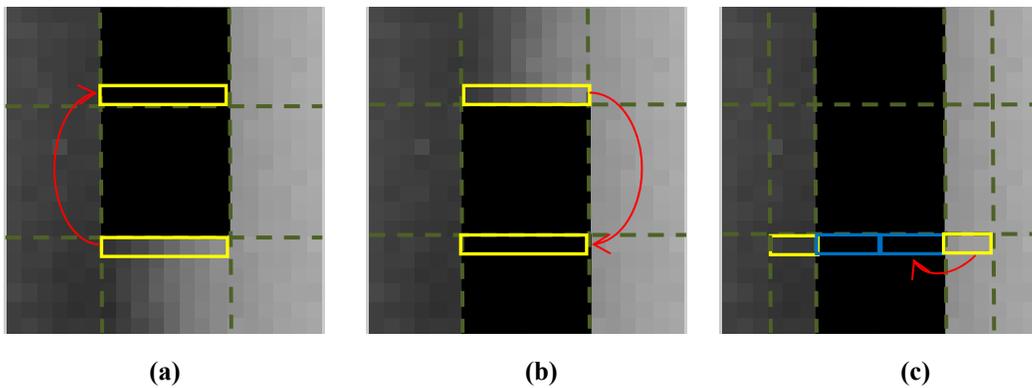
Después de obtener el valor máximo del gradiente el algoritmo va a recorrer el bloque perdido para hacer la recuperación del mismo, primero verifica que cada localidad cumpla con dos casos especiales, donde se tiene la categoría direccional de D0 correspondiente a la orientación angular desde los  $0^\circ$  a los  $22.5^\circ$  y de D4 correspondiente a los ángulos entre  $67.5^\circ$  a los  $90^\circ$ .

En el caso de tener un borde horizontal (categoría direccional D0), si el MB izquierdo contiene errores se toma la línea del MB derecho adyacente al MB perdido, para hacer la interpolación como se muestra en la figura 4.3.a, en caso de que el MB derecho tenga errores se toma la línea derecha se toma la línea del MB izquierdo adyacente al MB perdido como se observa en la figura 4.3.b, y si se encuentran dañados ambos MB's se toma información de la mitad de los MB superiores e inferiores a los MB's dañados como lo ilustra la figura 4.3.c.



**Figura 4.3. Consideraciones hechas para categoría direccional D0**

Cuando se tiene un borde vertical (categoría direccional D4), se realizan consideraciones similares a las del caso del borde vertical, si se pierde el MB superior se toman los valores de las intensidades de los pixeles en la línea del MB inferior adyacente al MB perdido para hacer la interpolación, como lo muestra la figura 4.4.a, en el caso en el que el MB inferior al MB dañado también lo esté se tomará la línea de pixeles del MB superior adyacente al MB dañado como se puede ver en la figura 4.4.b, y si se encuentran dañados tanto el MB superior adyacente como el inferior entonces se toman los valores de las mitades de los pixeles de las líneas de los MB's izquierdo y derecho tal y como lo ilustra la figura 4.4.c.



**Figura 4.4. Consideraciones hechas para categoría direccional D4.**

Si ninguno de los dos casos anteriores se cumple (para categorías direccionales D0 y D4), se analizan los puntos para la interpolación que brinda su orientación  $x1$ ,  $x2$ ,  $y3$ ,  $y4$ , cabe mencionar que de estos cuatro puntos se toma una combinación ya que  $x1$  y  $x2$  son

valores horizontales (columnas) y  $y_3$  e  $y_4$  son valores verticales (renglones), y se hacen consideraciones similares a las anteriores, considerando únicamente los valores de MB's correctamente recibidos.

Finalmente el valor de cada pixel reconstruido se hace mediante la siguiente interpolación que está dada en base a los valores obtenidos de los puntos antes mencionados con:

$$val1 = \sqrt{(y1 - i)^2 + (x1 - j)^2} \quad 4.5$$

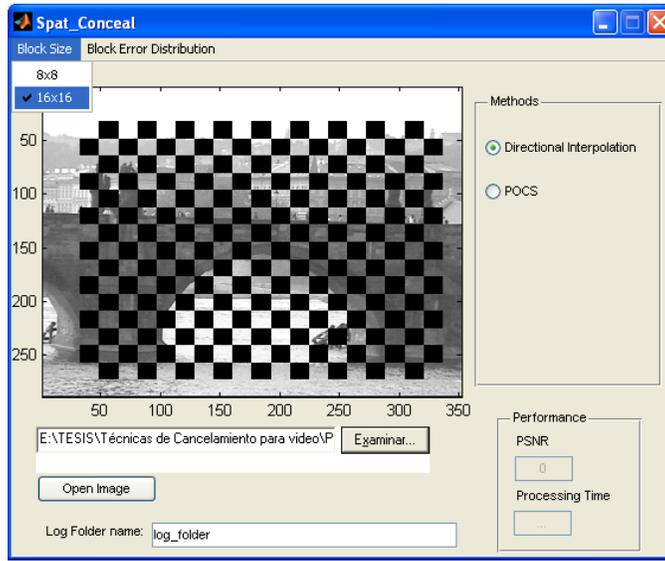
$$val2 = \sqrt{(y2 - i)^2 + (x2 - j)^2} \quad 4.6$$

$$valpix = \frac{(valpix(y1,x1)*val2)+(valpix(y2,x2)*val1)}{val1+val2} \quad 4.7$$

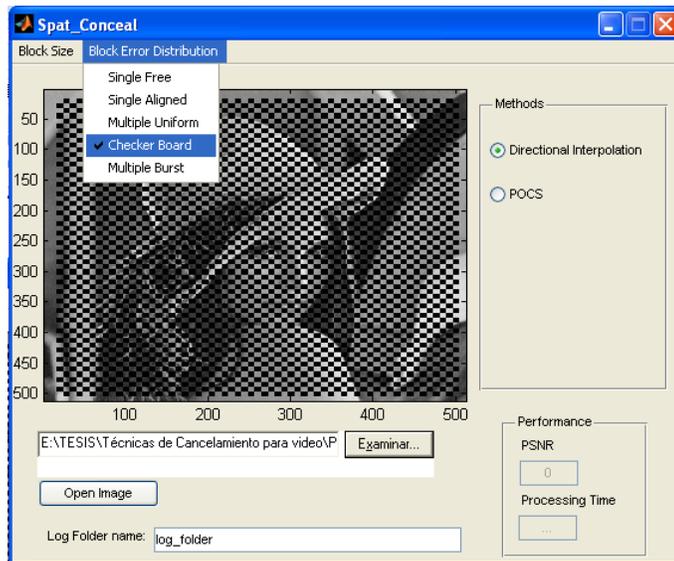
Con el propósito de analizar el rendimiento de esta técnica espacial la siguiente sección contiene algunos de los resultados de implantación de la técnica DI.

#### 4.1.1 Resultados de la implementación de DI

Enseguida se muestran los resultados del cancelamiento aplicado a imágenes en formato de secuencia de video YUV que se convirtieron en formato TIFF para ser implantadas en una interfaz gráfica en Matlab. La interfaz tiene un menú en el que se puede elegir el tamaño de macrobloque, ya sea de tamaño 8x8 (píxeles) o de 16x16 (fig. 4.5). Otra opción en el menú es la de elegir la simulación del tipo de error, las opciones son las siguientes (fig. 4.6), un error sencillo en cualquier posición de la imagen o en línea de acuerdo a la disposición de macrobloques dentro de la imagen, errores de varios macrobloques distribuidos de manera uniforme en toda la imagen (Multiple Uniform), o errores con una distribución en forma de tablero de ajedrez (Checker Board), o en forma de varias tiras (Multiple Burst).



**Figura 4.5. Opción de tamaño de Macro Bloque en el menú de la interfaz gráfica en Matlab para cancelamiento de errores espaciales.**



**Figura 4.6. Opción de tipo de distribución de error en el menú de la interfaz gráfica en Matlab para cancelamiento de errores espaciales.**

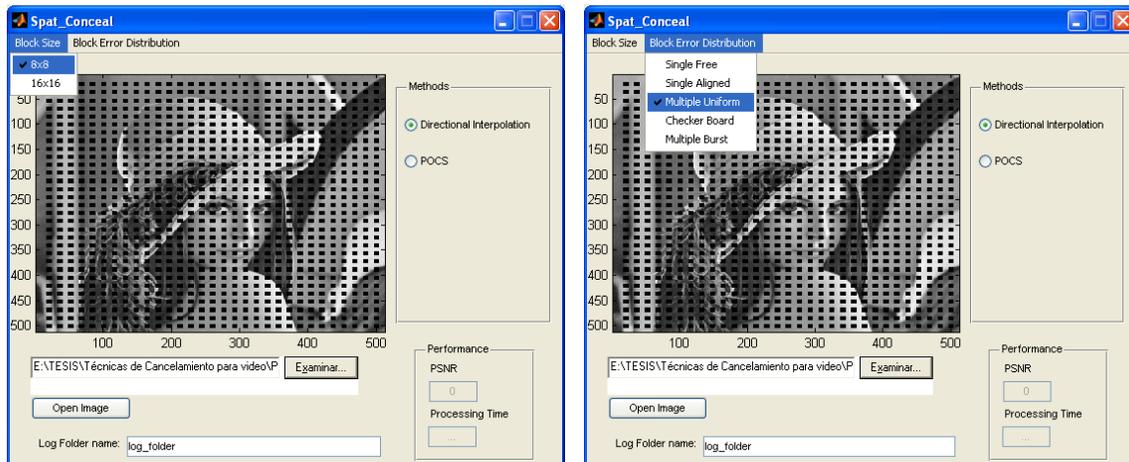
A continuación se presentan algunos resultados sobresalientes para mostrar el comportamiento de la técnica de cancelamiento espacial DI, en la figura 4.7 se muestra la imagen de la imagen de Lena que ha servido como una referencia en el tratamiento digital de imágenes, ya que ha sido ampliamente usada para algoritmos de compresión en

imágenes fijas y ahora se ha extrapolado a la recuperación en técnicas espaciales ya que esta imagen no pertenece a una secuencia de video propiamente.



**Figura 4.7. Imagen de Lena en formato TIFF.**

En la figura 4.8 se elige una distribución de error de bloques múltiples, de tamaño 8x8 y la restauración aplicando DI, la distribución de errores afecta algunas porciones de la imagen y a pesar de que se da una gran área de pérdida en la información de la imagen, se puede apreciar en la imagen con errores que no se afectan algunas porciones con detalles importantes como los ojos de Lena.



**Figura 4.8. Interfaz gráfica con la imagen de Lena con pérdidas. A la izquierda se muestra la opción en el menú para el tamaño de bloque (8x8). A la derecha la opción del tipo de error.**

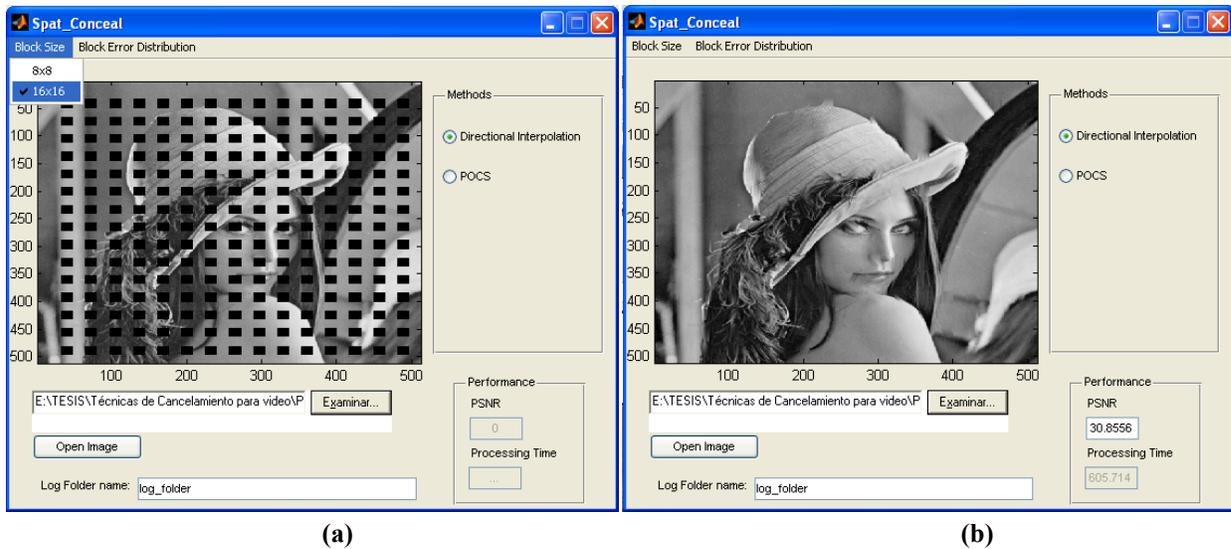
Una vez terminado el cancelamiento se observa en la figura 4.9 (a) en la esquina inferior derecha de la interfaz gráfica un recuadro que remarca dos parámetros de

rendimiento del algoritmo que son importantes para el análisis de la técnica de cancelamiento que son el PSNR y el tiempo de procesamiento.



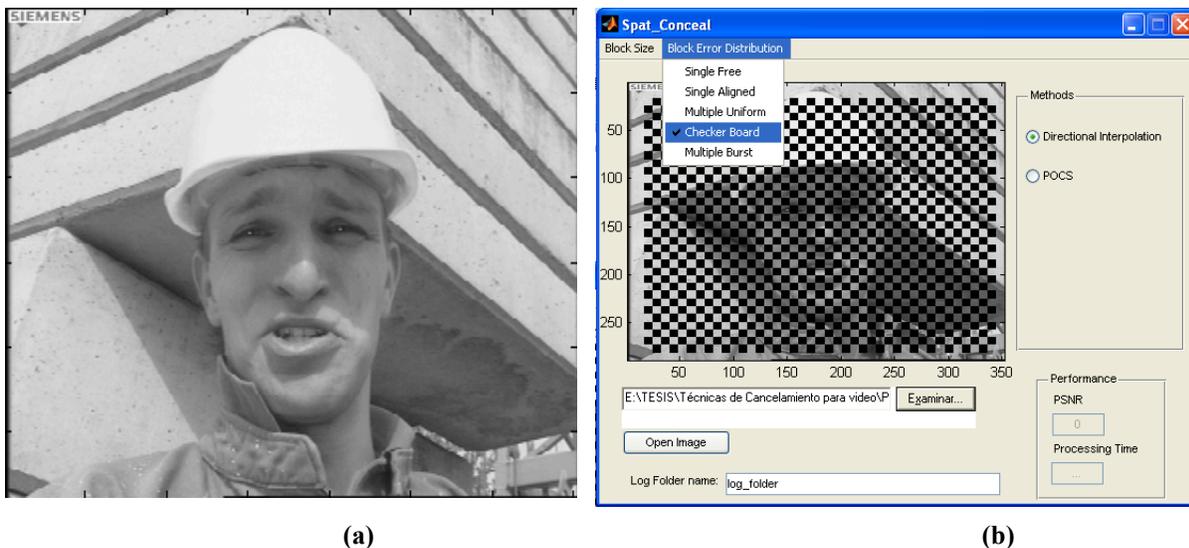
**Figura 4.9. Imagen de Lena cancelada con DI.**

Una vez realizada la reconstrucción de la imagen aplicando DI con los errores de la figura 4.8 (Multiple Uniform) el PSNR obtenido en la imagen es de 33.639, en la figura 4.9 (b) se puede apreciar que la reconstrucción de las pestañas en los ojos y algunos detalles en los bordes del sombrero muestran ciertas irregularidades y la imagen de Lena se aprecia algo borrosa. Si se cambia el tamaño de los MB's a 16x16 como lo muestra la figura 4.10 (a) con el mismo tipo de distribución de error, algunos de los macrobloques están posicionados exactamente en los ojos de Lena, y en la figura 4.10 (b) aparece la reconstrucción de la imagen, donde se aprecia que para reconstruir estas áreas donde dicha información se pierde por completo, el método DI no puede recuperar la información dentro del MB perdido, donde existen muchos detalles de bordes circulares o múltiples bordes, debido a la misma naturaleza del algoritmo. Las partes de la pupila dentro del ojo de Lena se ven demasiado borrosas, lo mismo sucede en algunas partes del sombrero en los bordes, pero son más notables en comparación con el tamaño de 8x8 ya que es mayor el área espacial dañada.



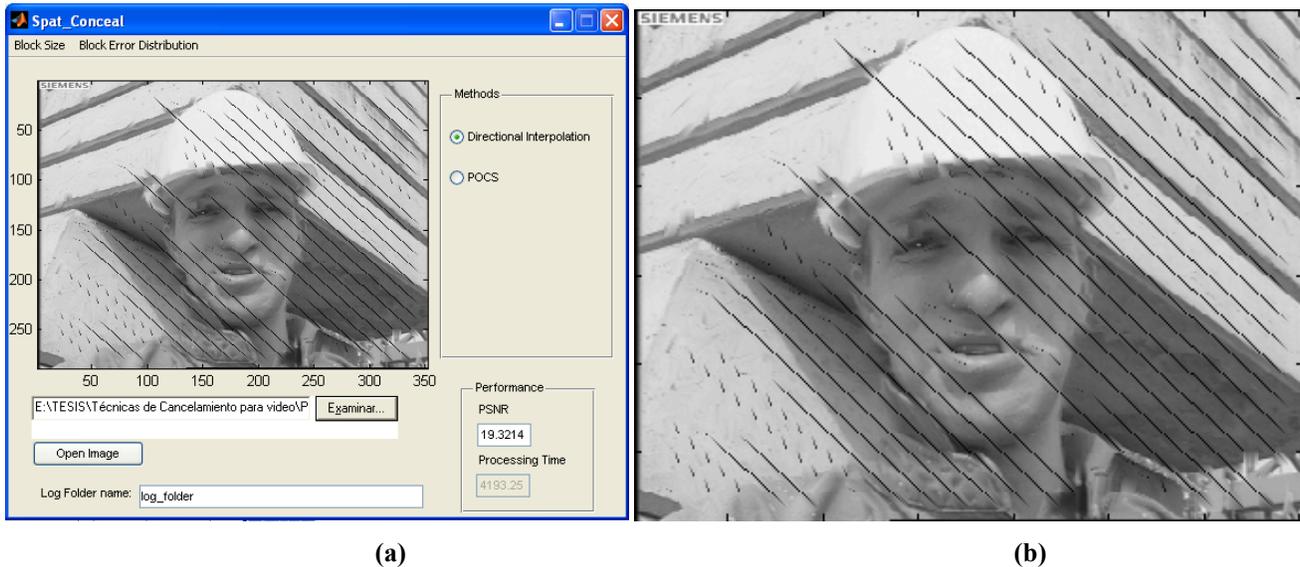
**Figura 4.10. Imagen de Lena (a) dañada (b) cancelada con DI.**

Una distribución de errores típica es la conocida como Tablero de Ajedrez (Checker Board), esta distribución de errores puede presentarse cuando se utiliza en el codificador H.264 la herramienta de FMO para los arreglos de las tiras (slices) que conforman la imagen en una secuencia de video. Para representar dicha distribución se realizó una simulación de errores con esta configuración teniendo dos tiras y perdiendo una de ellas. En la figura 4.11 (a) se tiene la imagen de Foreman sin errores en formato TIFF extraída de dicha secuencia de video (formato YUV), y después en la figura 4.11 (b) se muestra la imagen dañada.



**Figura 4.11. Imagen de Foreman (a) sin errores (b) con MB de error de tamaño 8x8 con una distribución de error de tablero de ajedrez.**

Al aplicar el cancelamiento con DI el resultado de la reconstrucción da un valor de PSNR de 19.32 como se observa en la figura 4.12 (a), se pueden observar con mayor detalle algunas líneas negras en la reconstrucción, este fenómeno se da debido a que como se mencionó anteriormente el algoritmo toma la información disponible para interpolar y cuando reconstruye los pixeles vecinos toma información de aquellos pixeles en base a su orientación, es por eso que parece como si las líneas tuvieran una inclinación ya que sigue la orientación del borde que reconstruye para cada pixel.



**Figura 4.12. Imagen de Foreman cancelada con DI (a) interfaz gráfica (b) ampliada.**

El valor del PSNR en las imágenes anteriores es muy bajo y se puede apreciar visualmente que la calidad de la reconstrucción no es muy buena, ya que esas líneas negras indican que la interpolación de pixeles no es adecuada, además de otros detalles tales como los ojos y la reconstrucción en los labios que no presenta una buena aproximación en la calidad visual subjetiva.

Al cambiar el tamaño del MB pero con el mismo tipo de distribución de error (Checker Board), como se observa en la figura 4.13 (a) donde el valor de PSNR es mayor y la calidad visual también es mejor con respecto al caso anterior ya que en la reconstrucción se observa una aparición menor de líneas negras, aunque la reconstrucción de los detalles como en los ojos del personaje son bastante borrosos (fig. 4.13.b).

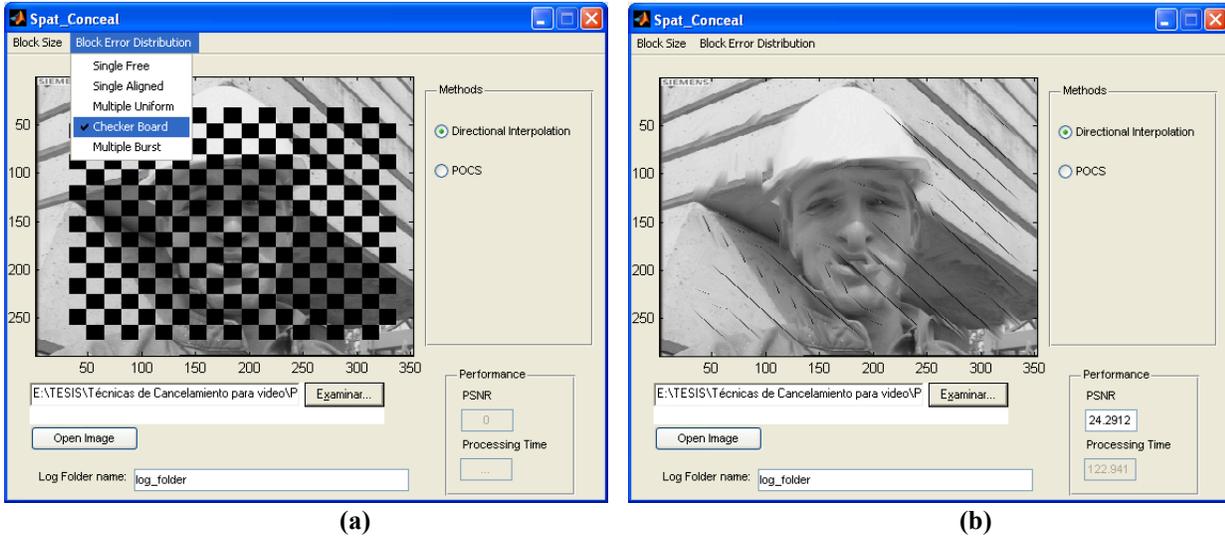


Figura 4.13. Imagen de Foreman (a) dañada (b) cancelada con DI.

Una de las distribuciones de error que se presentan típicamente al transmitir video sobre canales inalámbricos, es aquella que se presenta como una tira de macrobloques contiguos (bursts), esto debido a que la pérdida un paquete o incluso de un bit puede representar que una tira o varias tiras resulten indecodificables [43]. En las simulaciones realizadas se presenta la pérdida de varias de esas tiras o ráfagas, para ejemplificar este tipo de pérdidas primero se muestra en la figura 4.14 (a) la imagen de Stefan sin errores y a continuación en la figura 4.14 (b) se presenta la imagen dañada con la distribución de errores con múltiples ráfagas con un tamaño de macrobloques de  $8 \times 8$ .

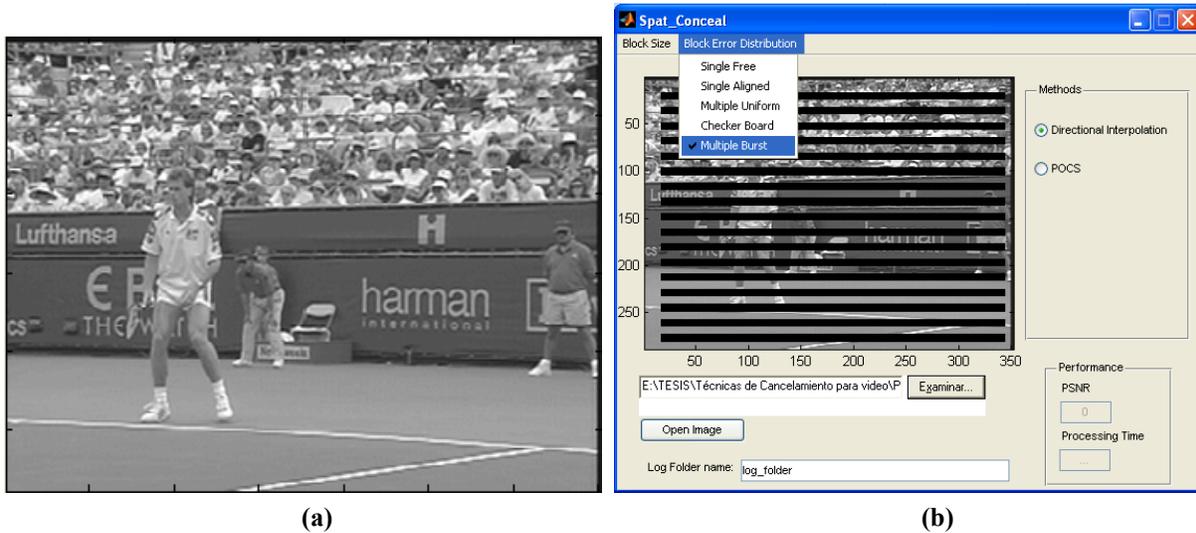
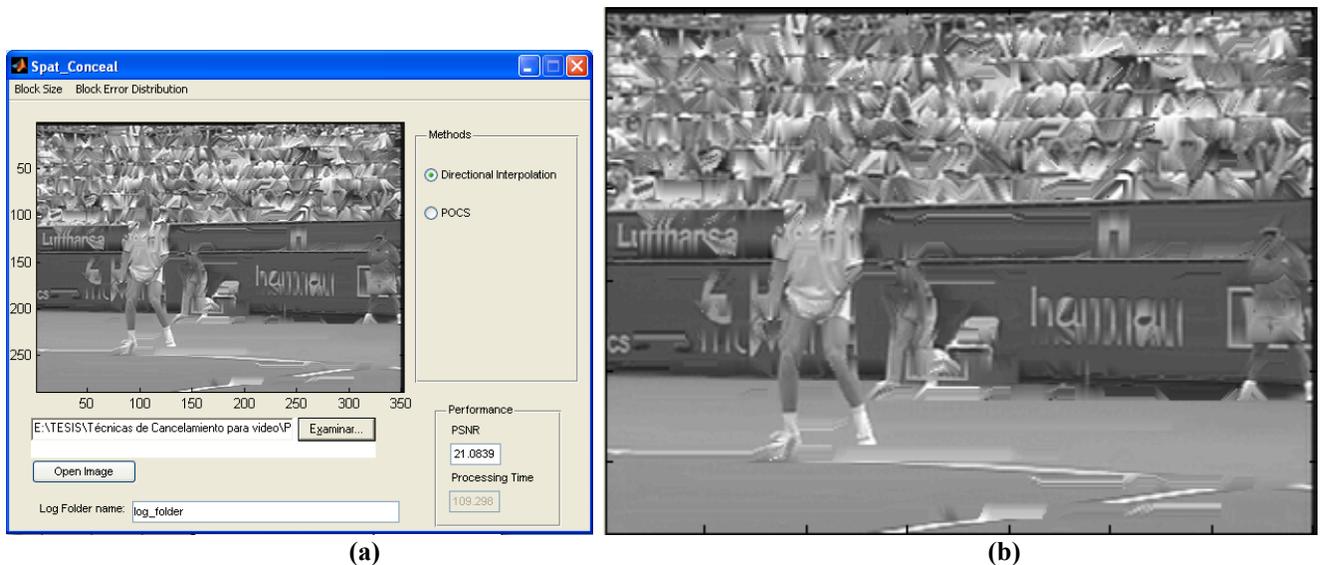


Figura 4.14. Imagen de Stefan (a) sin errores (b) con MB de error de tamaño  $8 \times 8$  con una distribución de error en forma de múltiples ráfagas.

En la figura 4.15 se observa la imagen resultado del cancelamiento con DI, el PSNR que se obtiene con la reconstrucción es de un valor de 21.08 (fig. 4.15.a) que es un valor de PSNR aceptable pero no es un valor muy alto, considerando el tipo de pérdidas (morfología del error) y la cantidad de información dañada dentro de la imagen. Al analizar la imagen de forma subjetiva la recuperación en las áreas de la imagen donde existen mayores detalles, como el rostro del jugador, las gradas con el público y en las letras de los anuncios, todos estos detalles se ven muy borrosos y el rostro del jugador no se ve claro. Es muy importante restaurar estos detalles ya que la calidad visual depende mucho de estos detalles de los bordes.



**Figura 4.15. Imagen de Stefan cancelada con DI (a) interfaz gráfica (b) ampliada.**

En general el método de Interpolación Direccional puede lograr la recuperación de una gran cantidad de la información dañada cuando se presentan pérdidas muy grandes de información, pero al tener pérdidas consecutivas como las mostradas anteriormente, al algoritmo se le dificulta la recuperación si en las vecindades espaciales hay falta de información correctamente recibida. A continuación se presentan los resultados de varias de las imágenes (figura 4.16) Lena, (figura 4.17) Foreman, (figura 4.18) Bridge-close, (figura 4.19) Stefan para la reconstrucción de DI con un tipo de errores de ráfagas, para tamaños de macrobloques de 8x8 (incisos a) y 16x16 (incisos b).



(a)



(b)

Figura 4.16. Imagen de Lena cancelada con DI para errores de ráfagas



(a)

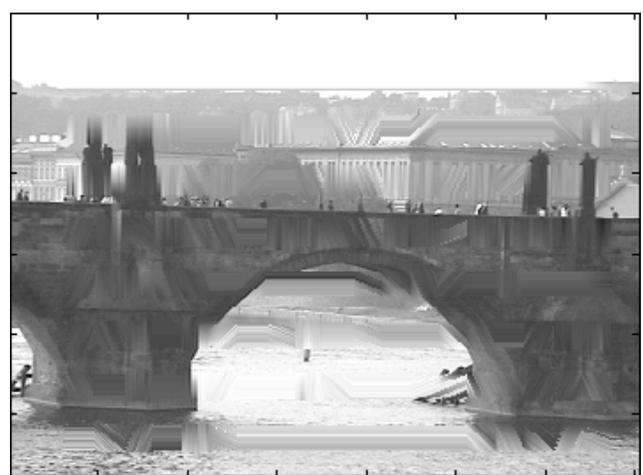


(b)

Figura 4.17. Imagen de Foreman cancelada con DI para errores de ráfagas

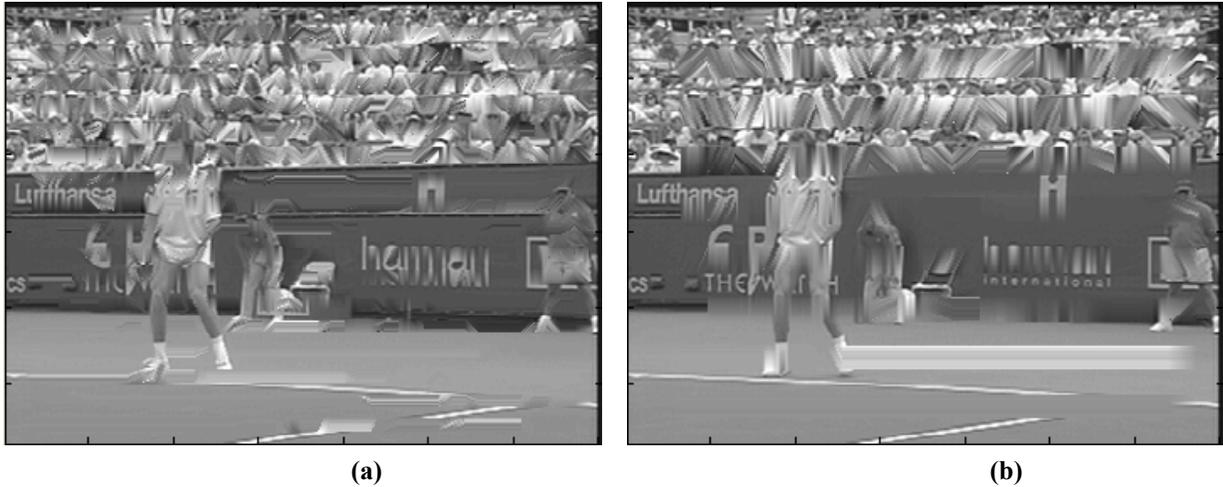


(a)



(b)

Figura 4.18. Imagen de Bridge-close cancelada con DI para errores de ráfagas



**Figura 4.19. Imagen de Stefan cancelada con DI para errores de ráfagas**

### 4.1.2 Conclusión

La técnica de cancelamiento de errores espacial conocida como Interpolación Direccional ha sido desarrollada en esta capítulo así como los resultados de su implantación práctica, esta técnica resulta útil y necesaria para aplicar cuando no existe información temporal disponible, es decir, los parámetros obtenidos a partir de los procesos de Estimación de Movimiento y Compensación de Movimiento, tales parámetros son los Vectores de Movimiento (MV's) y las Imágenes de Diferencia (DFD's). Este tipo de técnicas son prácticas y se obtienen buenos resultados para imágenes Intra-codificadas, es decir, para la primer imagen de la secuencia de video codificada conocida como imagen Intra-codificada, también se obtienen buenos resultados para imágenes homogéneas que no presenten mucha diversidad de textura o detalles con bordes complejos.

Esta técnica es una buena aproximación para reconstrucción y seguimiento de bordes sencillos, si el borde que se encuentra dentro del MB dañado se extiende fuera a las vecindades de MB's adyacentes a dicho MB ya sea cancelados o correctamente recibidos. En caso que se tengan errores con bordes complejos (varios bordes) en el área perdida para el algoritmo será imposible recuperar la información de todos y cada uno de dichos bordes.

El algoritmo propuesto está planteado para la pérdida de MB's aislados suponiendo que se cuentan con todos los MB's vecinos adyacentes al MB dañado por lo cual si se aplica este algoritmo originalmente propuesto a errores típicos en canales inalámbricos como los presentados en las simulaciones este algoritmo es poco exitoso o con calidad nula. Por el motivo anterior la técnica de DI fue mejorada en este trabajo de tesis haciendo las consideraciones necesarias para utilizar únicamente la información correctamente recibida disponible en las vecindades al MB dañado a reconstruir.

Aún con las consideraciones hechas para la implantación en DI los resultados de reconstrucción presentan un bajo valor de PSNR y solo con la observación en la calidad visual el algoritmo no reconstruye algunos detalles de bordes importantes como los detalles en los ojos y otros tipos de detalles importantes. Además cuando se tienen múltiples errores o pérdida de macrobloques consecutivos con el método de DI se ve una especie de propagación de error, notoria en la reconstrucción.

#### 4.2 Proyección sobre conjuntos convexos (POCS)

Uno de los grandes retos para el cancelamiento de errores es la recuperación confiable de las discontinuidades dentro de la imagen, esto significa que el seguimiento de los bordes debe ser lo más fiel posible. Una de las técnicas espaciales orientada a preservar los bordes es la técnica de POCS, que es una técnica iterativa basada en la teoría de proyecciones sobre conjuntos convexos [63], [64].

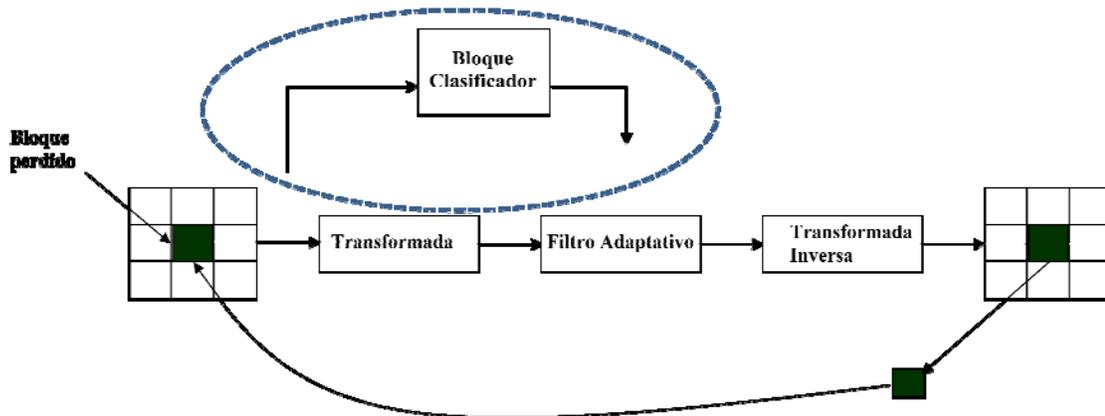


Figura 4.20. Diagrama a bloques del proceso de restauración iterativa de POCS adaptativo.

La técnica POCS utiliza la parte del clasificador de bordes, tal como lo ilustra la figura 4.20, y después de realizar el mismo procedimiento de DI hasta 4.1.5 una vez que todos los pixeles han realizado la votación, se busca el valor más grande dentro del contador y se identifica la dirección para usar en la restauración.

$$k_{max} = \operatorname{argmax}_k (D_k) \quad 4.8$$

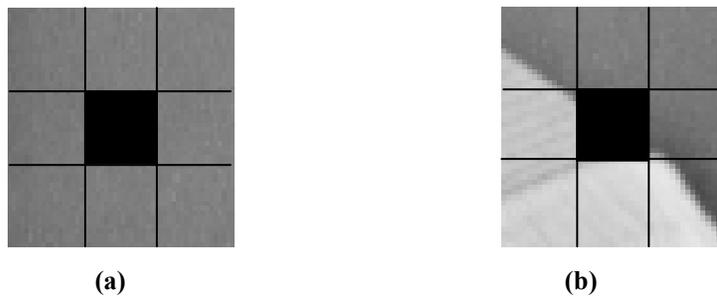
Si el valor del contador está debajo de un cierto valor de umbral  $T$ , esto quiere decir entonces que no existe ninguna orientación de borde discernible y el bloque se clasifica como porción de imagen monótona, en caso contrario será denominada de borde, como lo muestra el siguiente pseudo-código:

```

Si [ $D_{kmax} < T$ ] {
    P Área monótona
}
else {
    P Área de borde con orientación
      dada por el índice
}

```

Ahora el bloque perdido ha sido clasificado como un bloque monótono o como un bloque de borde con alguna orientación específica, estos dos casos son ejemplificados en la figura 4.21.



**Figura 4.21. Representación de clasificación de tipos de áreas (a) monótona (b) de borde.**

Esta técnica ha sido aplicada para varios problemas de restauración de imágenes en donde la información a-priori puede ser utilizada para restringir el tamaño de conjunto solución adecuado, como se menciona en [34]. Estas restricciones son las mismas en las que se basaron Sun y Kwok para la técnica anteriormente descrita DI, en la que se consideran tres propiedades en una imagen para la restauración de la misma, que son; suavidad continuidad de bordes y consistencia con los valores conocidos. La figura 4.22 ejemplifica el proceso iterativo de POCS.

A partir de lo anterior se pueden formular dichas propiedades como conjuntos convexos. Para caracterizar las propiedades deseadas en la imagen anteriormente mencionadas, Sun y Kwok, proponen las siguientes restricciones como conjuntos convexos y sus respectivos operadores de proyección:

1) *La clase de señales que toman un conjunto prescrito de valores conocidos:*

Este conjunto  $C_1$  contiene todos los vectores de la señal  $\mathbf{x}$  en el espacio real  $n$ -dimensional  $\mathbf{R}^n$  con algunos de los componentes iguales a los valores conocidos puede ser expresado como:

$$C_1 = \{x \in R^n: x_i = k_i, i \in I\} \quad 4.9$$

donde,  $x_i$  es el  $i$ -ésimo componente del vector  $\mathbf{x}$ , y  $k_i$  son los valores constantes conocidos en un índice dado del conjunto  $I$ . El operador de proyección  $\mathbf{P}_1$  sobre el conjunto convexo  $C_1$  está dado por:

$$[\mathbf{P}_1 \mathbf{x}]_i = \begin{cases} k_i, & i \in I \\ x_i, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad 4.10$$

Este operador de proyección actúa de la siguiente manera: si el valor de la componente es conocida, entonces, el valor de la proyección se asigna, de otro modo, no se modifica.

2) *La clase de señales que toman un conjunto establecido de coeficientes transformados:* Este conjunto  $C_2$  contiene todos los vectores de la señal  $\mathbf{x}$  en el

espacio complejo  $n$ -dimensional  $C^n$  con algunos coeficientes transformados iguales a los valores conocidos que puede ser expresado como:

$$C_2 = \{x \in C^n: [T\mathbf{x}]_i = z_i, i \in I\} \quad 4.11$$

donde,  $T$  es un operador de transformada lineal,  $[T\mathbf{x}]_i$ , es el  $i$ -ésimo coeficiente de transformada y  $z_i$  son constantes conocidas en un índice dado del conjunto  $I$ . El operador de proyección  $P_2$  sobre el conjunto convexo  $C_2$  está dado por:

$$[TP_2\mathbf{x}]_i = \begin{cases} z_i, & i \in I \\ [T\mathbf{x}]_i, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad 4.12$$

Si el coeficiente transformado se establece, la proyección se asigna a dicho coeficiente, de otra forma se deja sin cambios.

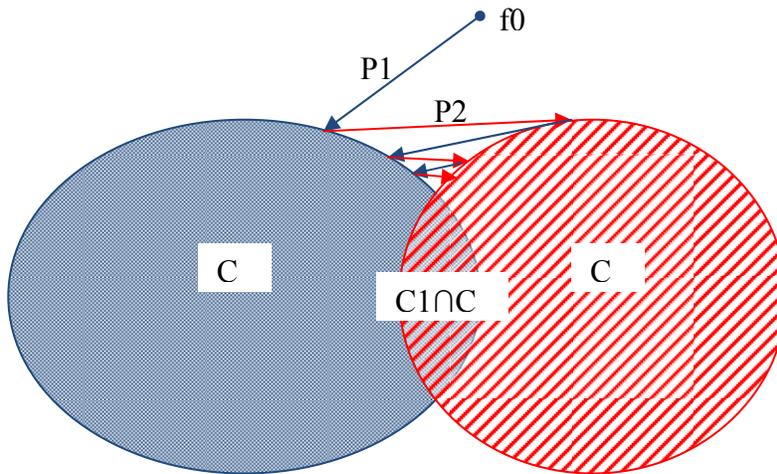


Figura 4.22. Ilustración de la señal espacial de las Proyecciones Sobre Conjuntos Convexos (POCS).

El operador de proyección  $P_1$  se usa para imponer la restricción de consistencia con los valores conocidos. Cualquier vector de la señal  $x$  que representa una imagen sobre la región mostrada en la figura 4.21 (a o b), puede ser forzada a satisfacer la consistencia con la siguiente proyección:

$$[P_1\mathbf{x}]_i = \begin{cases} k_{i,j}, & (i,j) \in V \\ 0, & (i,j) \in P \text{ y } x_{i,j} < 0 \\ 255, & (i,j) \in P \text{ y } x_{i,j} > 255 \\ x_{i,j}, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad 4.13$$

donde  $(i, j)$  son los índices del pixel, y  $k_{i,j}$  son los valores de los pixeles de las vecindades recibidas correctamente.

El operador de proyección  $P_2$  se usa para imponer las restricciones de suavidad y de continuidad de borde. Este operador debe ser adaptativo a las características locales de la imagen. Para áreas de la imagen con características de homogeneidad o suaves (áreas monótonas) el espectro es casi isotrópico (es decir que hay nula o poca variación de sus intensidades espaciales) y tiene un ancho de banda muy bajo.

### **Filtro Adaptativo (Pasa-bajas/Pasa-banda)**

Para macrobloques perdidos pertenecientes a una porción de la imagen clasificada como área monótona se puede imponer la restricción de que cualquier restauración viable debe tener un filtro de paso bajo de espectro de banda limitada (es decir, debe ser suave). Para el conjunto convexo  $C_2$  de valores complejos, tenemos,

$$C_{2,SMOOTH} = \{ \mathbf{x} \in \mathbf{C}^n : [\mathbf{Tx}]_{m,n} = 0, \sqrt{m^2 + n^2} > R_{th} \} \quad 4.14$$

Dado que en [1] la consideración es que  $T$  es el operador de transformada de Fourier Discreto 2-D de  $N \times N$  y  $(m, n)$  especifican los coeficientes de Fourier con  $-N/2 \leq (m, n) \leq N/2 - 1$ , y  $R_{th}$  que es un radio de umbral que especifica una frecuencia de corte pasa bajas. El operador de proyección  $P_2$  es entonces:

$$[\mathbf{TP}_{2,SMOOTH}\mathbf{x}]_{m,n} \begin{cases} 0, & \sqrt{m^2 + n^2} > R_{th} \\ [\mathbf{Tx}]_{m,n}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad 4.15$$

El operador  $P_{2,smooth}$  actúa como un filtro pasa bajas que pone los coeficientes de altas frecuencias fuera del radio de ancho de banda especificado por  $R_{th}$  a cero y deja los coeficientes de bajas frecuencias sin cambiar. En la siguiente sección se muestra el funcionamiento de tal filtro. La figura 4.23 muestra el filtro pasa bajas correspondiente a la proyección del operador  $P_{2,smooth}$  mencionado anteriormente.

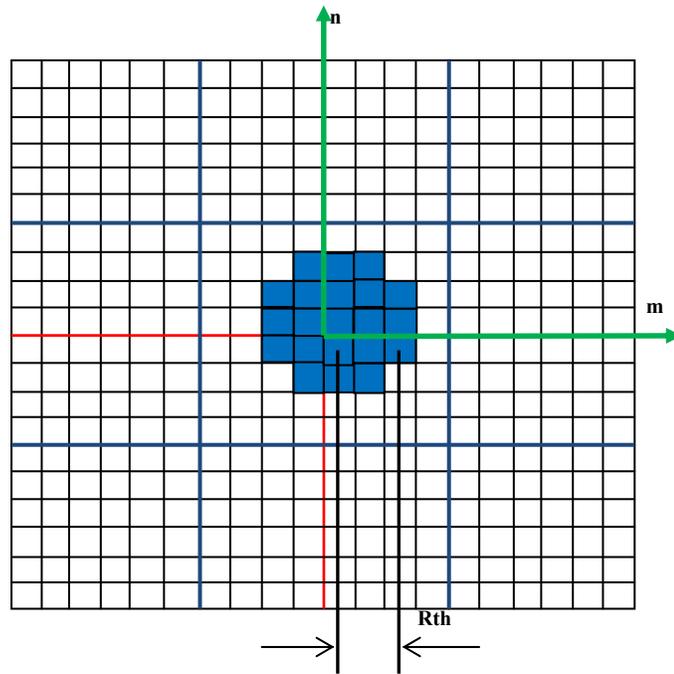


Figura 4.23. Filtro pasa bajas.

### Filtro pasa banda

Para áreas de borde de la imagen, el espectro tiene una característica pasa banda en la cual, la energía de los coeficientes de transformada caen en la dirección ortogonal del borde y los demás coeficientes son muy pequeños. En el caso del filtro pasa banda, para áreas con bordes, se aplica el siguiente operador de proyección,

$$[TP_{2,EDGE X}]_{m,n} = \begin{cases} 0, & |m - n * \tan(\theta + 90^\circ)| > B_{th} \\ [Tx]_{m,n}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad 4.16$$

Este operador actúa de forma que pone los coeficientes fuera del ancho de banda pasa banda a cero y deja sin alterar los coeficientes dentro del mismo, como se muestra en la figura 4.24.

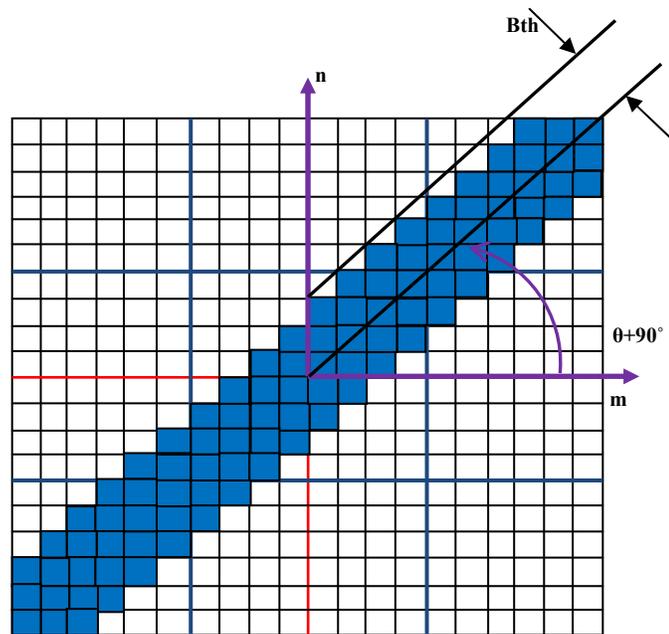


Figura 4.24. Filtro pasa banda.

Enseguida se presenta la forma del filtro pasa banda para la implementación en este trabajo, debido a que no fue posible aplicar el operador propuesto en [1], ya que esta representación es la forma general de un ancho de banda a lo largo de la línea.

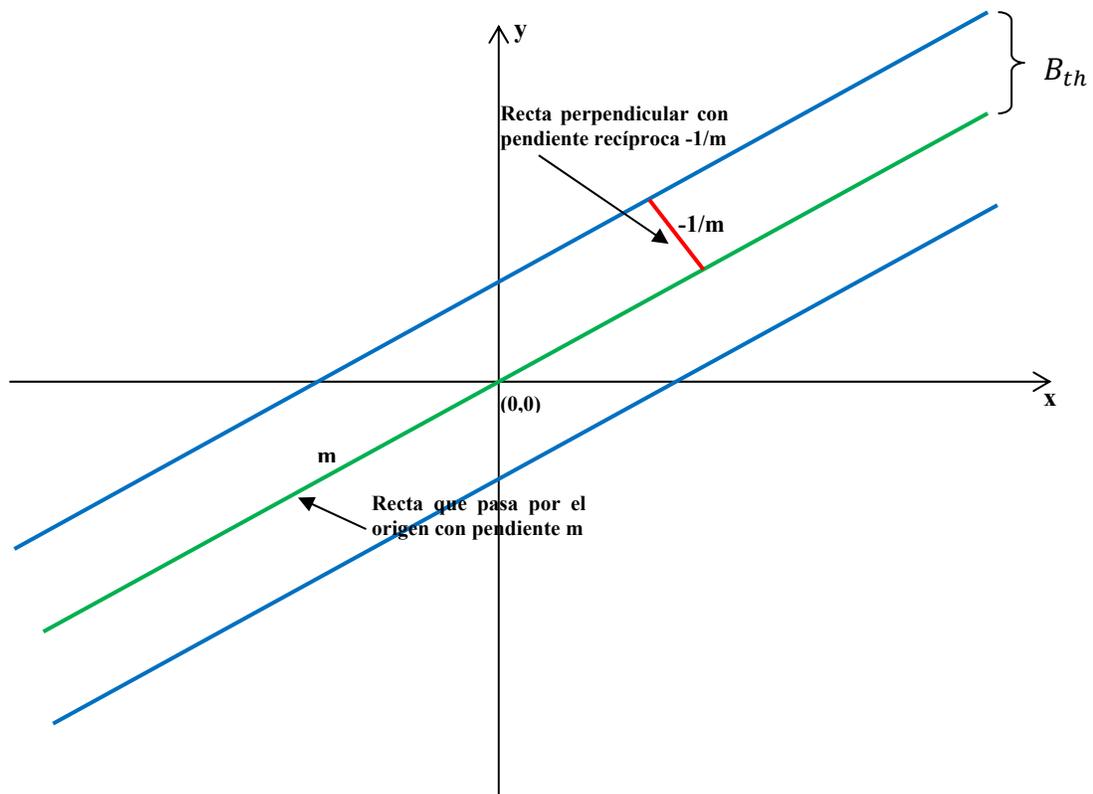


Figura 4.25. Rectas consideradas para crear sistema de ecuaciones lineales en el plano de la imagen correspondiente al filtro pasa banda (en las ecuaciones se considera  $\text{midpoint} = \text{origen} = 0$ ).

Para hacer que se extienda el ancho de banda se propone un sistema de ecuaciones con 2 incógnitas, en el cual se describen 2 rectas (fig. 4.25), una es la línea que tiene la pendiente correspondiente al ángulo que describe la magnitud del gradiente obtenida anteriormente por el operador de Sobel, la otra línea se traza de forma ortogonal a la recta anterior. Tenemos que el sistema de ecuaciones lineales sería,

$$-mx + y = b \quad 4.17$$

$$\frac{1}{m}x + y = k \quad 4.18$$

∴

$$-mx + y = midpoint * (1 - m) \quad 4.19$$

$$\frac{1}{m}x + y = \frac{1}{m}i + j \quad 4.20$$

La solución para el sistema de ecuaciones,

$$x = \frac{i+(j*m)+(midpoint*m^2)-(midpoint*m)}{m^2+1} \quad 4.21$$

$$y = \frac{(m*i)+(j*(m^2))+midpoint-(midpoint*m)}{m^2+1} \quad 4.22$$

Para hacer las ecuaciones de la recta a un punto cualquiera (i,j),

$$x - i = \frac{i+(j*m)+(midpoint*m^2)-(midpoint*m)-(i*m^2)-i}{m^2+1} \quad 4.23$$

$$y - j = \frac{(m*i)+(j*(m^2))+midpoint-(midpoint*m)-(j*m^2)-j}{m^2+1} \quad 4.24$$

∴

$$x - i = \frac{(m^2*(midpoint-i)+(m*(j-midpoint))}{m^2+1} \quad 4.25$$

$$y - j = \frac{(midpoint*(1-m)+(m*i)-j}{m^2+1} \quad 4.26$$

Hagamos,

$$\alpha = (m^2 * (midpoint - i)) + (m * (j - midpoint)) \quad 4.27$$

$$\beta = (midpoint * (1 - m)) + (m * i) - j \quad 4.27$$

Recordemos que para la definición de la recta tenemos,

$$d = \sqrt{|x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2} \quad 4.28$$

$$d = \sqrt{|x - i|^2 + |y - j|^2} \quad 4.29$$

$$d = \sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2} \quad 4.30$$

$$d = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad 4.31$$

Para el valor de  $B_{th}$ , tenemos finalmente,

$$B_{th} = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{m^2 + 1} \quad 4.32$$

Este es el valor  $B_{th}$  que se utiliza en la implementación para el umbral de ancho de banda pasa banda en el filtro cuando se clasifica un área de la imagen con el bloque de error como área de borde.

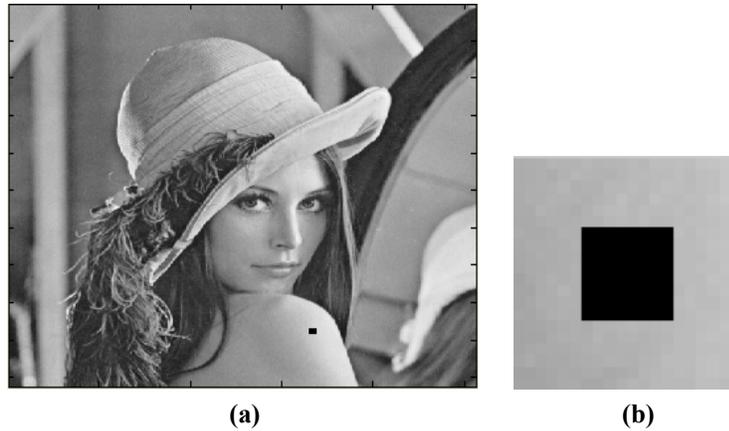
#### 4.2.1 Resultados de implantación

En esta sección se muestran los resultados de implantación de la técnica de POCS. Las pruebas correspondientes fueron realizadas tanto para macrobloques aislados como para errores típicos de canales inalámbricos, en primer lugar se muestra el proceso iterativo y las gráficas obtenidas con las que se observa la convergencia a errores, para ello dichas pruebas fueron hechas para pérdidas de un macrobloque aislado y son los resultados que a continuación se presentan.

Dado que en el algoritmo inicialmente planteado por Sun y Kwok [34] se utiliza una ecuación para el filtro pasa-banda que da como resultado un valor indefinido en algunos valores (bordes horizontales y verticales), en la implantación realizada no se usa esta fórmula y se presentaron problemas para obtener la reconstrucción de dichas orientaciones, es por eso que las simulaciones para distribuciones de error de pérdidas de

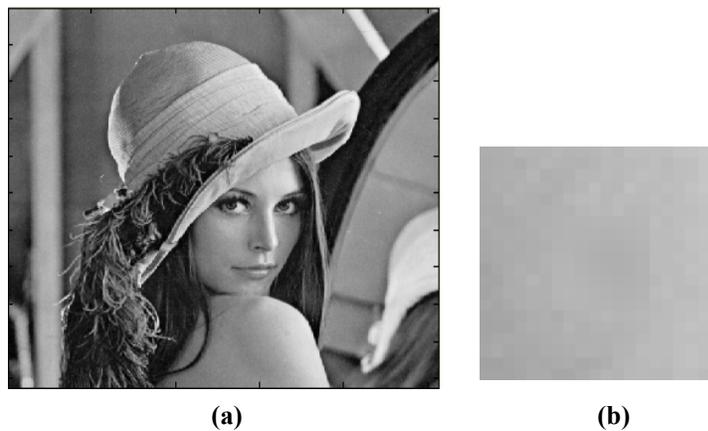
varios macrobloques la reconstrucción además de requerir mucho tiempo de procesamiento, no reconstruyen todos los macrobloques dañados.

En la figura 4.26 (a) se muestra una figura con un bloque dañado en un área del brazo de Lena que presenta vecindades suavizadas, es decir, no existen bordes distinguibles alrededor del error. Al procesar dicha imagen se obtiene un valor máximo de la magnitud del gradiente de 226, por lo que se clasifica como un área monótona al bloque compuesto (fig. 4.26 (b)), ya que el valor es menor al umbral de 800.

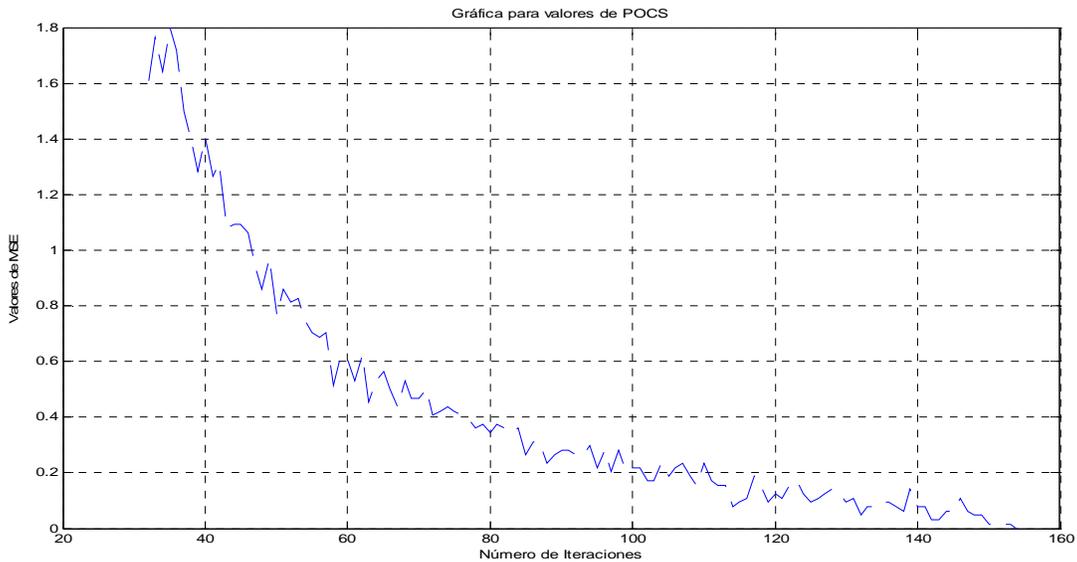


**Figura 4.26. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área Monótona Clara, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados.**

La figura 4.27, muestra la reconstrucción final del área dañada y su correspondiente bloque compuesto (fig. 4.27(b)). Para este bloque dañado, el algoritmo se detuvo en la iteración número 152. Finalmente la figura 4.29 muestra los valores de convergencia al error en función de las iteraciones.

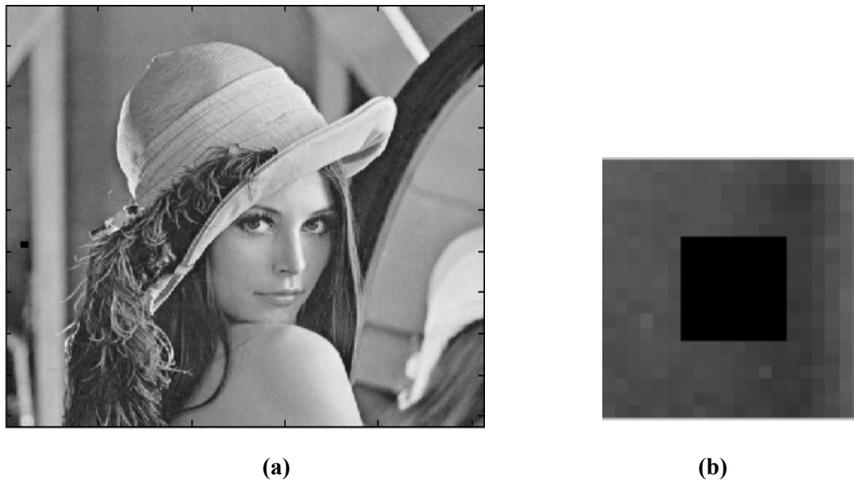


**Figura 4.27. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 152 iteraciones.**



**Figura 4.28.** Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área monótona clara (fig. 4.26).

La figura 4.29 también tiene un área monótona, pero ahora en un área oscura; su máximo valor de magnitud del gradiente es de 492. La figura 4.30, presenta la reconstrucción del bloque dañado. El mínimo valor de MSE se obtuvo con 100 iteraciones. La figura 4.31 muestra la gráfica para los valores de MSE en función del número de iteraciones.



**Figura 4.29.** Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área Monótona Oscura, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados.

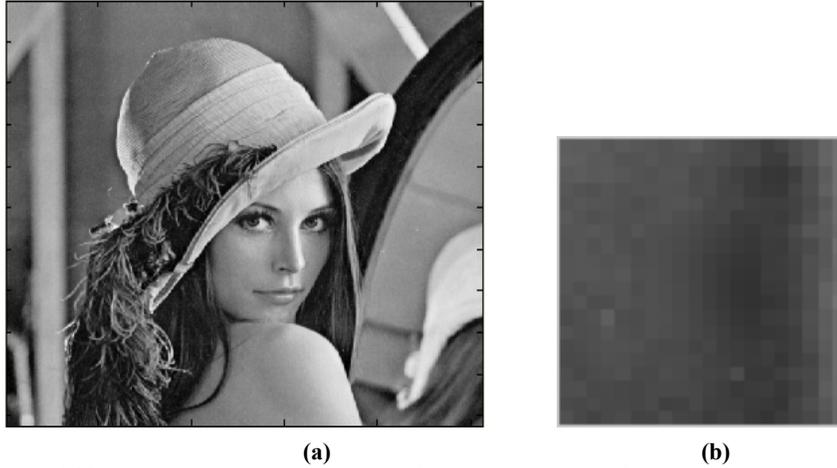


Figura 4.30. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 100 iteraciones.

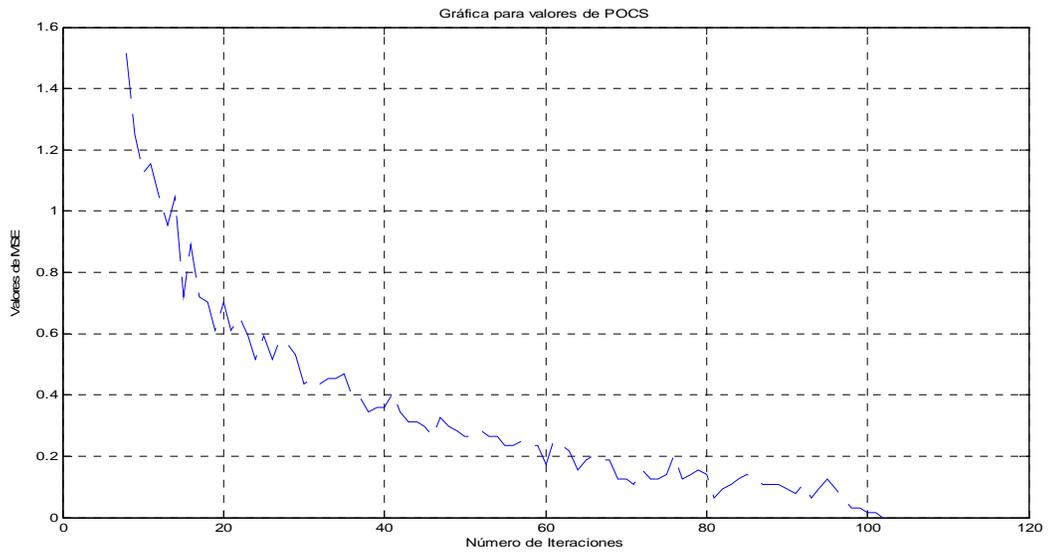


Figura 4.31. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área monótona oscura (fig. 4.29).

A continuación se muestra la imagen de Lena con un bloque dañado en un área donde pasa el borde del hombro de Lena y su cabello (fig. 4.32). El valor máximo de la magnitud del gradiente es de 8013, clasificándose este bloque dañado como “borde”. La reconstrucción de este bloque se alcanza en la iteración número 213 (ver fig. 4.33).

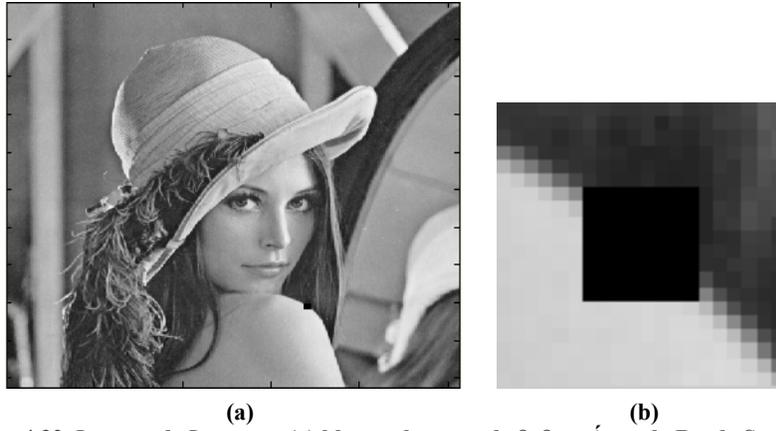


Figura 4.32. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área de Borde Sencillo, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados.

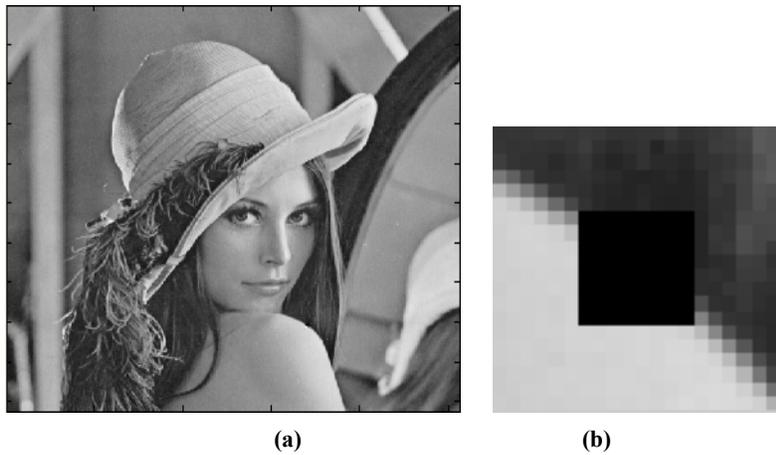


Figura 4.33. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 213 iteraciones.

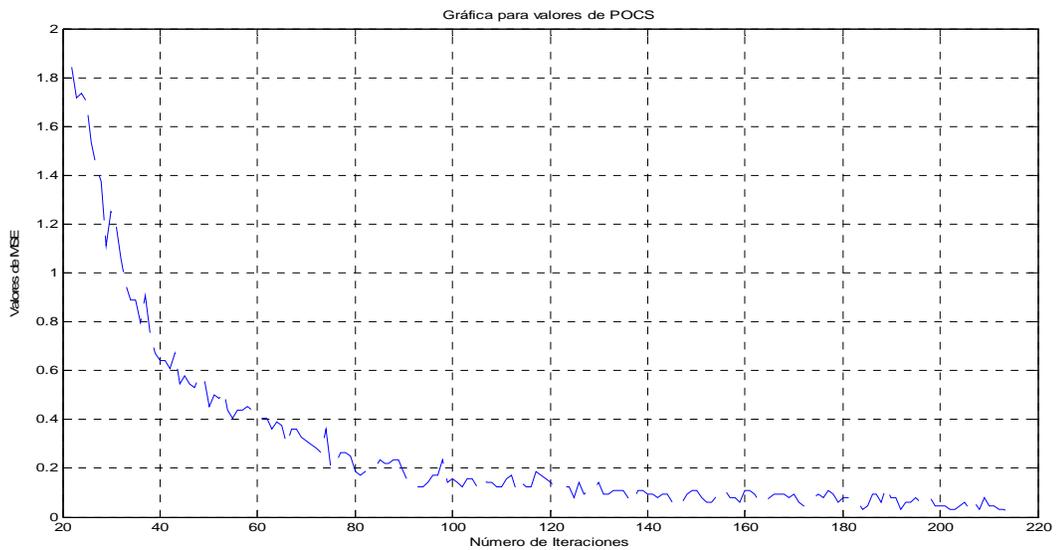


Figura 4.34. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área de borde sencillo (fig. 4.32).

Un área con diversos bordes se tiene en el área de los ojos. La figura 4.35 muestra el bloque dañado en el ojo izquierdo de Lena, para esta área existen diversos bordes. El valor de magnitud del gradiente para este bloque dañado es de 892, con el valor del umbral para la clasificación de bloques dañados usado por Sun y Kwok [34] que es de 5000, este bloque se clasificaría como monótono; por lo que esta clasificación sería errónea, debido a que tenemos un bloque con diversos bordes. Con las pruebas realizadas para obtener el nuevo valor del umbral que es de 800, este bloque dañado se clasifica con su verdadero valor, es decir, como bloque de borde.

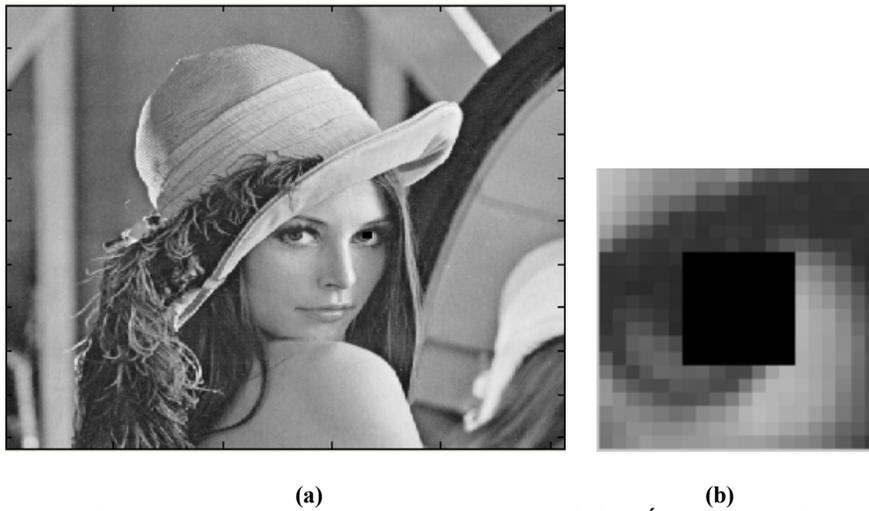


Figura 4.35. Imagen de Lena con (a) bloque de error de 8x8 en Área de Borde Compuesto, (b) bloque compuesto conteniendo el bloque dañado y los bloques vecinos no dañados.

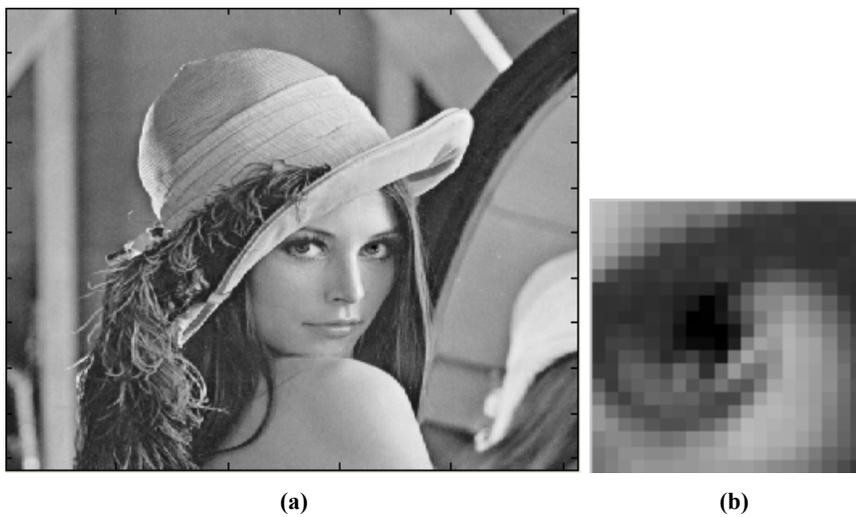
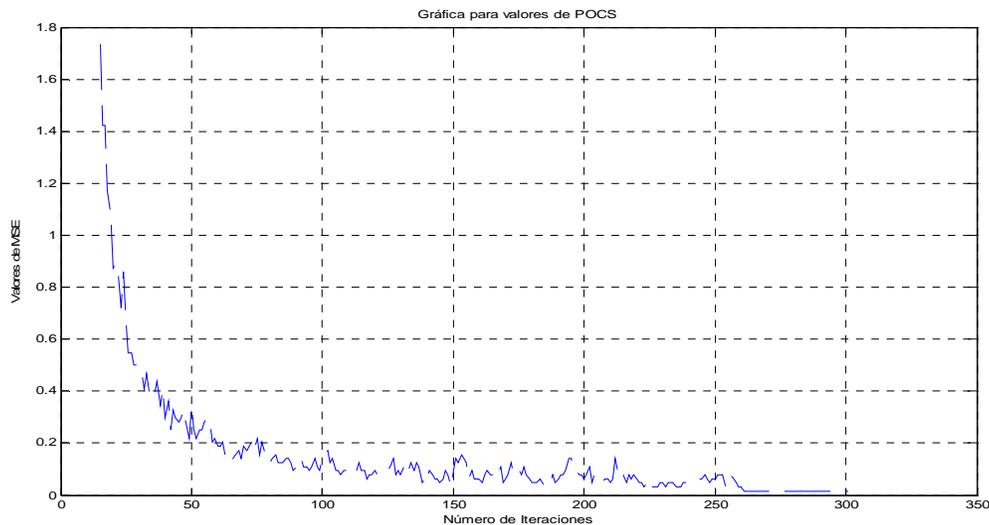


Figura 4.36. Imagen de Lena (a) reconstruida y su correspondiente (b) bloque compuesto después de 300 iteraciones.



**Figura 4.37. Gráfica de valores MSE vs. Iteraciones de convergencia para POCS en imagen con área de borde sencillo (fig. 4.35).**

La figura 4.36 presenta la reconstrucción del bloque dañado obtenida después de 300 iteraciones. Finalmente la figura 4.37 muestra la gráfica de MSE en función de las iteraciones. Para este caso, cabe resaltar que no se encontró el error mínimo de MSE establecido (0.01), por lo que el algoritmo se detuvo en la iteración 300 que es la otra condición de paro.

#### **4.2.2 Conclusión**

La técnica espacial de POCS es una técnica iterativa orientada a preservar los bordes de un área dañada, en este trabajo se realizó la implantación de dicho algoritmo y en esta sección se presentaron los resultados de la simulación de macrobloques con errores aislados. También se realizó la implantación de POCS para diversas configuraciones de error (múltiples macrobloques), en estos resultados no se obtienen las reconstrucciones adecuadas debido a que se encontraron problemas con el algoritmo original propuesto por Sun y Kwok [34] y en esta investigación se modificaron algunas de las fórmulas aplicadas en el algoritmo de POCS, por lo que se reportan únicamente los resultados que llegan a mostrar el comportamiento esperado del algoritmo. Existe trabajo futuro para reducir el tiempo de ejecución reduciendo el número de iteraciones, de manera que la convergencia al mínimo del error sea más rápida, así como para lograr la recuperación de bordes mejorando el filtro pasabanda que en este trabajo no se logró implantar idóneamente.

## 5 TÉCNICAS DE CANCELAMIENTO DE ERROR TEMPORALES

Un problema inherente a los sistemas de transmisión es la disponibilidad de información correctamente recibida, en consideración al hecho de que la pérdida de macrobloques no se presenta de manera aislada, es decir que para el cancelamiento de errores por lo general se tiene la disponibilidad de los macrobloques superior e inferior, además, si el área dañada es mayor a una sola fila de macrobloques el problema es mayor aún [53]. Otro problema se presenta al perder la información que se obtiene a partir de los procesos propios de los módulos de Estimación de Movimiento (ME) y de Compensación de Movimiento (MC) pertenecientes al codificador de video H.264, estos datos que son básicamente Vectores de Movimiento (MV's) y la información de la Diferencia del Desplazamiento de la Imagen (DFD's) y es la información de codificación de las imágenes que es enviada al decodificador para reconstruir los cuadros de la secuencia, por dicho motivo resulta de vital importancia tratar de recuperar o restaurar dicha información. Para resolver tales problemas se hace necesario el uso no solo de información dentro de una sola imagen (espacial) sino que también se debe recurrir a la información disponible en la secuencia de video (temporal). Las técnicas de cancelamiento de error temporales aprovechan las semejanzas que existen entre los cuadros consecutivos de las imágenes dentro de una secuencia de video ya que ésta correspondencia facilita la recuperación de la información perdida. Si se pierde algún dato residual de predicción de movimiento, como son por lo general los Vectores de Movimiento (MV), las técnicas temporales tratan de recuperar los MV's dañados o perdidos en los cuadros adyacentes ya sea, anteriores o posteriores en la secuencia de video. La mayoría de las técnicas dentro de esta clasificación tienen como principal propósito recuperar los MV's perdidos de las imágenes Inter-codificadas (P: Predictive ó B: Bidirectional) [43]-[54], [60], [61], [65] ya que la pérdida de dichos MV's como se ha venido mencionando, solo puede darse para bloques predictivos y la recuperación no se puede realizar en bloques Intra-codificados. Basado en el conocimiento de que las señales de video guardan una estrecha correlación tanto en el dominio espacial como en el temporal el Algoritmo de Acoplamiento de Bordes (BMA) [43], [53], aprovecha este hecho. Esta técnica está recomendada en el software de referencia del códec H.264/AVC [52], [66]. En la siguiente sección se explica la forma de operación de BMA, en la

sección 5.2 se describirá otro método basado en el mismo principio de distorsión de bordes pero enfocado a pérdida de celdas dentro de los paquetes, esta técnica es DMVE, y fue implantada desde el estándar MPEG-2 [49].

### 5.1 BMA (Boundary Matching Algorithm)

La técnica de BMA calcula los MV's que se han dañado o perdido durante la transmisión de la información residual, producto de los anteriormente mencionados procesos de estimación y compensación de movimiento, dicha información residual viaja del codificador al decodificador a través del canal inalámbrico. BMA se basa en la propiedad de una imagen digital con la cual los pixeles adyacentes entre sí tienen una alta correlación espacial, para esto el algoritmo utiliza información espacial, de los bloques vecinos adyacentes al bloque perdido. En primer lugar se observa una medida de la similitud o diferencia mediante una métrica que brinde información acerca de la cantidad de distorsión entre vecindades de pixeles, para ello se calcula MAD (Mean Absolute Difference) en los bordes, superior, inferior, izquierdo y derecho, alrededor del bloque dañado, como se observa en la figura 5.1. Después se reemplaza la información de bordes del bloque dañado con un bloque en el cuadro anterior (información temporal), con un conjunto de MV que la darán la información para situarse en determinado bloque y hacer el cálculo entre la línea de borde adyacente al bloque perdido y la línea del bloque correspondiente al MV candidato.

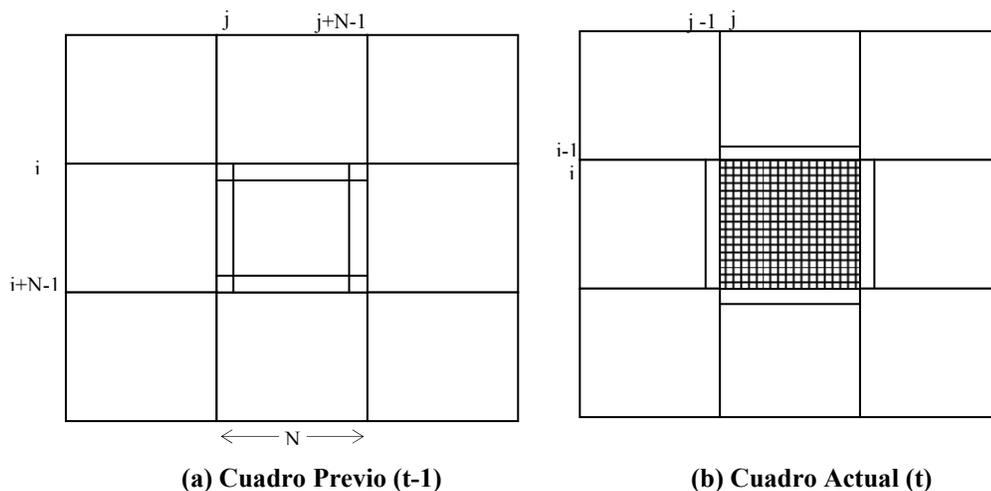
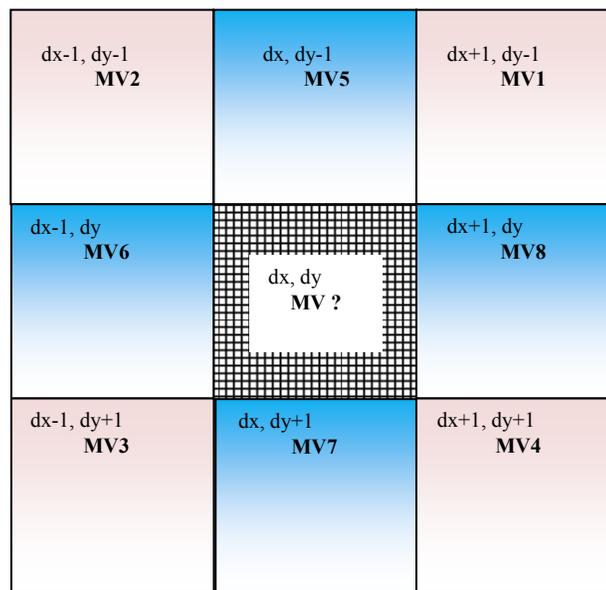


Figura 5.1. Cálculo de MAD usando información espacial entre cuadros (Actual y Previo).

Para hacer el cálculo de MAD se elige un conjunto de MV que son considerados para la estimación de MAD, tal como lo ilustra la figura 5.2:

- MV del bloque en el cuadro anterior en la misma posición al bloque perdido.
- MV's vecinos adyacentes al bloque perdido (Mínimo valor de MAD entre MB's superior, inferior, izquierdo y derecho)
- Mediana de MV's vecinos adyacentes (se utilizan de MV1 a MV8)
- Promedio de MV's vecinos adyacentes (se utilizan de MV1 a MV8)
- MV cero



**Figura 5.2. MV de los bloques vecinos al bloque perdido para el cálculo de MAD.**

Estas cinco opciones pertenecientes al conjunto de MV's candidatos son una modificación al algoritmo BMA originalmente planteado por Lam y Reibman, ya que en el inciso *b* se toma el valor mínimo de MAD entre los MB's vecinos adyacentes, es decir que se toma solo el valor de uno de esos MB's ya sea el MB superior o el inferior o el izquierdo o el derecho y además solo se consideran los MV's de dichos MB's si estos fueron recibidos correctamente o ya habían sido cancelados dado que si alguno de estos cuatro MB's perdió su MV correspondiente, no se considera. Otra modificación consiste en que para los incisos *c* y *d* donde se realiza el cálculo del promedio y la mediana de los

MV's respectivamente, se consideran los ocho MV de los MB's vecinos adyacentes al MB perdido.

En la implantación de BMA realizada en este trabajo se consideran los bordes de los cuatro MB's adyacentes al MB perdido que no tengan errores, para hacer el cálculo de MAD, para cada uno de los cuales se consideran cuatro variaciones entre los bordes de la imagen actual y los bordes interiores del bloque candidato en el cuadro anterior, dichas variaciones están dadas por:

$$MAD_{sup} = \sum_{n=0}^N |f_{act}(i-1, j+n, t) - f_{ref}(i+mv_y, j+mv_x+n, t-1)| \quad 5.1$$

$$MAD_{izq} = \sum_{n=0}^N |f_{act}(i+n, j-1, t) - f_{ref}(i+mv_y+n, j+mv_x, t-1)| \quad 5.2$$

$$MAD_{inf} = \sum_{n=0}^N |f_{act}(i+N, j+n, t) - f_{ref}(i+mv_y+N, j+mv_x+n, t-1)| \quad 5.3$$

$$MAD_{der} = \sum_{n=0}^N |f_{act}(i+n, j+N, t) - f_{ref}(i+mv_y+n, j+mv_x+N, t-1)| \quad 5.4$$

$$MAD_{tot} = MAD_{sup} + MAD_{izq} + MAD_{inf} + MAD_{der} \quad 5.5$$

donde  $f_{act}(\cdot, \cdot, t)$  pertenece a la imagen actual y  $f_{ref}(\cdot, \cdot, t-1)$  pertenece a la imagen de referencia y cada una de las sumatorias de  $MAD$  están asociadas a las distorsiones de los bordes superior, izquierdo, inferior y derecho respectivamente indicados por los subíndices abreviados,  $N$  corresponde al tamaño del macrobloque,  $(i, j)$  es la localidad de cada pixel partiendo del pixel superior-izquierdo en el macrobloque perdido de la imagen actual,  $(mv_y, mv_x)$  corresponden a las componentes asociadas al MV candidato.

El MV ganador será aquel que tenga la menor distorsión de  $MAD_{tot}$  con el que se reemplaza el MB con la posición que indica dicho MV. Sean los valores de pixeles de la DFD dados por  $f_{DFD}(i, j, t)$  y los valores de reconstrucción para la imagen  $t$  denotados por  $f_R(i, j, t)$  donde  $(i, j)$  pertenecen a las coordenadas espaciales del pixel dentro de la imagen. Para reconstruir cada bloque de error en la imagen el MV calculado está dado por  $\widehat{mv}$  y sus componentes horizontal y vertical dadas por  $\widehat{mv}_y$ ,  $\widehat{mv}_x$  respectivamente, entonces el macrobloque de reconstrucción sería:

$$\hat{f}_R(i, j, t) = f_R(i + \hat{m}v_y, j + \hat{m}v_x, t - 1) + f_{DFD}(i, j, t)$$

$$i_0 \leq i < i_0 + N, j_0 \leq j < j_0 + N \dots \dots \dots 5.1.7$$

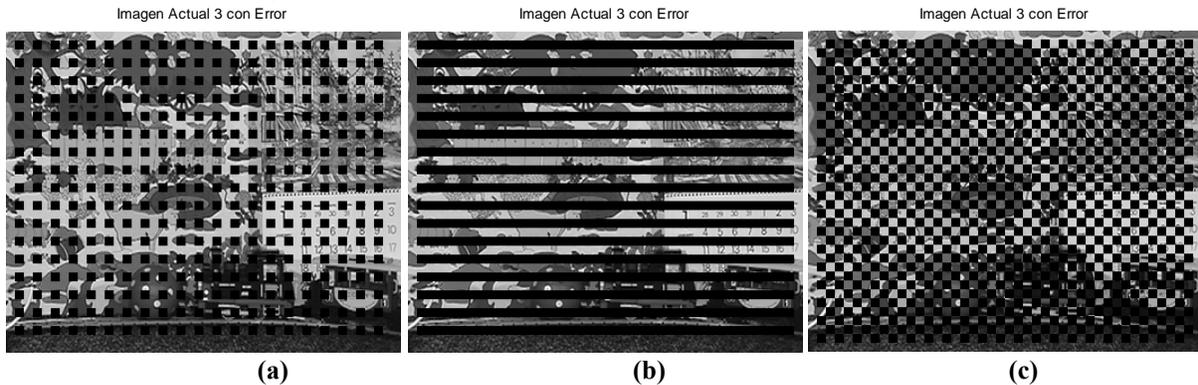
donde  $(i_0, j_0)$  representan la coordenadas del pixel izquierdo-superior del MB perdido. En la siguiente sección se presentan los resultados de la implantación de la técnica temporal de cancelamiento de error BMA explicada anteriormente.

### 5.1.1 Resultados de la implementación del BMA

Las pruebas realizadas al algoritmo BMA fueron implantadas en Matlab, se utilizaron cinco secuencias de video en formato YUV, estas secuencias de video son algunas de las que han sido utilizadas para probar otras técnicas de cancelamiento y que han sido estandarizadas. A partir de cada secuencia de video se extrajeron solamente las componentes de luminancia (componente Y) de los cuadros usados para la implantación de la técnica. Las secuencias de video usadas son Mobile, News, Foreman, Bus y Stefan, se eligieron dichas secuencias con el propósito de tomar distintos patrones de actividad de movimiento, ya que en este grupo de secuencias de video se tienen secuencias con mucho movimiento (Stefan), muy poca actividad de movimiento (News) y con movimiento moderado (Mobile) o donde hay movimiento de la cámara (Bus).

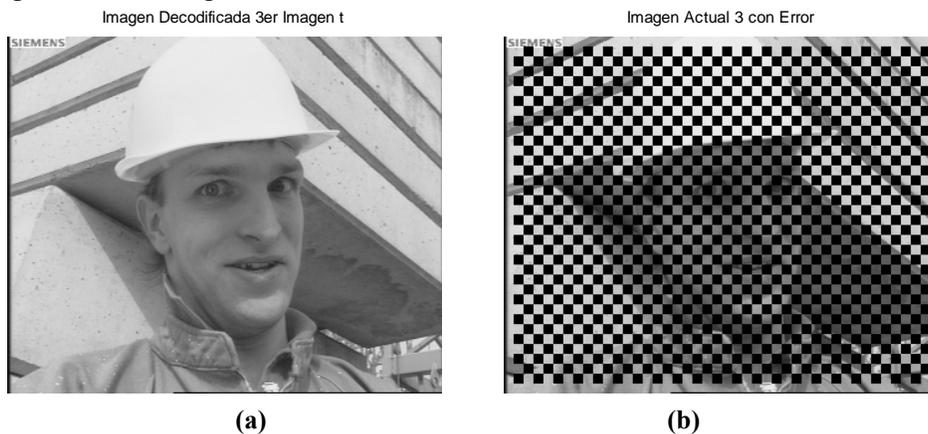
Para obtener los valores de los datos de predicción (MV's, DFD's, cuadros compensados) se realizó la simulación también en Matlab de los procesos de Estimación y Compensación de Movimiento, utilizando las técnicas aplicadas en el codificador de Emparejamiento de Bloques (Block Matching Algorithm), una vez obtenidos los parámetros de movimiento, se hicieron las simulaciones de la pérdida de los MV's. Una vez que se tiene una imagen con pérdida de información de movimiento (MV's) se aplica la técnica de BMA para obtener los resultados necesarios. Los errores que se presentan en la transmisión de canales inalámbricos generalmente se presentan como pérdidas de macrobloques consecutivos, en forma de alguna distribución específica en base a como se halla codificado (FMO), o como una serie de varias tiras de MB's, este hecho fue considerado para realizar las simulaciones de las distribuciones de error. En el capítulo

anterior se consideraron tres tipos de distribución de error, en forma de pérdidas de macrobloques distribuidos en forma uniforme, como tablero de ajedrez (checker board) y en forma de varias tiras horizontales o ráfagas (multiple burst). En la figura 5.3 se muestran los tres tipos de simulaciones de errores.



**Figura 5.3. Simulaciones de tres tipos de distribución de error (a) macrobloques distribuidos de manera uniforme (b) tablero de ajedrez (c) ráfagas.**

En la figura 5.4 (a) se presenta el cuadro actual (t) decodificado perteneciente a la secuencia de video de Foreman y en la figura 5.4 (b) la misma imagen pero con la simulación de la pérdida de los MV's con una distribución de error en forma de tablero de ajedrez para macrobloques de tamaño 8x8.



**Figura 5.4. Imagen decodificada de Foreman (a) sin errores (b) con distribución de error de tablero de ajedrez con MB's de tamaño 8x8.**

La figura 5.5 muestra el resultado de aplicar la técnica de BMA, se obtiene también el valor de MAD promedio a partir de los valores de cada uno de los macrobloques cancelados en la imagen, en este caso dicho valor es de 135.08 con un PSNR de 36.06.

La calidad visual en la imagen reconstruida es notablemente buena, en consideración a la cantidad de información dañada (aproximadamente 50% de información en la imagen).

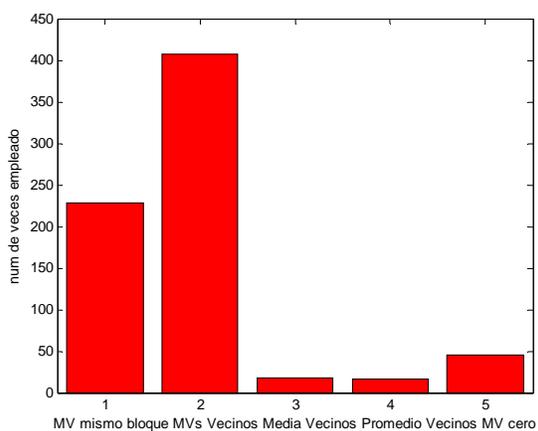
Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 135.0798



El valor PSNR es: 36.061

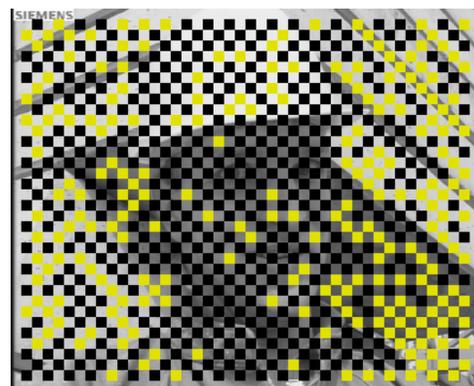
**Figura 5.5. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.4 (b).**

El cancelamiento de errores se realiza para cada macrobloque, por lo que cada uno de ellos es cancelado con un MV distinto, en la figura 5.6 se muestran, tanto la estadística con la incidencia del tipo de MV usado en cada macrobloque de la imagen cancelada, como las imágenes con la ubicación espacial asociada al tipo de MV candidato usado para el cancelamiento con BMA.



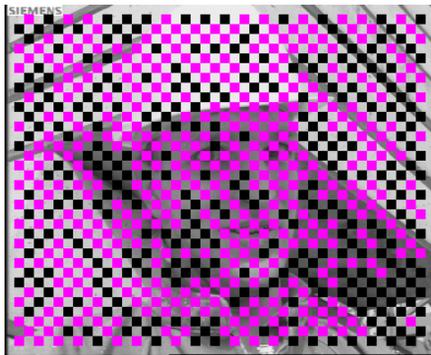
**(a)**

Imagen de bloques cancelados con 1) MV del mismo bloque en la imagen anterior



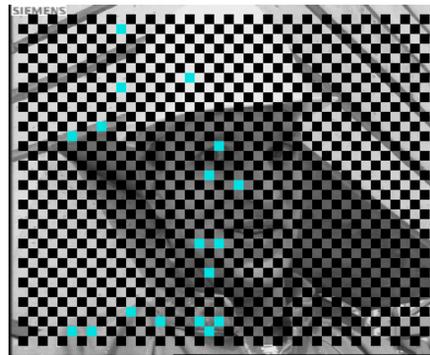
**(b)**

Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



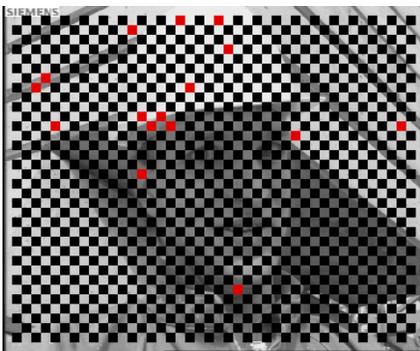
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



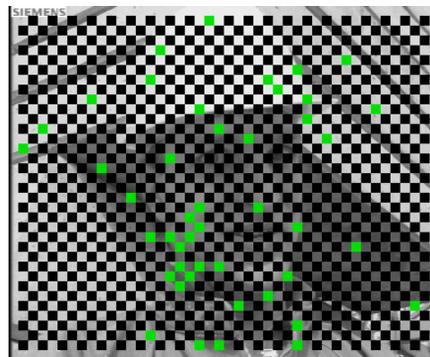
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



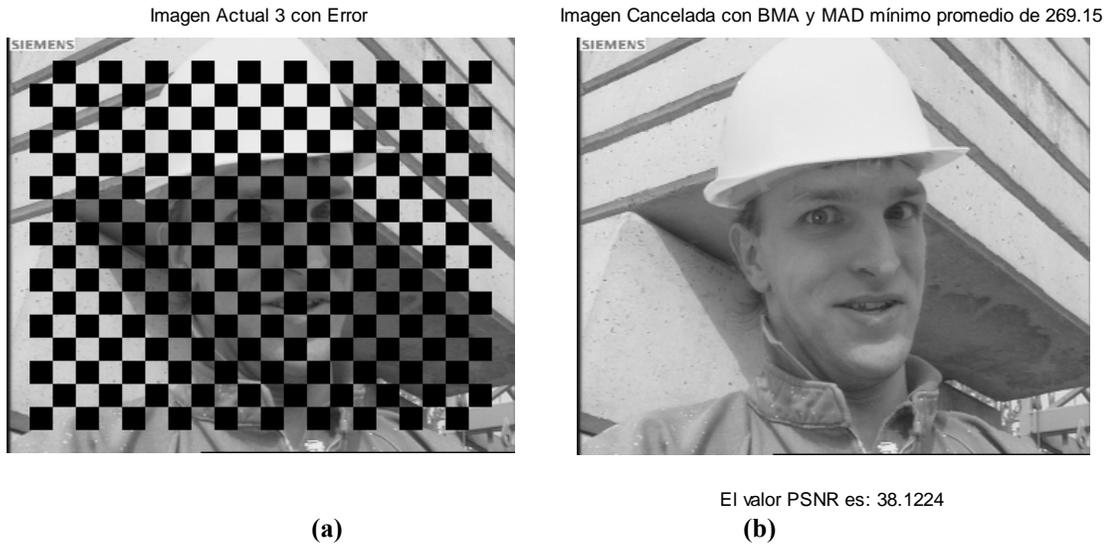
(f)

**Figura 5.6. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Foreman con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 8x8.**

Para la reconstrucción de esta imagen (fig. 5.6) se aprecia en la estadística que el tipo de MV con mayor incidencia es el de los MV's vecinos, alguno de los MV's vecinos adyacentes a la misma localidad del MV perdido en la imagen actual respecto a la imagen anterior se usa para el cancelamiento, Se puede observar que las zonas del rostro en la imagen de Foreman el cancelamiento se realiza con alguno de los MV's vecinos, es decir el MV candidato que más se usa en esta caso, el MV que sigue en cantidad de macrobloques cancelados es el MV de reemplazo, este se emplea en áreas de poco o nulo movimiento, como algunas partes del rostro, algunos bordes, entre otros. Otros pocos MV's son usados con las opciones del MV cero, la mediana y el promedio.

Ahora se cambia el tamaño de macrobloque a 16x16, en la figura 5.7 (a) se muestra la imagen dañada y en la figura 5.7 (b) la imagen con el resultado de aplicar el

cancelamiento temporal con BMA, el valor mínimo promedio para MAD es de 269.15 que es casi el doble del caso anterior con macrobloques de tamaño 8x8, el PSNR de la reconstrucción es de 38.12 con el que se tiene una ganancia de 2 dB's con respecto al caso anterior.



**Figura 5.7. Imagen decodificada de Foreman (a) con distribución de error de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.**

En la figura 5.8 se muestran de manera similar a la figura 5.6 la estadística y la distribución espacial de los MV's candidatos ganadores para hacer el cancelamiento en cada uno de los macrobloques dañados en la imagen. Se puede apreciar casi el mismo comportamiento de cancelamiento de error, pero en este caso se absorbieron algunos de los MV tales como los de la mediana, el promedio y el MV cero y fueron tomados por los MV de reemplazo o vecinos.

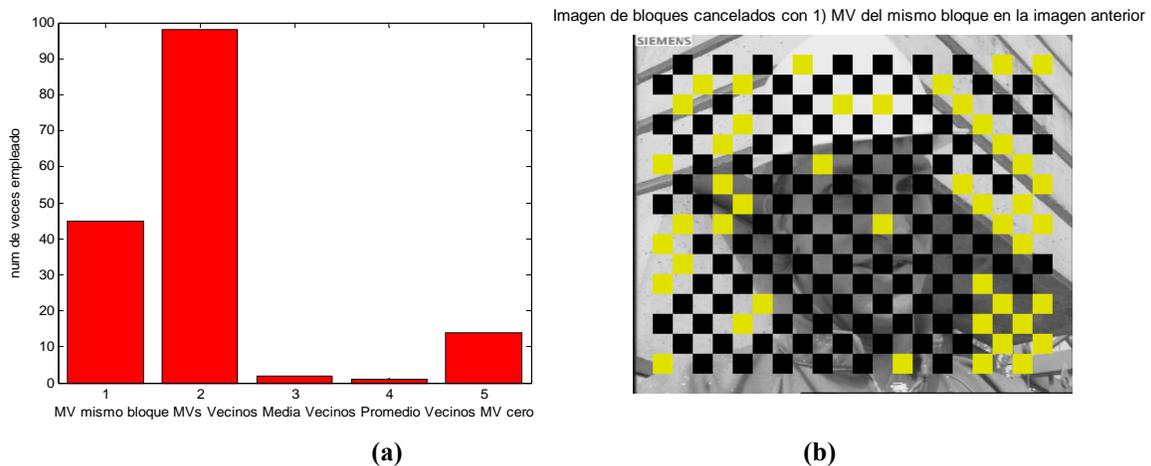
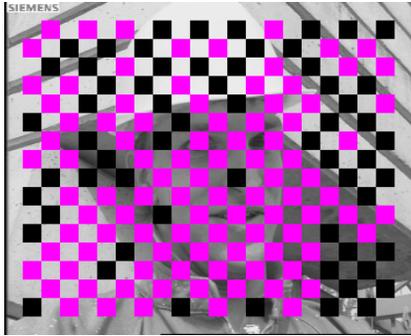
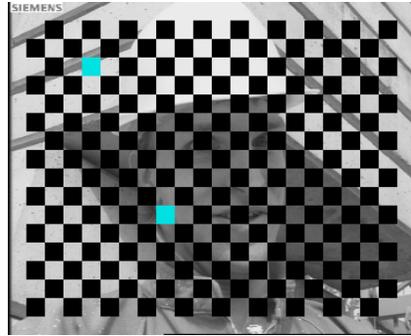


Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



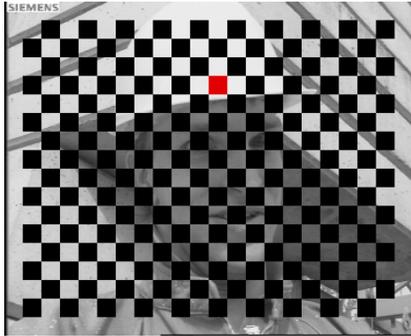
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



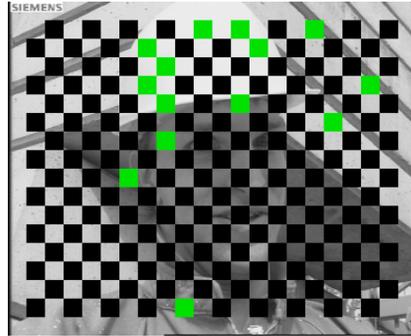
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



(f)

**Figura 5.8. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Foreman con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 16x16.**

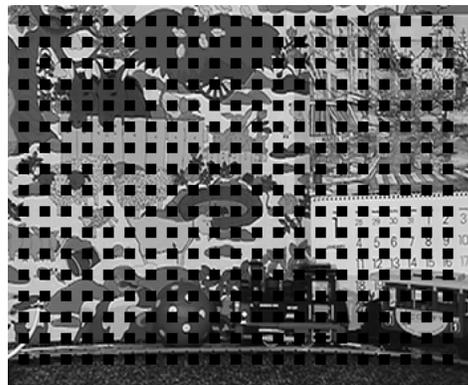
Otra de las secuencias probadas es la de Mobile que se muestra en la figura 5.9 (a), con el propósito de mostrar el comportamiento del cancelamiento de error usando la técnica de BMA en la figura 5.9 (b) se muestra una distribución de error con macrobloques de error dañados de manera uniforme.

Imagen Decodificada 3er Imagen t



(a)

Imagen Actual 3 con Error



(b)

**Figura 5.9. Imagen decodificada de Mobile (a) sin errores (b) con distribución de error uniforme con MB's de tamaño 8x8.**

En la figura 5.10 la imagen reconstruida tiene como valor mínimo promedio para MAD 583.09 y un valor de PSNR de 28.76 que se considera un valor de calidad aceptable, al analizar la calidad visual de la imagen reconstruida que en su mayoría las zonas afectadas fueron recuperadas de forma que la calidad apreciada es muy buena, solamente algunos detalles, como en los números del calendario y las letras pequeñas del mismo son un poco borrosas, así como los círculos blancos de la pelota y un arco blanco de la esquina inferior izquierda de la imagen.

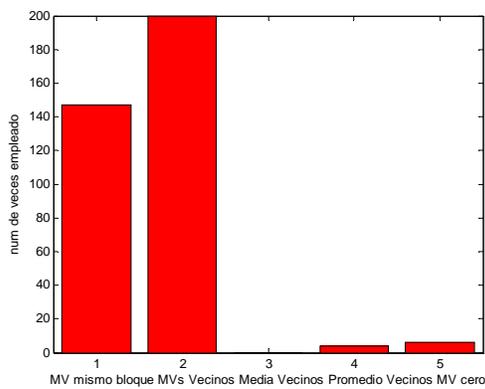
Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 538.0952



El valor PSNR es: 28.761

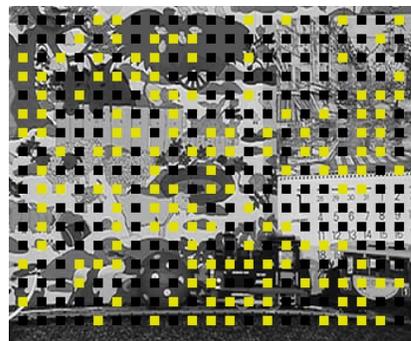
**Figura 5.10.** Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.9 (b).

En la figura 5.11 aparece el MV con mayor incidencia que para este caso es el MV de los MB's vecinos adyacentes al MB dañado, así como las localidades espaciales donde cada MV candidato fue elegido para el cancelamiento con el valor de MAD mínimo.



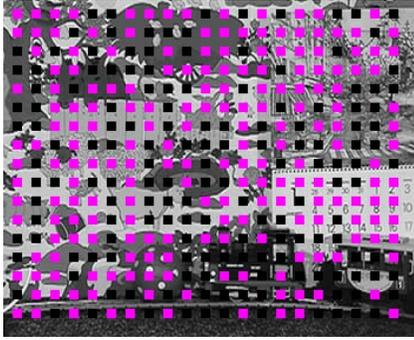
**(a)**

Imagen de bloques cancelados con 1) MV del mismo bloque en la imagen anterior



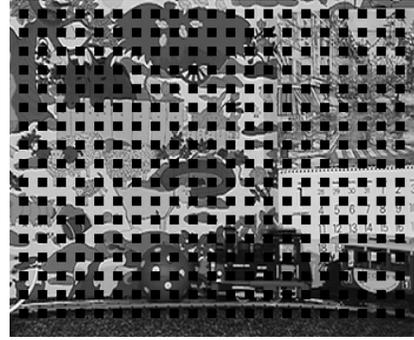
**(b)**

Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



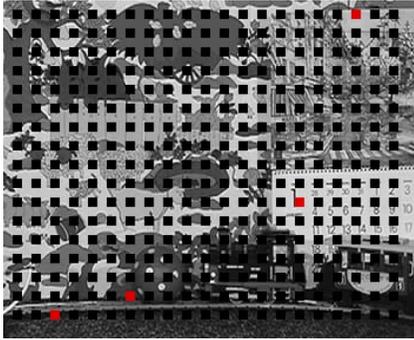
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



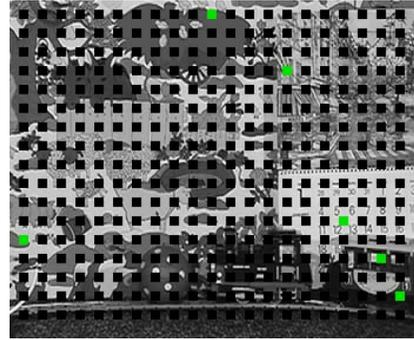
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero

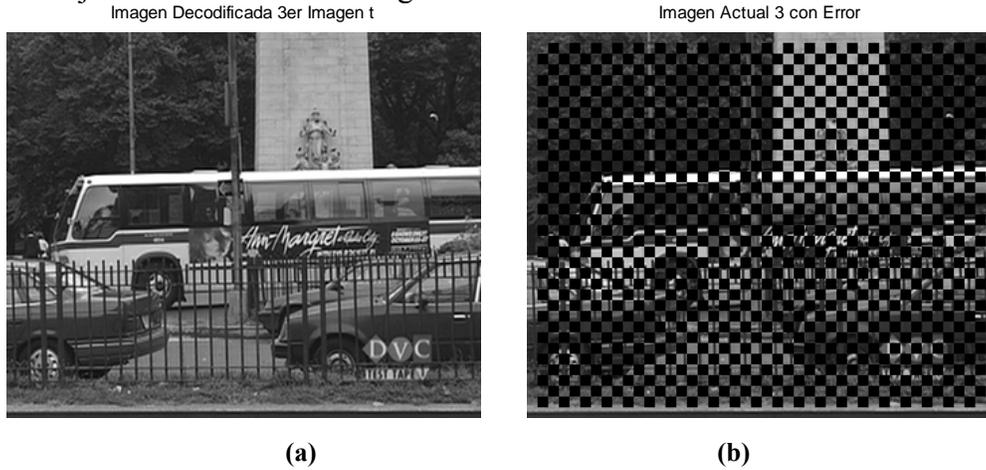


(f)

**Figura 5.11. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Mobile con el tipo de MV usado para una distribución de error uniforme de tamaño de MB de 8x8.**

Si se analizan con cuidado las imágenes que contienen a cada uno de los tipos de MV candidatos se puede ver en la figura 5.11 que para el MV de reemplazo (primera opción en color amarillo) fueron cancelados algunos detalles tales como las letras en el calendario algunas partes con poco movimiento y fuera de las vías del tren. La siguiente opción que es de MV's vecinos adyacentes al MB perdido es la opción con mayor incidencia de MB's cancelados, con estos MV's se cancelan áreas (espaciales) donde existe mayor actividad de movimiento en la secuencia de video. En los MB's dañados que contienen los números del calendario también fueron cancelados con algún MV vecino. En el caso de la opción de la mediana del MV no se tuvo ningún MB cancelado con este MV, para el promedio solo cinco y para el MV cero seis. Ahora se muestra en la figura 5.12 (a) la imagen de la secuencia de video de Bus y en la figura 5.12 (b) está la imagen con una distribución de error de tablero de ajedrez con MB's de tamaño 8x8. Es

relevante mencionar que esta secuencia de video tiene mucho movimiento de la cámara ya que el objeto de la secuencia es seguir al autobús.



**Figura 5.12. Imagen decodificada de Bus (a) sin errores (b) con distribución de error uniforme con MB's de tamaño 8x8.**

Cuando se aplica el cancelamiento de error con BMA a la imagen 5.12 (b) el resultado se puede ver en la figura 5.13 y el mínimo valor promedio de MAD en la imagen cancelada es de 412.96 con un valor de PSNR de 27.438. La calidad visual de la reconstrucción es buena, sin embargo, al apreciar algunos de talles en los bordes verticales de algunos objetos en la imagen tales como los barrotes de la cerca en la imagen se puede observar que el bloque restaurado tiene un desplazamiento ya que no coinciden exactamente dichos bordes de los barrotes.

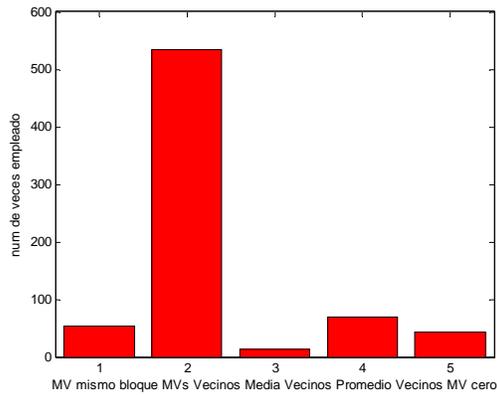
Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 412.9622



El valor PSNR es: 27.4382

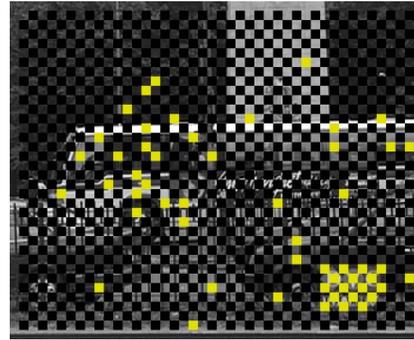
**Figura 5.13. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.12 (b).**

La figura 5.14 muestra al MV ganador del cancelamiento, como en los casos mostrados anteriormente uno de los MV vecinos es el de mayor incidencia de los MB's cancelados, una pequeña porción de la llanta de un carro frente al autobús es cancelado con el MV de reemplazo y algunos MB's cancelados con los MV promedio y de la mediana así como del MV cero.



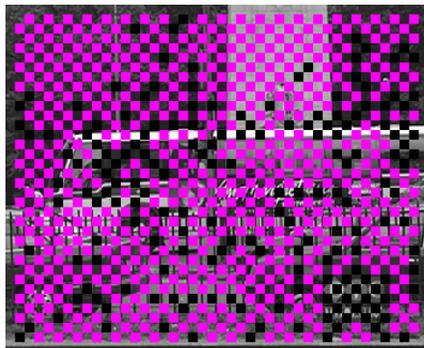
(a)

Imagen de bloques cancelados con 1) MV del mismo bloque en la imagen anterior



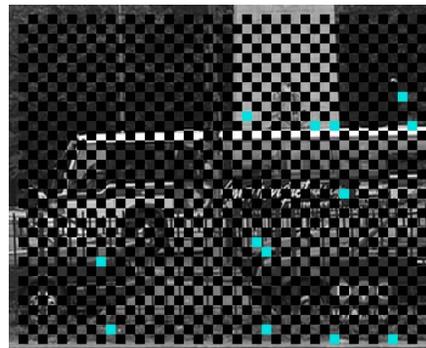
(b)

Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



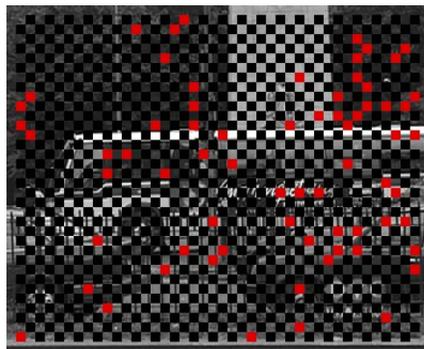
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



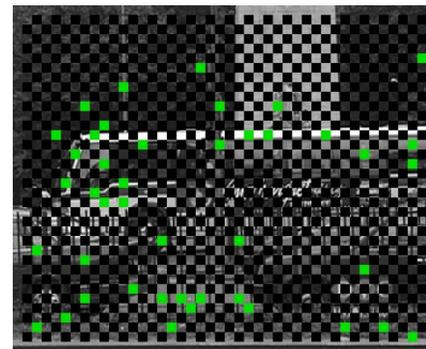
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

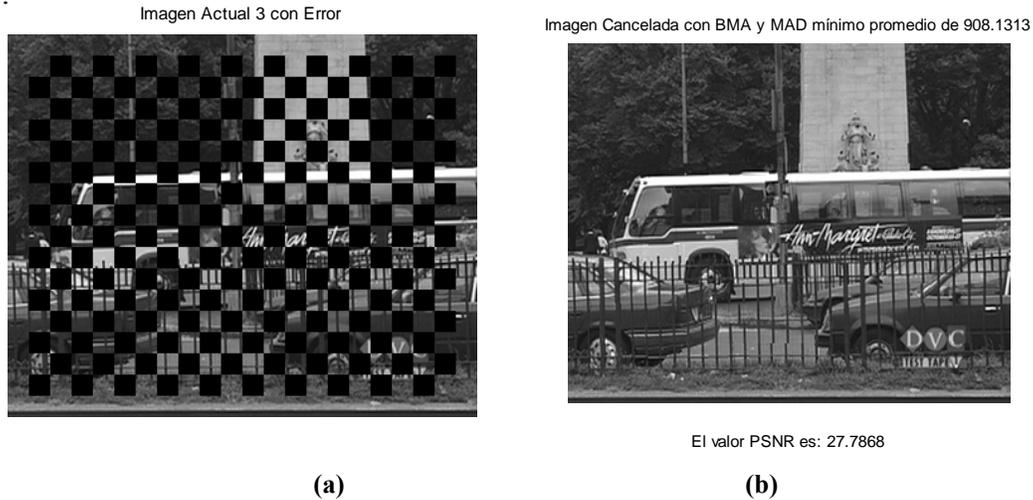
Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



(f)

**Figura 5.14. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 8x8.**

Para la misma distribución de error, pero en tamaño de MB de 16x16, la imagen cancelada de resultado mostrada en la figura 5.15 tiene un valor de MAD de 908.13 y un valor de PSNR de 27.79, en este caso el valor promedio del mínimo de MAD es del doble aproximadamente con respecto al valor de MAD para los MB del caso anterior de tamaño 8x8.



**Figura 5.15. Imagen decodificada de Bus (a) con distribución de error de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.**

En la figura 5.16 se observa la estadística con el MV ganador, en forma similar al caso anterior el MV de los vecinos es el de mayor incidencia, asimismo puede observarse como en el caso del MV de la mediana se absorben los MV que aparecían para el caso de MB de menor tamaño (8x8), es decir, cuando los MB eran más pequeños, se pudieron cancelar más MV dañados con el MV de la mediana y al hacerlos de mayor tamaño (16x16) estos se cancelan con otro tipo de MV ya sea con algún MV vecino o el MV promedio.

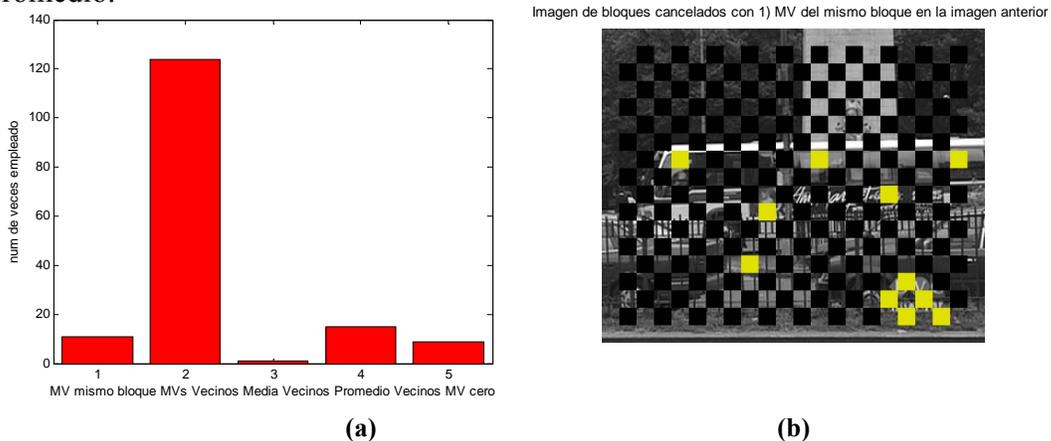
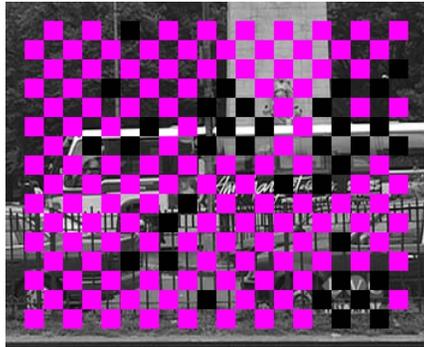
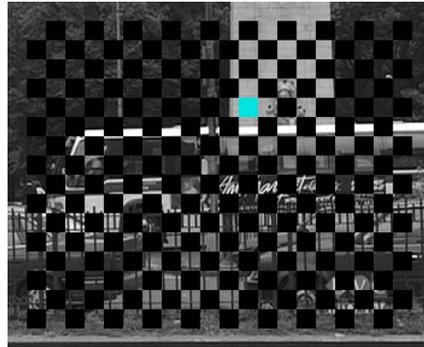


Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



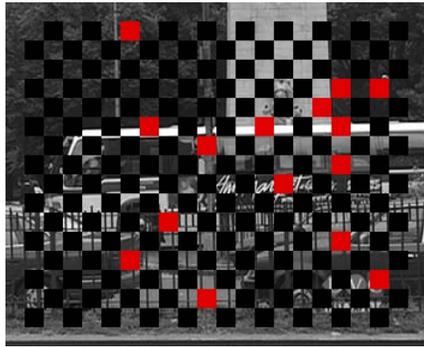
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



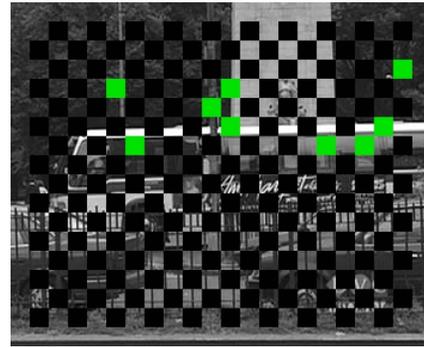
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



(f)

**Figura 5.16. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 16x16.**

Ahora se ejemplifica la misma imagen (Bus) en la figura 5.17 (a), pero con la distribución de error en forma de varias tiras horizontales de MB dañados en la figura 5.17 (b) con un tamaño de MB de 8x8.

Imagen Decodificada 3er Imagen t



(a)

Imagen Actual 3 con Error



(b)

**Figura 5.17. Imagen decodificada de Bus (a) sin errores (b) con distribución de error en forma de ráfagas con MB's de tamaño 8x8.**

La imagen reconstruida aplicando cancelamiento con BMA se muestra en la figura 5.18, con un valor de MAD de 971.323, con un valor de PSNR es de 25.17, que en comparación con la otra distribución (tablero de ajedrez), tiene un déficit de dos dB's. Nuevamente las partes con bordes verticales como en los barrotes como en el caso anterior son los que no se reconstruyen con precisión.

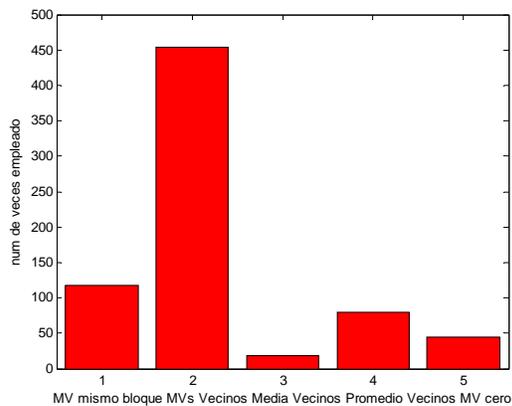
Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 971.3277



El valor PSNR es: 25.1722

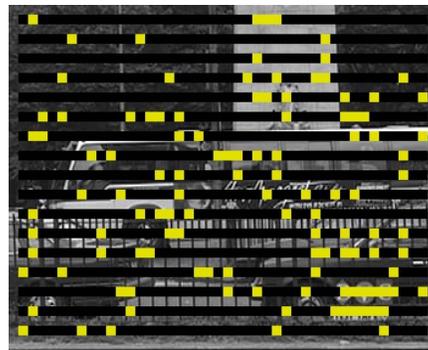
**Figura 5.18. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.17 (b).**

En la figura 5.19 se muestra tanto la estadística como cada una de las imágenes donde se muestra la localidad espacial donde fue cancelado cada uno de los MB's dañados y su correspondiente tipo de MV elegido para el cancelamiento. En este caso también el MV de mayor incidencia es el de MV's vecinos.



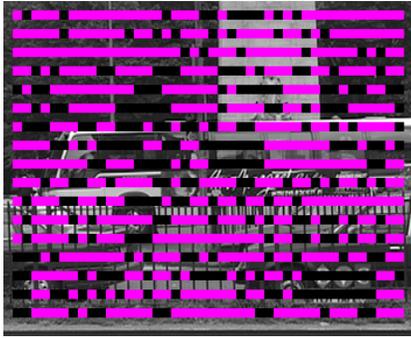
**(a)**

Imagen de bloques cancelados con 1) MV del mismo bloque en la imagen anterior



**(b)**

Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero

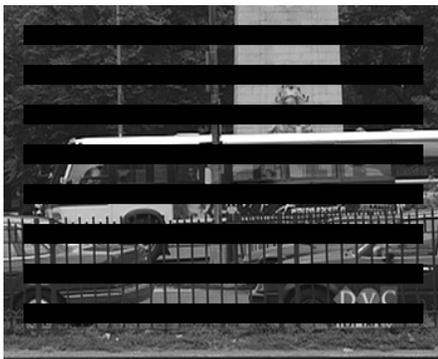


(f)

Figura 5.19. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error de ráfagas de tamaño de MB de 8x8.

En la figura 5.20 (a) se presenta la misma distribución de error con un tamaño de MB de 16x16, y en la figura 5.20 (b) la imagen cancelada con BMA con un valor mínimo promedio de MAD de 1955.11 y un PSNR de 24.39, se observa un buen resultado final aunque con problemas en bordes horizontales en parte del monumento y los barrotes.

Imagen Actual 3 con Error



(a)

Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 1955.1125

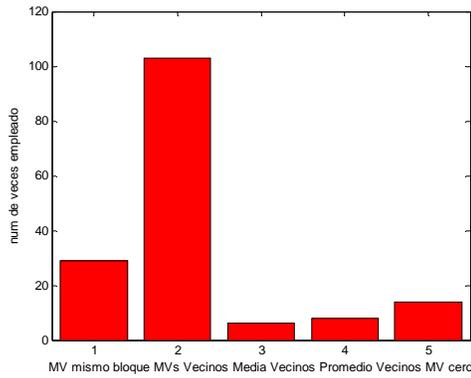


El valor PSNR es: 24.39

(b)

Figura 5.20. Imagen decodificada de Bus (a) con distribución de error en forma de ráfagas en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.

En la figura 5.21 se aprecia nuevamente la tendencia ganadora del MV de los vecinos adyacentes, con las mismas características para el cancelamiento dado que los MB's son de tamaño 16x16, entonces se tiene que algunos MB's que en el caso de MB's de tamaño 8x8 eran cancelados con un tipo de MV como el de mediana, promedio y el cero, ahora son cancelados con otro tipo de MV como los MV's vecinos.



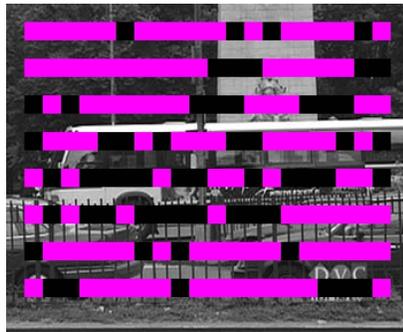
(a)

Imagen de bloques cancelados con 1) MV del mismo bloque en la imagen anterior



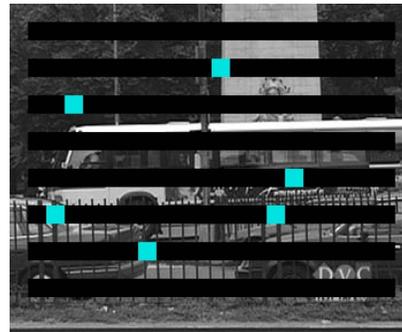
(b)

Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



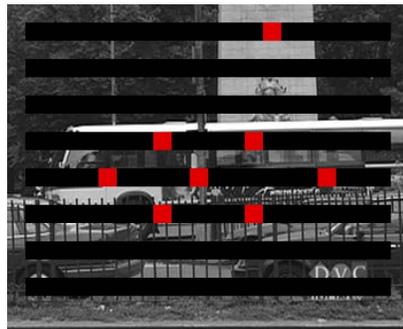
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



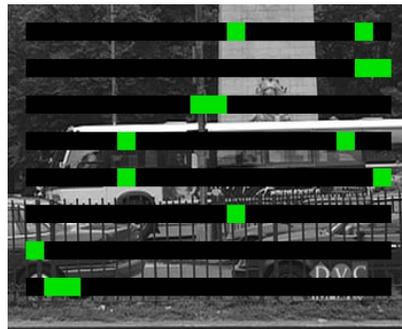
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

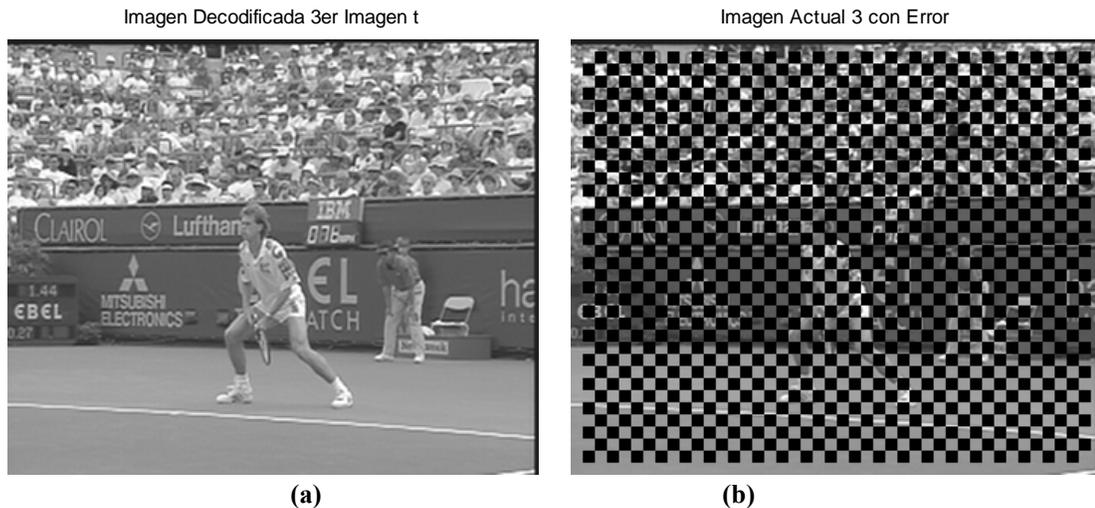
Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



(f)

**Figura 5.21. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Bus con el tipo de MV usado para una distribución de error en forma de ráfagas de tamaño de MB de 16x16.**

También se analizó otra imagen caracterizada por tener movimiento rápido, en la que se toma la escena de un jugador de tenis de nombre Stefan, la figura 5.22 (a) muestra la imagen decodificada sin errores y en la figura 5.22 (b) se simulan errores de forma de tablero de ajedrez en toda la imagen con MB's de tamaño 8x8.



**Figura 5.22. Imagen decodificada de Stefan (a) sin errores (b) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez con MB's de tamaño 8x8.**

Si se aplica BMA a esta imagen dañada se observa en la figura 5.23 el resultado del cancelamiento con esta técnica, es evidente que se recupera en buena medida la totalidad de la información, sin embargo, el analizar con cuidado algunas áreas de la imagen por ejemplo en el rostro del jugador, así como los bordes en las piernas, los brazos, algunos detalles en el público y las letras no guardan un seguimiento apropiado de los bordes. En general, la restauración de la imagen es buena y en cuanto a los resultados del cancelamiento se obtiene un valor de MAD mínimo promedio de 383.06 y un PSNR de 27.83 que es un valor de calidad objetiva bueno. Considerando la cantidad de información perdida y el tipo de secuencia analizada, es evidente que la técnica de BMA es una buena opción para la restauración de mucha información con la ayuda de los cuadros adyacentes que brinden información temporal.

Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 383.0602



El valor PSNR es: 27.8292

**Figura 5.23. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.22 (b).**

En la figura 5.24 se puede ver que sigue la tendencia de los MV's vecinos como la opción con mayor presencia, de forma similar a los resultados anteriormente expuestos, en contraste con el MV de la mediana que sigue siendo el de menor incidencia con solo tres MB's cancelados con este MV. Para áreas de la imagen con más movimiento el MV mayormente usado es alguno de los MV's vecinos, para otras zonas con movimiento y otras partes en la cancha y algunas partes del público se utiliza el MV de reemplazo, algunas otras partes de MV perdidos en el público, los letreros y la cancha fueron cancelados ya sea con los MV del promedio y el MV cero.

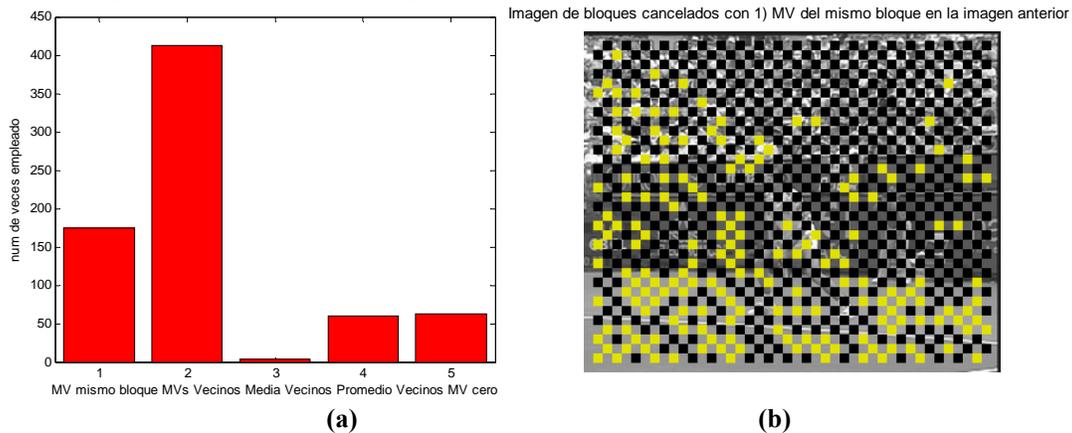
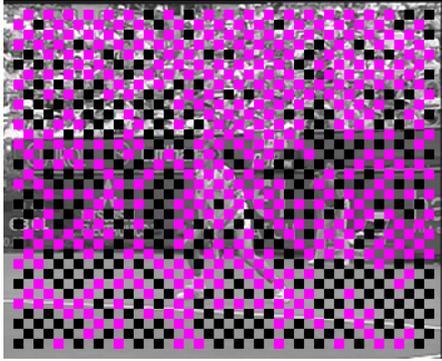
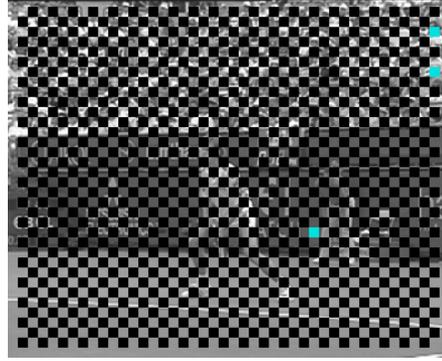


Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



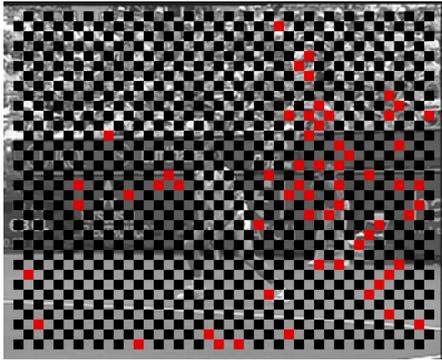
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



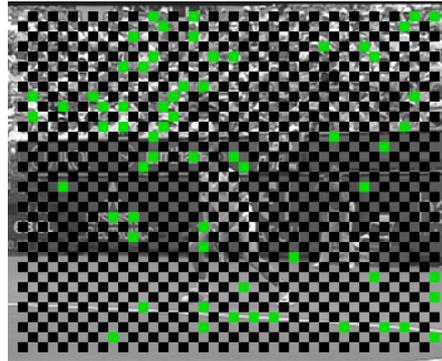
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero

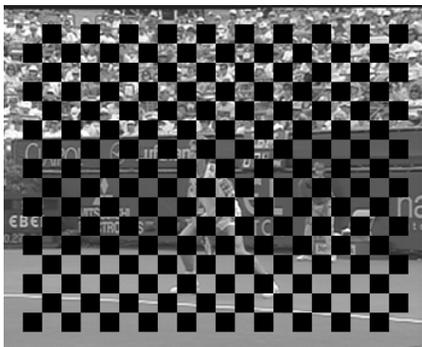


(f)

**Figura 5.24. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Stefan con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 8x8.**

En la figura 5.25 (a) se tiene la misma imagen con el mismo tipo de morfología de error, solo que el tamaño de MB es de 16x16, a la izquierda (fig. 5.25 (b)) se muestra el cancelamiento con BMA.

Imagen Actual 3 con Error



(a)

Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 749.825

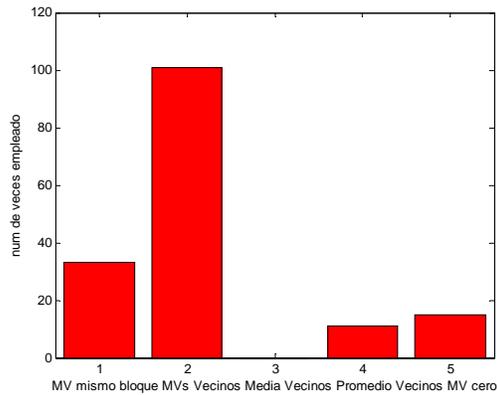


El valor PSNR es: 29.5544

(b)

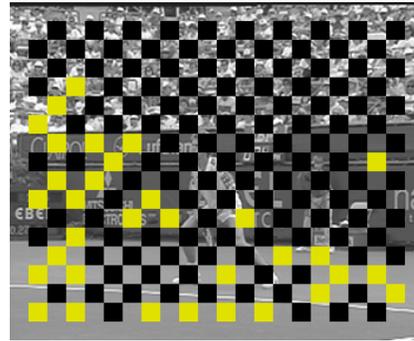
**Figura 5.25. Imagen decodificada de Stefan (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.**

El mínimo valor promedio de MAD para la figura 5.25 (b) es de 749.82 que es aproximadamente del doble que para el mismo tipo de distribución de error, solo que con tamaño de MB de 8x8 y un PSNR de 29.55, se distinguen algunos detalles en las piernas del jugador y en los bordes de su rostro que son algo borrosos, pero tanto el valor de PSNR como la calidad visual son buenas.



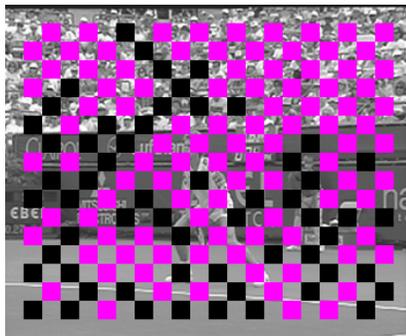
(a)

Imagen de bloques cancelados con 1) MV del mismo bloque en la imagen anterior



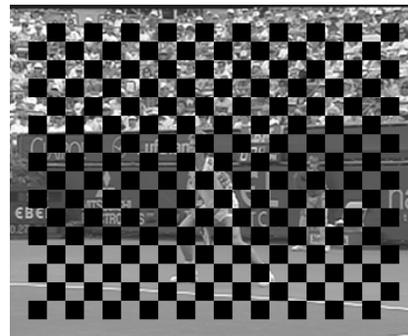
(b)

Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



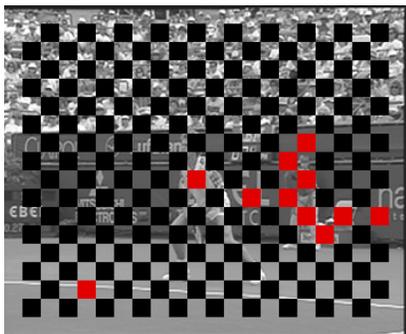
(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



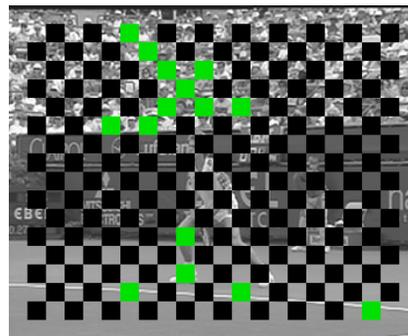
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

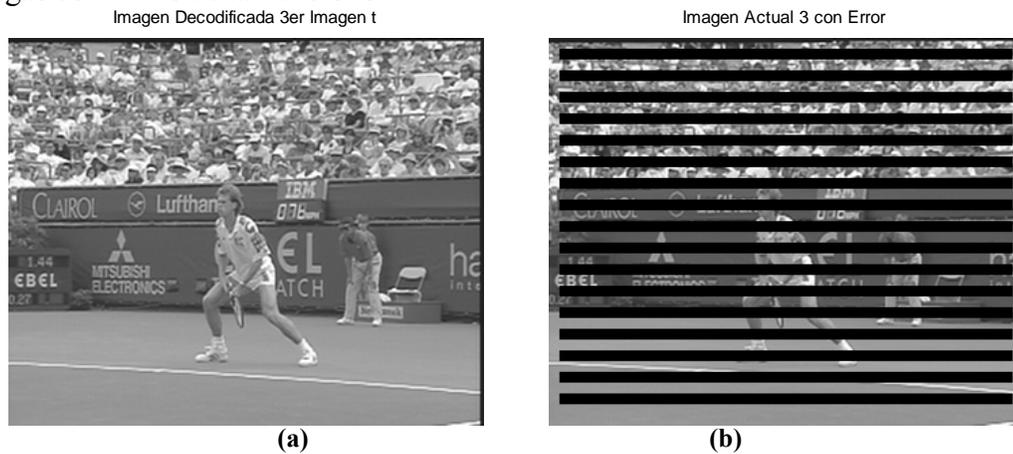
Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



(f)

Figura 5.26. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Stefan con el tipo de MV usado para una distribución de error de tablero de ajedrez de tamaño de MB de 16x16.

En la figura 5.26 se observa la estadística del MV ganador, se puede ver que el MV más empleado para el cancelamiento vuelve a ser alguno de los MV vecinos disponibles y el segundo más usado es el de reemplazo, seguido de los MV promedio y el MV cero, en este caso no se usa el MV de mediana. Abajo, la figura 5.27 (a) con la imagen decodificada de Stefan y a la izquierda la figura 5.27 (b) con una distribución de errores de ráfagas con MB's de tamaño 8x8.



**Figura 5.27. Imagen decodificada de Stefan (a) sin errores (b) con distribución de error en forma de ráfagas con MB's de tamaño 8x8.**

En la figura 5.28 se muestra la imagen restaurada con BMA con un valor de MAD mínimo promedio de 1356.49 y un PSNR de 27.5 existe una mayor distorsión en el rostro las piernas y pies del jugador, los letreros y una parte de la línea de la cancha.

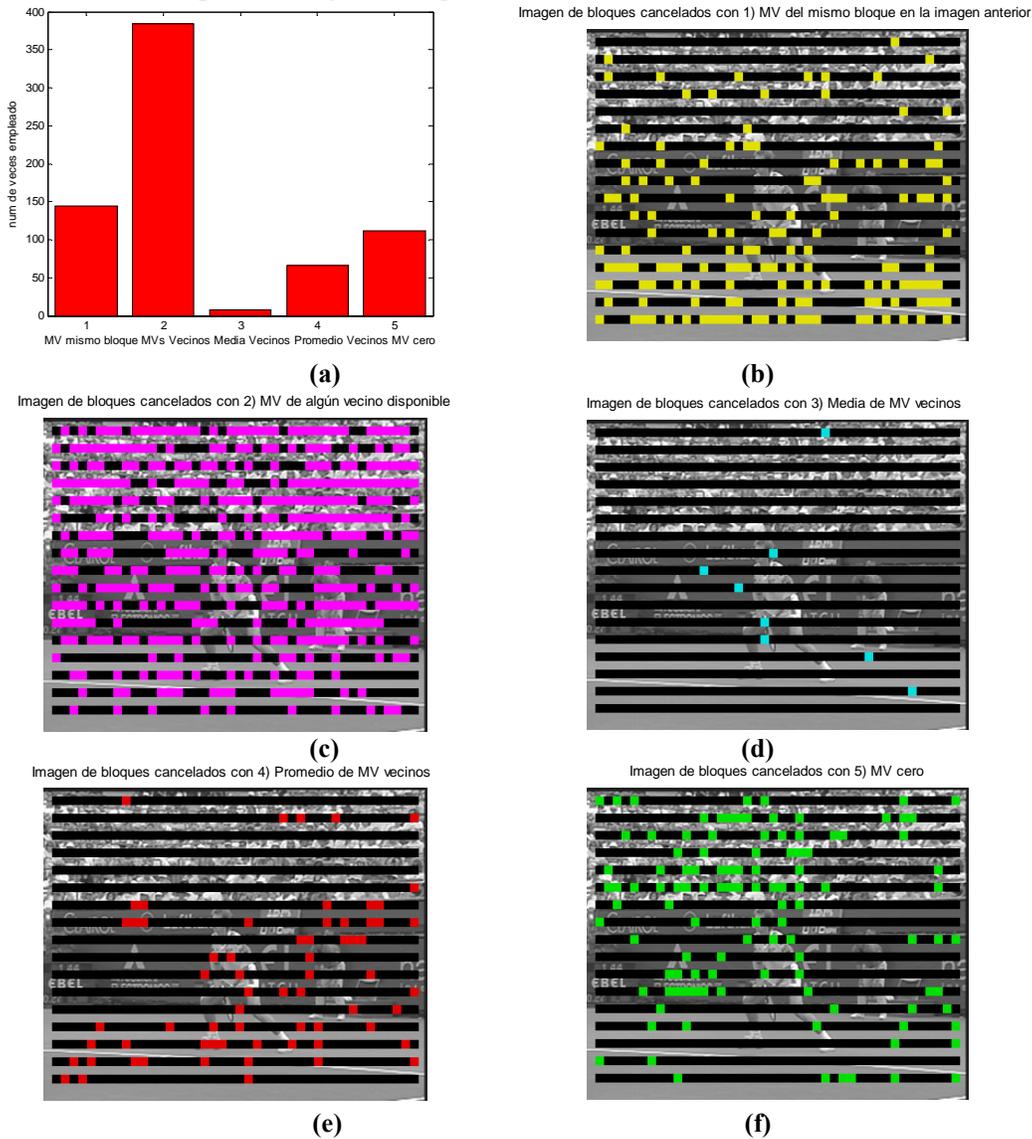
Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 1356.4916



El valor PSNR es: 27.5088

**Figura 5.28. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.27 (b).**

Se observa en la figura 5.29 que la tendencia del MV ganador como alguno de los MV's vecinos se sigue manteniendo, una gran parte del área del público se cancela con este tipo de MV así como las zonas de mayor cantidad de movimiento, seguido del MV de reemplazo que cancela otras áreas de la cancha de juego así como algunas partes de los letreros, el MV cero cancela otras partes del público y otras partes de los letreros y del jugador con el MV promedio y solo algunos con el MV de mediana.



**Figura 5.29. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de Stefan con el tipo de MV usado para una distribución de error de ráfagas de tamaño de MB de 8x8.**

A continuación se presenta una imagen decodificada sin errores, de la secuencia de video News en la figura 5.30 (a), en la figura 5.30 (b) a la izquierda se encuentra la imagen con errores en forma de MB's distribuidos de manera uniforme.



**Figura 5.30. Imagen decodificada de News (a) sin errores (b) con distribución de error en forma uniforme con MB's de tamaño 8x8.**

En la figura 5.31 se presenta la imagen cancelada con un valor mínimo promedio de MAD de 188.97 y un PSNR de 43.37 que es un valor muy bueno y se aprecia una imagen muy nítida con una muy buena calidad visual.

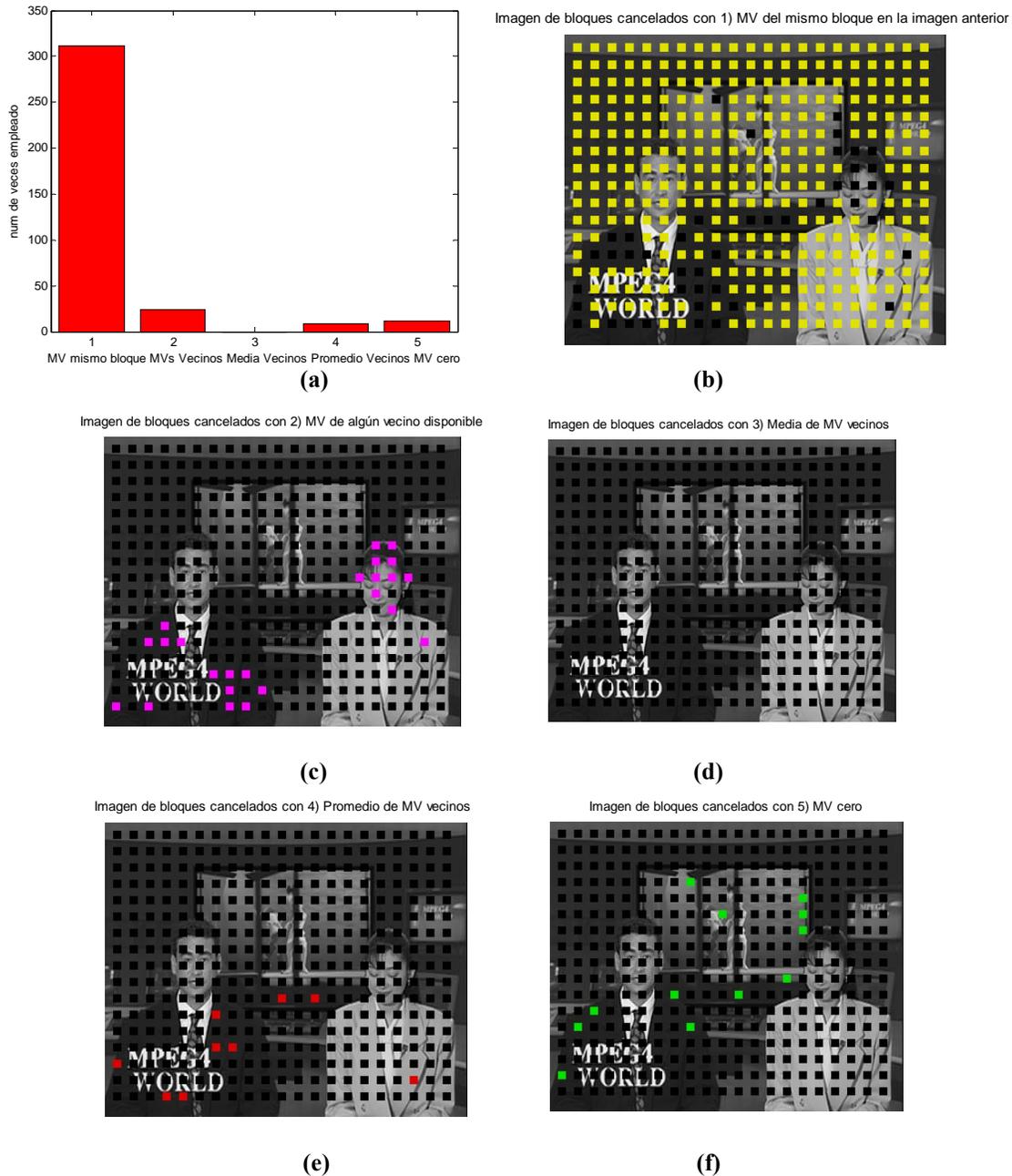
Imagen Cancelada con BMA y MAD mínimo promedio de 188.9468



El valor PSNR es: 43.3724

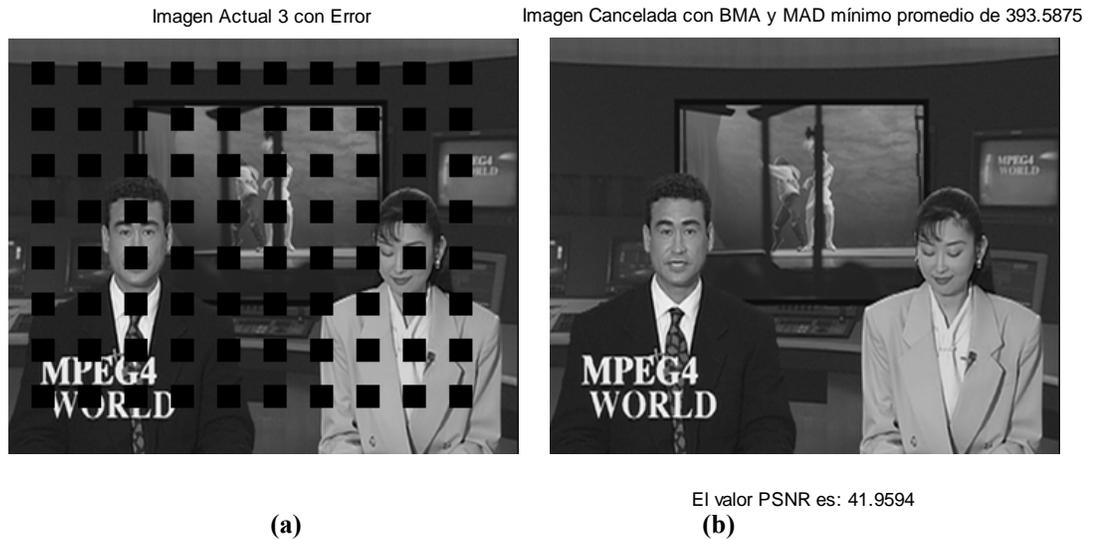
**Figura 5.31. Imagen reconstruida a partir de los errores en la figura 5.30 (b).**

Se decidió mostrar esta secuencia de video al final para apreciar la diferencia con las demás secuencias, en la figura 5.32 se presentan la estadística y las imágenes que muestran cada uno de los tipos de MV para hacer el cancelamiento en la imagen, en esta secuencia a diferencia de las pruebas anteriores el MV más utilizado es el de reemplazo, esto debido a que la secuencia de News tiene muy poco movimiento, esto facilita la reconstrucción y sus resultados son bastante buenos.



**Figura 5.32. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de News con el tipo de MV usado para una distribución de error uniforme de tamaño de MB de 8x8.**

En la figura 5.33 (a), se tiene la imagen de News con errores también de tipo uniforme pero ahora en MB's de tamaño 16x16, en la figura 5.33 (b) se muestra la imagen reconstruida con valor mínimo promedio de MAD de 393.59 que es casi el doble que para MB's de 8x8 y un PSNR de 41.96.



**Figura 5.33. Imagen decodificada de News (a) con distribución de error en forma uniforme en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con BMA.**

En este caso también vuelve a ser el MV ganador el de reemplazo, como se observa en la figura 5.34 donde muy pocos MV's son usados para el cancelamiento aparte del MV de reemplazo, por ejemplo, en las áreas donde existe movimiento como el rostro de la reportera, el MV utilizado es el de los MV's vecinos, algunos con el MV cero, uno con el MV promedio y ninguno con el MV de mediana.

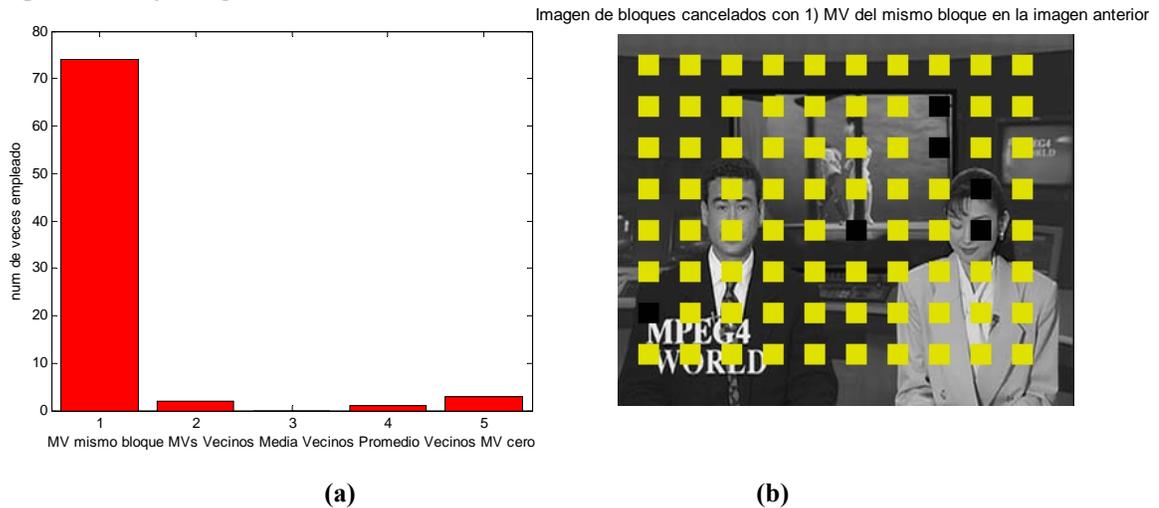
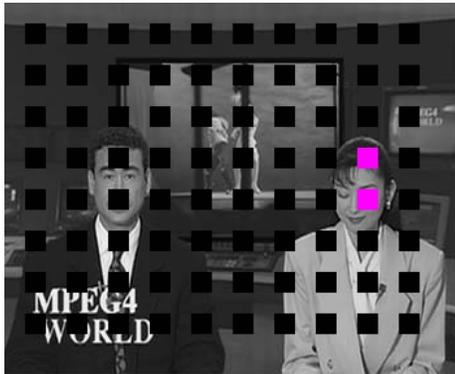


Imagen de bloques cancelados con 2) MV de algún vecino disponible



(c)

Imagen de bloques cancelados con 3) Media de MV vecinos



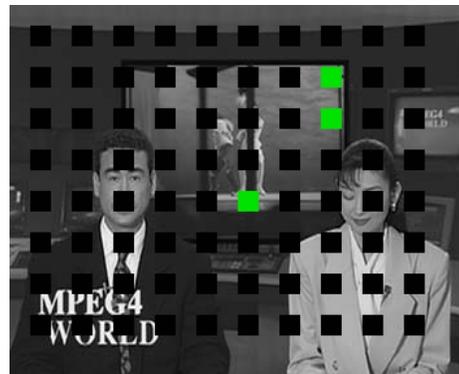
(d)

Imagen de bloques cancelados con 4) Promedio de MV vecinos



(e)

Imagen de bloques cancelados con 5) MV cero



(f)

**Figura 5.34. Estadística e imágenes de la ubicación en la imagen de News con el tipo de MV usado para una distribución de error uniforme de tamaño de MB de 16x16.**

La tendencia en cuanto al tipo de MV que fue más usado para el cancelamiento con BMA probada en los otros tipos de distribuciones de error es muy similar, ya que el MV de mayor incidencia es el MV de reemplazo. Enseguida se dan las conclusiones acerca de la técnica implantada para BMA y los resultados que se presentaron en esta sección.

Para ejemplificar el cancelamiento con el tipo de MV de mayor incidencia a continuación se muestra un ejemplo en el que se aplicó el cancelamiento con BMA únicamente con la opción de los MV vecinos a una imagen de la secuencia de Bus con error en distribución de tablero de ajedrez (figura 5.35.a) y su correspondiente imagen cancelada (figura 5.35.b).

Imagen Actual 3 con Error

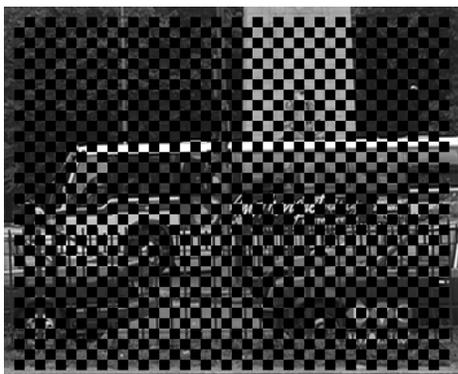


Imagen Cancelada con BMA con opción 2) de MVs vecinos y MAD mínimo promedio de 430.5938



El valor PSNR es: 24.5209

(a)

(b)

**Figura 5.35. Imagen decodificada de Bus (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con BMA con MV vecinos.**

Ahora en la figura 5.36 se muestra la imagen cancelada con el MV de la mediana de todos los MV vecinos que es la opción de menor incidencia y se observa que el valor de PSNR es menor al reconstruido con la opción de alguno de los MV vecinos. Aunque en algunas secciones la reconstrucción de MV vecinos deja una mala reconstrucción visible.

Imagen Cancelada con BMA con opción 3) Media de MV vecinos y un MAD mínimo promedio de 675.6583



El valor PSNR es: 22.0092

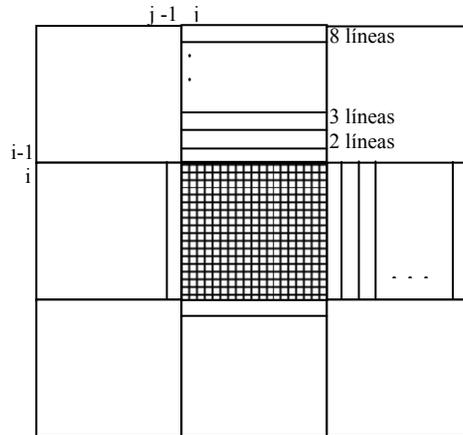
**Figura 5.36. Imagen reconstruida con BMA usando solamente la mediana de MV's vecinos.**

### **5.1.2 Conclusión**

Con las pruebas realizadas, se obtuvieron distintos tipos de resultados dependiendo el tipo de secuencia utilizada para el cancelamiento. El motivo principal de simular estos tipos de configuraciones que son típicos en medios inalámbricos está orientado a tener una aproximación cercana del rendimiento de estos algoritmos. Cuando se tiene información de movimiento tal como los MV's estos algoritmos funcionan muy bien, es decir que se puede restaurar la imagen con buenos resultados. Al aplicar estas técnicas en las secuencias de video de Bus y de Stefan, los resultados muestran la dificultad que existe para obtener un seguimiento adecuado de los bordes ya que no es el objetivo que persiguen estos algoritmos, entonces cuando una secuencia se caracteriza por tener mucho movimiento o existen cambios de escena los resultados pueden ser inexactos o tener valores de PSNR muy bajos

### **5.2 DMVE (Decoder Motion Vector Estimation)**

El algoritmo DMVE inicialmente propuesto en [49] al igual que BMA, tiene como objetivo estimar con precisión los vectores de movimiento de cualquier MB perdido usando información correctamente recibida en el decodificador. Mientras BMA utiliza correlación espacial para estimar los de vectores de movimiento, el algoritmo DMVE principalmente explota la correlación temporal en el proceso de estimación. Como se explica más adelante, un proceso similar a la estimación de movimiento realizado en el codificador se utiliza para calcular los vectores de movimiento que faltan. Cuando se produce la pérdida de células, se toman varias líneas (de dos a ocho) de información alrededor de cualquier MB perdido. Esto incluye la información del MB encima del MB perdido (aunque este MB ya ha sido cancelado), el MB por debajo del MB perdido (si se reciben correctamente), y el MB a la izquierda del MB perdido (aun si es un MB cancelado). Además, incluye píxeles anterior-izquierdo (incluso si es un MB cancelado) y MBs por debajo-izquierda (si se reciben correctamente) para completar el cerco del MB perdido. Si suponemos que sólo dos líneas circundantes se utilizan y que todos los MBs necesarios en el cuadro actual están disponibles, entonces los píxeles utilizados son como se muestra en la figura 5.37.



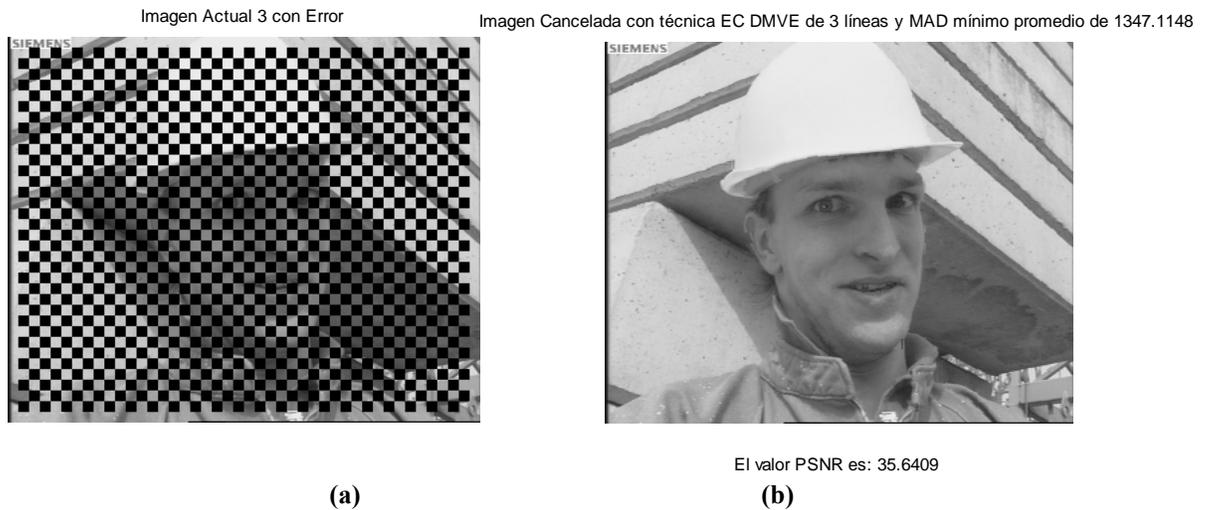
**Figura 5.37.** Cálculo de MAD con ancho variable de líneas de pixeles para DMVE.

Para la implantación de este algoritmo primero se realizaron las pruebas para dos líneas de ancho, después se cambió el ancho a tres líneas, posteriormente se extendió este ancho hasta ocho líneas. Dadas las pruebas que se hicieron se encontraron los valores más bajos de MAD en la segunda línea, para el caso de las tres líneas los valores más bajos de las comparación entre las líneas de ancho variable se encontraba hasta la tercera línea, para las pruebas de las ocho líneas fueron muy escasos o nulos los casos en que se encontró el valor mínimo de MAD en la cuarta a la octava línea del ancho, además de que para este caso se requería mucho más tiempo de procesamiento.

Encontrando un balance entre todas las pruebas realizadas se tomo la decisión de implantar DMVE con tres líneas de ancho variable, con lo que enseguida se muestran los resultados de dicha implantación al algoritmo.

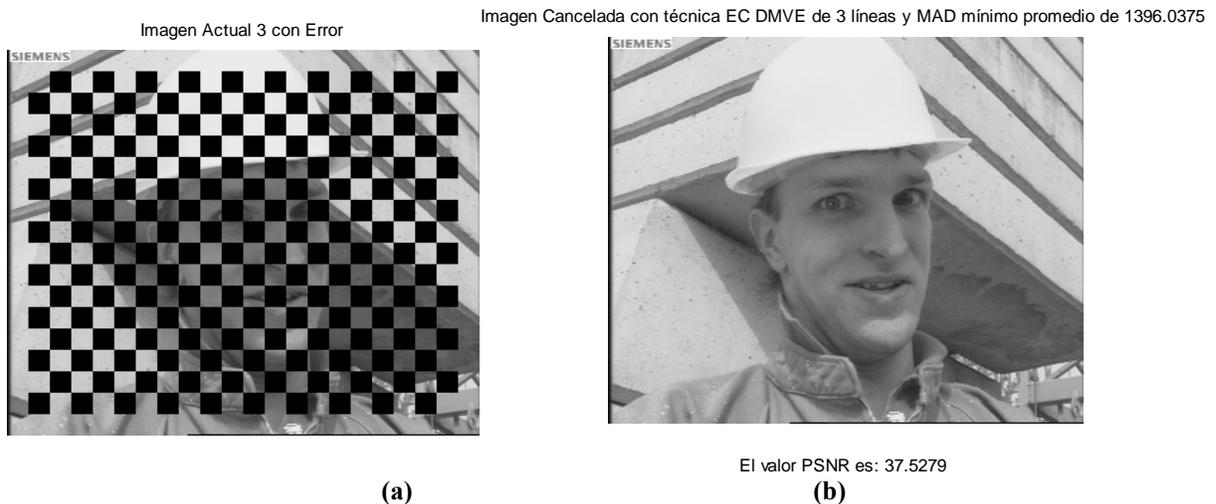
### **5.2.1 Resultados de implantación para DMVE**

Al implantar el cancelamiento de error con DMVE de tres líneas a la imagen de Foreman que se observa en la figura 5.38 (a) con pérdidas de información en forma de tablero de ajedrez para MB's de tamaño 8x8, el resultado de aplicar esta técnica se muestra en la figura 5.38 (b), con un PSNR es de 35.64 y un valor de MAD de 1347.11.



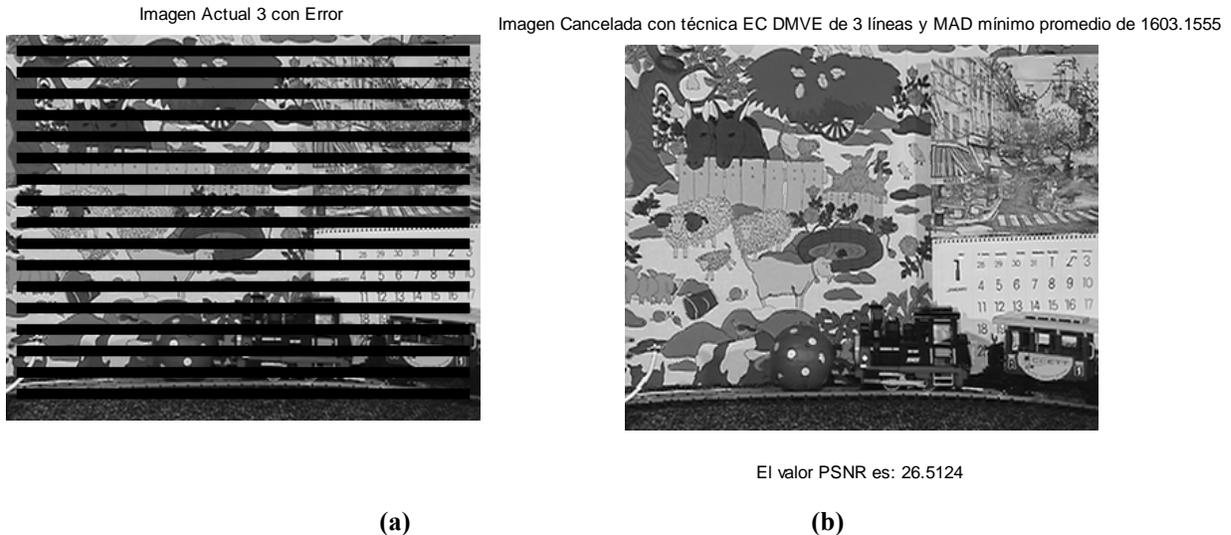
**Figura 5.38. Imagen decodificada de Foreman (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.**

El valor de PSNR es casi medio dB menor que el valor obtenido en BMA y el valor de MAD es mucho mayor, pero como se observa en la figura 5.39 donde la imagen tiene la misma distribución de error, aunque el tamaño de los MB's es del doble la reconstrucción tiene un valor de MAD muy similar y también se obtiene un valor de PSNR de medio dB en comparación con la reconstrucción para BMA. Aunque existe una disimilitud en cuanto a valores de MAD para el mínimo valor promedio en la imagen, los resultados son muy aproximados entre BMA y DMVE.



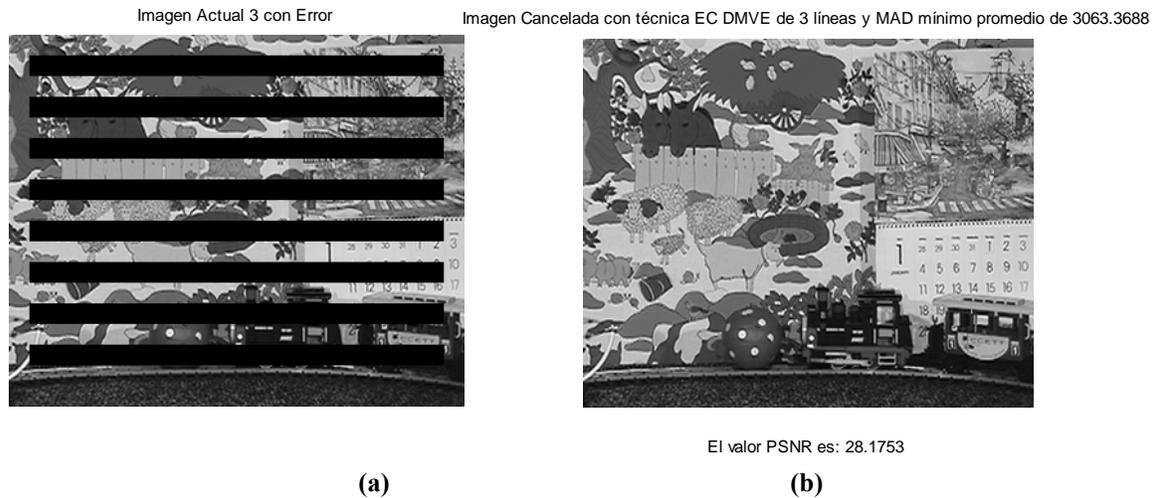
**Figura 5.39. Imagen decodificada de Foreman (a) con distribución de error en forma de tablero de ajedrez en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.**

Para la secuencia de Mobile se muestra en la figura 5.40 (a) la pérdida de MV que se ven reflejados en la imagen decodificada en el cuadro actual con una distribución en forma de múltiples ráfagas horizontales con tamaños de MB's de 8x8. En la figura 5.40 (b) se presenta el resultado de aplicar el cancelamiento de DMVE de tres líneas a la imagen antes mencionada. El valor de PSNR es de 26.51 con un valor de MAD mínimo promedio de 1603.155.



**Figura 5.40. Imagen decodificada de Mobile (a) con distribución de error en forma de ráfagas en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.**

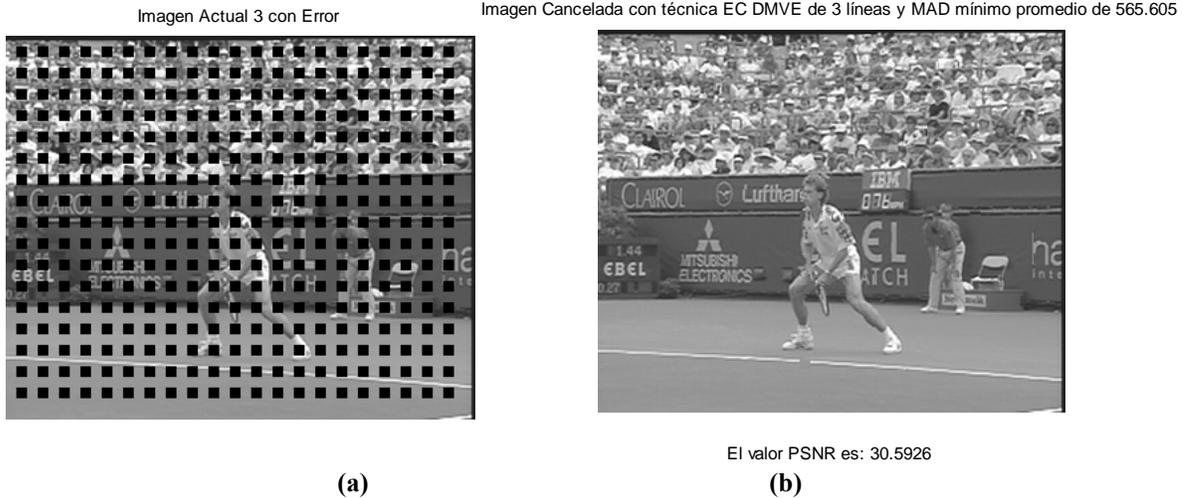
Los resultados de reconstrucción en la figura 5.40 son bastante buenos con respecto a la calidad de apreciación visual, de manera similar en cuanto a la calidad objetiva con el valor de PSNR, solamente algunos detalles en los números del calendario son algo borrosos. En cambio para la figura 5.41 (b) que es la imagen reconstruida a partir de la imagen dañada de la figura 5.41 (a) que tiene la misma distribución pero en MB's de tamaño 16x16, se obtiene un muy buen resultado visual con un valor de MAD de 3060.37 y un PSNR de 28.18.



**Figura 5.41. Imagen decodificada de Mobile (a) con distribución de error en forma de ráfagas en MB's de tamaño 16x16 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.**

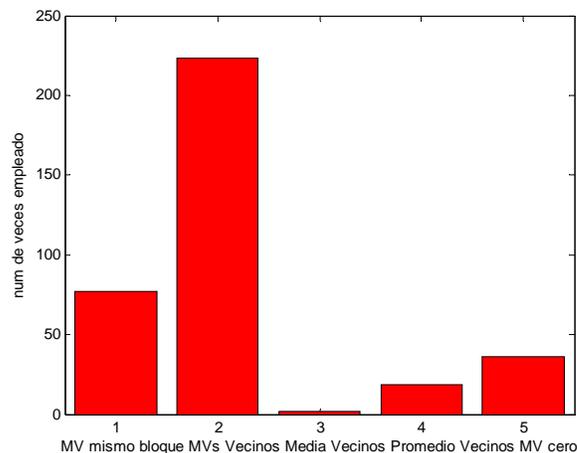
La secuencia de video Mobile que se presentó en las figuras 5.40 y 5.41 está caracterizada por tener un movimiento suave pero finalmente contiene cierto movimiento en los objetos dentro de la secuencia afecta la reconstrucción temporal en cierta medida, el propósito de presentar los resultados obtenidos con las distribuciones en forma de ráfagas es la de poder analizar la capacidad del algoritmo y la calidad con este tipo de pérdidas que para otros algoritmos es más difícil de restaurar.

En la figura 5.42 (a) se muestra la imagen de una secuencia considerada con mucho movimiento que es la de Stefan con pérdidas en forma de MB's distribuidos de manera uniforme y en la figura 5.42 (b) se puede apreciar el resultado del cancelamiento con DMVE de tres líneas con un valor mínimo promedio de MAD de 565.60 y un PSNR de 30.59 que es un buen valor de PSNR y la calidad de la imagen deja algunos detalles en la línea de la cancha por ejemplo que no son correctamente reconstruidos, así como algunos detalles en los bordes de la camisa del jugador y su rostro así como en el público y los letreros de la cancha.



**Figura 5.42. Imagen decodificada de Stefan (a) con distribución de error en forma de uniforme en MB's de tamaño 8x8 (b) cancelada con DMVE de 3 líneas.**

Las secuencias utilizadas para aplicar la técnica de DMVE muestran de forma similar al cancelamiento con BMA que el MV candidato de mayor incidencia en casi todas ellas es el MV de los MB's vecinos adyacentes al MB dañado a cancelar, para ejemplificar esto en la gráfica de abajo (fig. 5.43) se puede observar la incidencia del MV ganador que es el MV de los MB's vecinos como en la mayoría de situaciones y de secuencias de video probadas, esta estadística es perteneciente a la imagen de Mobile cancelada de figura 5.42 (b).



**Figura 5.43. Estadística de incidencia de MV aplicados en cada MB de error para la imagen cancelada en fig. 5.42 (b)**



En la siguiente sección se realiza la conclusión acerca del cancelamiento realizado con la técnica temporal de DMVE de tres líneas.

### **5.2.2 Conclusión**

La restauración realizada con DMVE fue probada tanto para un ancho de dos líneas como para tres y ocho líneas para encontrar un equilibrio entre ellas y se observaron los valores mínimos de MAD en cada una de esas modalidades, para lo que como se mencionó anteriormente en algunas de las pruebas y dependiendo el tipo de área espacial se encontró que hasta la tercera línea de píxeles se podían encontrar valores mínimos de MAD. Por lo anterior se consideró razonable mostrar los resultados de las pruebas hechas a esta modalidad de DMVE ya que para el caso de DMVE con un ancho variable de ocho líneas era demasiado el tiempo de procesamiento requerido.

Los valores de PSNR fueron muy similares aunque en algunas de las ocasiones oscilaron entre valores un poco más bajos e iguales a los obtenidos en BMA, es importante resaltar el hecho que uno mismo podría apreciar una mejor restauración en la calidad de la imagen y obtener un valor de PSNR más bajo en comparación entre uno y otro algoritmos.

La principal limitación que enfrentan los algoritmos temporales como BMA y DMVE es cuando se trata del seguimiento de bordes, en caso de una discontinuidad que se dé en zonas como los rostros que se caracterizan por tener detalles finos, cuando existe una variación grande en las intensidades de dos bordes adyacentes y también cuando no se cuenta con información temporal (MV y DFD's), como puede presentarse cuando se pierde información de la primer imagen dentro de la secuencia de video (Intra-codificada).

El PSNR se calcula para una sola de las imágenes, es decir para la imagen actual que es la imagen cancelada, ya que en este trabajo se realizó la simulación de la codificación de tres imágenes consecutivas y la simulación de errores en una sola de las imágenes que es la imagen actual en el tiempo  $t$ .

## Conclusión general

En la presente investigación se analizaron diferentes enfoques de resistencia a errores para transmisión de video inalámbrica. También se realizó el estudio del último estándar de codificación de video H.264/AVC con el propósito de entender los mecanismos de prevención y resistencia a errores propios del *CODEC* (en*CO*der/*DE*Coder) estandarizado, así como para tener un panorama general de la estructura, jerarquía y organización de una secuencia de video, además de los mecanismos de transmisión de la señal de video. Dentro del análisis de los enfoques de resistencia a errores se puntualizó el estudio sobre diferentes técnicas de cancelamiento de errores que son aplicadas en el decodificador que es el encargado de restaurar una señal dañada. Después de un análisis exhaustivo de los diferentes tipos de técnicas de cancelamiento de error se eligieron dos de las técnicas de cancelamiento espacial estudiadas y después fueron implantadas, en una de esas técnicas espaciales se realizó una optimización que permite la reconstrucción de una imagen de video con distintas configuraciones de errores. Para la técnica espacial de Interpolación Direccional donde se realizaron modificaciones a esta técnica se obtuvieron mejoras en los resultados con respecto al algoritmo original ya que este trabaja únicamente para macrobloques de error aislados. Dichas optimizaciones fueron aplicadas a las configuraciones de error que presentan mayor grado de dificultad para las técnicas de cancelamiento que presentan pérdidas de grandes áreas espaciales dentro de una imagen. En la otra técnica espacial no se obtuvieron los resultados esperados, ya que se encontraron dificultades en la implantación de un filtro pasa-bajas dado que la definición del algoritmo original aplica al filtro una operación que aplicado a orientaciones verticales y horizontales resulta indefinida, por lo que para estos bordes con inclinaciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  el algoritmo implantado no puede realizar el cancelamiento. Después se implantaron dos técnicas temporales, una de ellas está en el software de referencia recomendado para el último estándar de codificación de video H.264/AVC. En esta técnica se tienen cinco opciones para aplicar el cancelamiento y eso permite obtener muy buenos resultados en la imagen restaurada, asimismo, en la implantación realizada se hicieron pequeñas modificaciones que en la literatura no se especifican. La segunda técnica temporal fue implantada en tres modalidades de las cuales una de ellas no se

considera en la literatura y se obtienen valores más precisos con respecto a una medida de la distorsión espacial (MAD: Mean Absolute Difference) con el que se realiza el cancelamiento y esto puede permitir al algoritmo una opción que asegure una buena elección cuando las imágenes canceladas no guarden una correlación espacial muy cercana. Antes de implantar las técnicas temporales se realizó la simulación de los procesos de estimación y compensación de movimiento, con estas simulaciones se obtienen los parámetros que regularmente son dañados durante el envío de la señal de video a través de medios inalámbricos. Después se simularon las pérdidas de algunos de estos parámetros de movimiento y enseguida se aplica el cancelamiento de error con las técnicas de cancelamiento de error temporales. Con dichas simulaciones se pudo observar y entender el proceso que realiza el codificador para reducir la cantidad de información de la señal de video. Las simulaciones realizadas permiten además tener una aproximación muy cercana a los ambientes reales utilizados para la transmisión del video inalámbrico en base al estudio realizado en esta investigación con respecto al tipo de errores típicos que se dan en los canales inalámbricos que es el canal al que está orientada esa investigación. Las pruebas fueron probadas para cinco secuencias de video en formato YUV que están estandarizadas propiamente para pruebas de las técnicas de cancelamiento de errores. Existe aún mucho trabajo para desarrollar en las técnicas de cancelamiento donde se pueden optimizar los algoritmos para hacerlos más eficientes y con una menor complejidad computacional.

## **Productos obtenidos de esta investigación.**

### **Publicaciones:**

- Abril F. García, Mireya S. García, Alejandro A. Ramírez. “Estado del Arte de las Técnicas de Cancelamiento de Error para Transmisión Inalámbrica de Video”. VI Taller- Escuela de Procesamiento de Imágenes PI09 CIMAT. Agosto, 2009. Gto. México.
- Abril F. García-Ramírez, Mireya S. García-Vázquez, Alejandro A. Ramírez-Acosta. “Revisión Técnicas Principales de Resistencia al Error para la

Transmisión Inalámbrica de Video”. V Encuentro Regional Académico ERA09. Noviembre 2009. Tijuana, B.C., México.

### **Presentaciones:**

- Abril F. García, Mireya S. García, Alejandro A. Ramírez. “Estado del Arte de las Técnicas de Cancelamiento de Error para Transmisión Inalámbrica de Video”. Modalidad de poster en VI Taller- Escuela de Procesamiento de Imágenes PI09 CIMAT. Agosto, 2009. Gto. México.
- Abril F. García. “Revisión Técnicas Principales de Resistencia al Error para la Transmisión Inalámbrica de Video”. Participación dentro del seminario académico de CITEDI. 7 de Agosto del 2009.

### **REFERENCIAS**

- [1] R. Talluri, “Error-Resilient Video Coding in the ISO MPEG-4 Standard”, IEEE Communications Magazine, pp. 112-119. Junio 1998.
- [2] Y. Wang, y Q.-F. Zhu, “Error Control and Concealment for Video Communication: A Review ”, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 5, pp. 985-995, Mayo 1998.
- [3] Sunil Kumar, Liyang Xu et all. “Error Resiliency Schemes in H.264/AVC standard”. Visual Communications & Image Representation. Vol 17(2), Abril 2006.
- [4] H.de J. Ochoa-Domínguez, J.Mireles-García, J. de D. Cota-Ruíz. “Descripción del nuevo estándar de video H.264 y comparación de su eficiencia de codificación con otros estándares”. Ingeniería Investigación y Tecnología VIII. 3. 157-180, 2007.
- [5] L. Lin et all. “H.264/AVC error resilience tools suitable for 3G mobile video services”, Journal of Zhejiang University SCIENCE ISSN 1009-3095, pp. 41-46, mayo 2005.
- [6] T. Stockhammer, M. M. Hannuksela and T. Wiegand, “H.264/AVC in Wireless Environments”, IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 13, pp. 657- 673, Julio 2003.
- [7] Cai, J., Zhang, Q., Zhu, Q., and Chen, C.W. “An FEC-based error control schem for wireless MPEG-4 video transmission”, Proceedings of the IEEE WCNC, Vol. 3, pp. 1243-1247, Septiembre 2000.
- [8] I. E. G. Richardson “H.264 and MPEG-4 Video Compression. Video Coding for Next –generation Multimedia”, John Wiley & Sons, Ltd. pp. 22-24, 27-30. Mayo 2004 .

- [9] Stefan Winkler. "Digital Video Quality. Vision Models and Metrics". John Wiley & Sons, Ltd. pp. 35, 36, 45-66. 2005.
- [10] H. R. Wu, K. R. Rao. "Digital Video Image Quality and Perceptual Coding". Taylor and FrancisGroup. pp. 155-170. 2006.
- [11] "Draft ITU-T recommendation and final draft international standard of joint video specification (ITU-T Rec. H.264/ISO/IEC 14 496-10 AVC," in Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG, JVTG050, 2003.
- [12] T. Wiegand, G.- J. Sullivan, G. Bjøntegaard, and A. Luthra, "Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard", *IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Techn.*, Vol. 13, No. 7, pp. 560-576. Julio 2003.
- [13] Wenger A. "H.264/AVC Over IP", *IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Tech.*, Vol. 13, pp.645-656, Julio 2003.
- [14] Ghanbari M. "Standard Codecs: Image Compression to Advanced Video Coding". Hertz, UK: IEEE. 2003.
- [15] "Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information - Part 2: Video," ITU-T and ISO/IEC JTC 1, ITU-T Recommendation H.262 and ISO/IEC 13 818-2 (MPEG-2), 1994.
- [16] Ochoa H. and Rao K.R. "A New Modified Version of the HDWTSVD Coding System for Monochromatic Images". *WSEAS Trans. on Syst.*, Vol. 5, pp. 1190 – 1195, Mayo2006.
- [17] G. J. Sullivan, P. Topiwala, and A. Luthra. "The H.264/AVC Advanced Video Coding Standard: Overview and Introduction to the Fidelity Range Extensions", *SPIE Conf. on Appl. of Digital Ima. Process. XXVII*. pp. 1-22, Agosto 2004.
- [18] Flierl M. and Girod B. "Generalized B Picture and the Draft H.264/AVC Video-Compression Standard". *IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Techn.*, Vol. 13, pp. 587-597, Julio2003.
- [19] Golomb S.W. "Run-Length Encoding", *IEEE Trans. on Infor. Theory*, IT-12, pp. 399-401, Dic. 1966.
- [20] S. Shirani, F. Kossentini, and R. Ward. "Error concealment methods, A comparative study", *Proc. of the 1999 IEEE Canadian Conf. on Electrical and Comp Eng.* Mayo 1999.
- [21] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding: Fundamentals and Applications* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.

- [22] I. S. Shirani, F. Kossentini and R. Ward "An efficient, similarity-based error concealment method for block-based coded images" *Proc. IEEE Intl. Conf. Image Processing*, Vancouver, Canada, Sep. 2000.
- [23] Q.-F. Zhu, Y. Wang and L. Shaw, "Coding and cell loss recovery in DCT based packet video," *IEEE Trans. Cir. Syst. Video Technol.*, Special Issue on Packet Video. Vol. 3. No. 3, pp. 248 - 258, June 1993.
- [24] W.-J. Chu, J.-J. Leou, "Detection and concealment of transmission errors in H.261 images", *IEEE Trans. Cir. Syst. Video Technol.*, Vol. 8, pp. 74-84, 1998.
- [25] T. Wiegand, N. Färber, K. Stuhlmüller, and B. Girod, "Error-resilient video transmission using longterm memory motion-compensated prediction," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, pp. 1050-1050-, Diciembre 2000.
- [26] S. Tsekeridou and I. Pitas: "MPEG-2 Error Concealment Based on Block-Matching Principles", *IEEE Transactions on Circuits And Systems For Video Technology*, vol. 10, No. 4, pp. 646-648. Junio 2000.
- [27] W. -L. Chen, J. -J. Leou, "A New Hybrid Error Concealment Scheme for H.264 Video Transmission", *IWCMC'06*, pp. 61-66. Julio 2006.
- [28] D.-T. Duong, B.-D. Choi, et all, "Frame Error Concealment Using Pixel Correlation in Overlapped Motion Compensation Regions", *ETRI Journal*, vol. 31, Number 1, pp. 21-30, Febrero 2009.
- [29] M.-H. Jo, H.-N. Kim and W.-J. Song "Hybrid error concealments based on block content", *IET Image Process.*, Vol. 1, No. 2, pp. 141–148, Junio 2007.
- [30] M. Ghanbari and V. Seferida, "Cell-loss Concealment in ATM Video Codecs," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 3, No.3, Junio 1993.
- [31] S. Aign y K. Fazel, "Temporal and Spatial Error Concealment Technics for Hierarchical MPEG-2 Video Codec", en *Proc. Globecom '95*, pp.1778-1783.
- [32] J.-W. Suh and Y.-S. Ho, "Error concealment based on directional interpolation," *IEEE Trans. Cons. Electron.*, vol. 43, pp. 295–302, Aug. 1997.
- [33] H. Sun and W. Kwok, "Multi-Directional Interpolation for Spatial Error Concealment", *IEEE Trans. on Cons. Electr.*, Vol. 39, pp. 455-460, No. 3, Agosto 1993.
- [34] H. Sun y W. Kwok, "Concealment of Damaged Block Transform Coded Images Using Projections Onto Convex Sets", *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 4, pp. 470-477, Abril 1995.

- [35] Y. Wang, Q.-F. Zhu, y L. Shaw, “Maximally Smooth Image Recovery in Transform Coding”, *IEEE Trans Commun.*, Vol. 41, pp. 1544-1551, Octubre 1993.
- [36] Y. Wang and Q. Zhu, “Signal loss recovery in DCT-based image and video codecs,” *Proc. SPIE Conf. Visual Communication and Image Processing*, vol. 1605, pp. 667–678, Noviembre 1991.
- [37] J.W. Park, J.W. Kim, and S. U. Lee, “DCT coefficients recovery-based error concealment technique and its application to the MPEG-2 bit stream error,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 7, pp. 845–854, Diciembre 1997.
- [38] Salama, P., Schroff, N.B., Delp, E.J. “Error concealment in MPEG video streams over ATM networks”, *IEEE Journal on Select. Areas in Communication*, vol. 18, No.6, pp. 1129-1144. 2000.
- [39] Shirani, S., Kossentini, F., Ward, R. “A concealment method for video communication in an error-prone environment”. *IEEE Journal on Select. Areas*, 2000.
- [40] Li Xin, Orchard M. – T., “Novel sequential error-concealment techniques using orientation adaptive interpolation”. *IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Tec.*, vol. 12, no. 10, pp. 857-864, octubre 2002.
- [41] Li Xin, Orchard M. – T., “Edge-Directed Prediction for Lossless Compression of Natural Images”. *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 10, pp. 813-817 6, junio 2001.
- [42] J. Seiler and A. Kaup, “Fast orthogonality deficiency compensation for improved frequency selective image extrapolation,” *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 781–784, abril 2008.
- [43] Y. Xiang et. al. “An efficient spatio-temporal boundary matching algorithm for video error concealment”. *Multimed Tools Appl. Magazine Springer Science+Business Media*, pp. 1-13, enero 2010.
- [44] M.E. AI:Mualla, C.N. Canagarajah and D.R.Bull “Motion field interpolation for temporal error concealment” *IEEE Proc.-Vis. Image Signal Process.*, pp. 445-453, vol. 147, No. 5, Octubre 2000.
- [45] Narula, A., and Lim, J.S.: ‘Error concealment techniques for an all digital high-definition television system’, *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*,2094, pp. 304-315, 1993.
- [46] Sun H, Challapali K, Zdepski J. “Error concealment in digital simulcast AD-HDTV decoder” *IEEE Trans Consum Electron vol. 38 No. 3*. pp. 108–116. 1992.
- [47] Haskell P, Messerschmitt D. “Resynchronization of motion compensated video affected by ATM cell loss”. *Proc ICASSP’92*, vol. 3, pp. 545–548, 1992.

- [48] W.-M. Lam, A. R. Reilbman, and B. Liu, "Recovery of lost or erroneously received motion vectors," in *Proc. ICASSP*, vol. 5, pp. V417–V420, abril 1993.
- [49] J. Zhang, J. F. Arnold, and M. R. Frater, "A cell-loss concealment technique for MPEG-2 coded video", *IEEE Trans. on Circuits Syst. for Video Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 659-665, Junio 2000.
- [50] Chen M.-J. , Chen L.-G., and R.-M. Weng "Error Concealment of Lost Motion Vectors with Overlapped Motion Compensation", *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Techn.*, vol. 45, No. 3 ,pp. 560-563, junio 1997.
- [51] Chen M.-J. , Chen L.-G., and R.-M. Weng "Robust error concealment algorithm for video decoder", *IEEE Trans on Consumer Electronics.*, vol. 7 no. 3, pp. 851-859, agosto 1999.
- [52] T. Thaipanich, P.-H Wu, y C.-C. Jay Kuo "Low-Complexity Mobile Video Error Concealment Using OBMA". contract NSC-095-SAF-I-564-045-TMS.8.4-2.Himax Technologies, Inc. (Tainan, Taiwan) and by National Science Council of Taiwan.
- [53] J.-W. Suh and Y.-S. Ho, "Error Concealment Based on Motion Vector Recovery Using Optical Flow Fields", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86–B, No.4, pp. 1383-1389, abril 2003.
- [54] C.-H. Yeh, Y. - H. Chen, M. –C. Chi y M. –J. Chen. "Parabolic Motion-Vector Re-estimation Algorithm for Compressed Video Downscaling". *Journ. Sign Process Syst. Springer Science+Business Media*. Enero 2010.
- [55] Y. -W. Huang, C. -Y. Chen, C. –H. Tsai, C. -F. Shen y L. -G. Chen. "Survey on Block Matching Motion Estimation Algorithms and Architectures with New Results". *Journal of VLSI Signal Processing. Springer Science+Business Media* 42, 297–320, Febrero 2006.
- [56] W. –L. Chen and J. –J. Leou, "A New Hybrid Error Concealment Scheme for H.264 Video Transmission", *IWCMC'06*, pp. 61-66, Jul. 2006.
- [57] M.-H. Jo, H.-N. Kim and W.-J. Song "Hybrid error concealments based on block content", *IET Image Process.*, vol. 1, No. 2, pp. 141–148, 2007.
- [58] B. - N. Chen and Y. Lin, "Hybrid Error Concealment Using Linear Interpolation", *IEEE ISCIT*, pp 926-931, 2006.
- [59] T.- H. Tsai and Y.- X. Lee, "The Hybrid Video Error Concealment Algorithm with Low Complexity Approach". *IEEE ICICS-PCM 2W3*, vol. 1B3.4, No. pp. 268-271 6, dic. 2003.

- [60] C.-T. Hsu, M.-J. Chen, W.-W. Liao, and S.-Y. Lo, "High-Performance Spatial and Temporal Error-Concealment Algorithms for Block-Based Video Coding Techniques", *ETRI Journal*, Vol. 27, Number 1, pp. 53-63, Feb. 2005.
- [61] Dmitriy Kulikov "Spatio-Temporal Error Concealment Scheme Using Hybrid Algorithm with Postprocessing", *RFBR*, pp. 1-4, 2007.
- [62] W. Wada, "Selective Recovery of Video Packet Loss Using Error Concealment", *IEEE J. Select. Areas Commun.* Vol. 7, pp. 807-814, Junio 1989.
- [63] D. C. Youla and H. Webb, "Image restoration by the method of convex projections: Part I-Theory," *IEEE Trans. Med. Imu,y.*, vol. MI-1, pp. 81-94, Oct. 1982.
- [64] Boyd S., Vandenberghe L. "Convex Optimization". pp. 1-9, 21-43, 309-402, 457-475, Cambridge University Press, 2009.
- [65] D.-T. Duong, B.-D. Choi, et al. "Frame Error Concealment Using Pixel Correlation in Overlapped Motion Compensation Regions", *ETRI Journal*, vol. 31, Num. 1, pp. 21-30, Febrero 2009.
- [66] V. Varsa, M. M. Hannuksela, and Y. Wang. "Non-normative error concealment algorithms", ITU-T VCEG (SG16/Q6), 14th Meeting: Santa Barbara, CA, USA, 21-24 Sept., 2001.