

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE  
TELECOMUNICACIONES

## **Estudio y selección de algoritmos de súper resolución para imágenes a color en diversas aplicaciones**

TRABAJO RECEPCIONAL  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN  
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTA  
**OSCAR GÁLVEZ BORJAS**

Director del trabajo recepcional  
**Dr. Eduardo Ramos Díaz**

Ciudad de México, marzo de 2016

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

## Dedicatoria

A mi familia; a mis padres cuyo apoyo incondicional me mantuvo siempre firme con el deseo de cumplir mis metas a lo largo de mi formación académica y a mis hermanos por la paciencia, tolerancia y apoyo que me brindaron siempre.

A mis profesores quienes con sus consejos y enseñanzas, fueron la guía que me ayudó a formarme día a día.

A mis compañeros de carrera, quienes de alguna manera con su amistad hicieron amena esta aventura, una nueva etapa comienza en nuestras vidas.

## Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por el apoyo económico para la impresión y empastado de este trabajo recepcional.

# Índice general

Índice general .....	IV
Índice de Figuras .....	VII
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen .....	1
Introducción.....	2
Planteamiento del problema.....	4
Solución propuesta.....	4
Justificación .....	4
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos .....	5
Cuerpo de trabajo de tesis.....	5
Capítulo 1 .....	7
Estado del arte .....	7
1.1 Imagen .....	7
1.2 Imagen digital .....	7
1.3 Imagen Matricial.....	7
1.3.1 Imágenes binarias.....	8
1.3.2 Imágenes monocromáticas .....	9
1.3.3 Imágenes a color .....	9
1.3.4 Modelo de color RGB .....	9
1.3.5 Modelo de color XYZ.....	10
1.3.6 Modelo de color L*u*v.....	10
1.4 Imagen vectorial .....	11
1.5 Formatos de imagen.....	12
1.6 Formatos sin pérdidas .....	12
1.7 Formatos con pérdidas .....	13
1.8 Procesamiento digital de imágenes.....	13
1.9 Resolución de una imagen .....	18
1.10 Concepto .....	18
1.11 Súper resolución .....	19

1.12 Aplicaciones de la súper resolución.....	19
Capítulo 2 .....	21
Métodos clásicos de súper resolución .....	21
2.1 Replica de pixel .....	21
2.2 Proceso de plantilla de convolución .....	24
2.3 Interpolación ponderada del vecino más cercano. ....	25
2.4 Interpolación del vecino más cercano.....	28
2.5 Interpolación lineal .....	29
2.6 Interpolación Bilineal .....	31
2.7 Interpolación Bicúbica I.....	34
2.7.1 Interpolación Bicúbica II.....	36
2.7.2 Interpolación Bicúbica III .....	36
Capítulo 3 .....	38
Desarrollo y evaluación de los métodos investigados.....	38
3.1 Desarrollo de algoritmos.....	38
3.2 Imágenes de prueba .....	38
3.2.1 Imágenes estándar .....	39
3.2.2 Imágenes satelitales.....	40
3.2.3 Imágenes médicas .....	42
3.2.4 Imágenes de tráfico vehicular .....	44
3.3 Criterios objetivos de evaluación.....	46
3.3.1 Relación pico señal a ruido (PSNR).....	47
3.3.2 Error absoluto medio (MAE) .....	47
3.3.3 Índice de similitud estructural (SSIM).....	48
3.3.4 Diferencia de color normalizado (NCD).....	48
3.4 Resultados.....	49
3.4.1 Resultados obtenidos en imágenes estándar .....	50
3.4.2 Resultados obtenidos en imágenes satelitales .....	62
3.4.3 Resultados obtenidos en imágenes médicas.....	73
3.4.4 Resultados obtenidos en imágenes de tráfico.....	85
Capítulo 4 .....	96
Análisis y comparación de resultados .....	96

4.1 Algoritmo propuesto para SR de video a color.....	98
4.2 Resultados de SR de video.....	100
Capítulo 5 .....	104
Conclusiones generales y trabajo a futuro.....	104
5.1 Trabajo a futuro .....	105
Bibliografía.....	106
Apéndice.....	110

# Índice de Figuras

1 Operación en mujer de 50 años con fistula pancreática. ....	2
1. 1 Representación matricial de una imagen digital.....	8
1. 2 Representación de los tres tipos de imagen en función de su valor de pixel. a) Imagen binaria .....	9
1. 3 Imagen vectorial .....	12
1. 4 Imagen en la que se usa la técnica de afilado de bordes, la imagen b) muestra el resultado después de procesar la imagen original a).....	14
1. 5 Eliminación de ruido en una imagen. En a) la imagen presenta ruido, en b) la imagen sin ruido tras ser procesada. ....	15
1. 6 Imagen procesada para eliminar el desenfoque o Motion blur, que se aprecia en a) y cuyo resultado se obtiene b).....	16
1. 7 Técnica utilizada para la identificación de bordes en una imagen, a) imagen original, b) imagen obtenida al aplicar el algoritmo de obtención de bordes.....	17
1. 8 Proceso de extracción de detalles de una imagen original a), obteniendo de resultado la imagen b), para disminuir el trabajo de procesado en la computadora.....	17
1. 9 Resolución en una imagen a partir de su número de pixeles.....	19
2. 1 Representación de una imagen vista como matriz, cada casilla es información pictórica. ....	22
2. 2 Obtención de imagen de SR por medio de réplica de pixel. a) Imagen original, b) imagen del doble de tamaño donde será almacenada la imagen de SR, c) copiado de pixeles, imagen de SR d) efecto al poseer la misma información pictórica. ....	23
2. 3 Replica de pixel en imágenes a color, a) imagen de baja resolución b) imagen de súper resolución.....	23
2. 4 Método de rejilla deslizante.....	24
2. 5 Obtención del pixel de SR en método de interpolación ponderada del vecino más cercano con una rejilla de 3x3. ....	26

2. 6 Obtención del píxel de SR en método de interpolación ponderada del vecino más cercano con una rejilla de 5x5. ....	27
2. 7 Obtención del píxel de SR en método de interpolación ponderada del vecino más cercano con una rejilla de 7x7. ....	28
2. 8 Obtención del píxel de SR en método de interpolación del vecino más cercano en rejilla de 3x3. ....	29
2. 9 Obtención del píxel de SR en método de interpolación lineal en rejilla de 3x3.....	30
2. 10 Obtención del píxel de SR en método de interpolación Bilineal en rejilla de 3x3.....	31
2. 11 Obtención del píxel de SR en método de interpolación Bilineal en rejilla de 5x5.....	33
2. 12 Obtención del píxel de SR en método de interpolación Bilineal en rejilla de 7x7.....	33
2. 13 Proceso de interpolación bicúbica en una vecindad de 16. ....	36
3. 1 Selección de imágenes estándar en escala de grises para algoritmos de SR. ....	39
3. 2 Selección de imágenes estándar para algoritmos de SR en RGB.....	40
3. 3 Selección de imágenes satelitales para algoritmos de SR en escala de grises.....	41
3. 4 Selección de imágenes satelitales para algoritmos de SR en RGB. ....	42
3. 5 Selección de imágenes médicas de muestra para algoritmos SR en escala de grises....	43
3. 6 Selección de imágenes médicas para algoritmos de SR en RGB.....	44
3. 7 Selección de imágenes de tráfico vehicular para algoritmos de SR en escala de grises. .....	45
3. 8 Selección de imágenes de tráfico vehicular para algoritmos de SR en RGB.....	46
3. 9 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Lena en escala de grises. ....	53
3. 10 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Goldhill en escala de grises..	55
3. 11 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Sailboat a color.....	59
3. 12 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen JetPlane a color.....	61
3. 13 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite01 en escala de grises. .....	65
3. 14 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite05 en escala de grises. .....	67
3. 15 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite10 a color.....	71
4. 16 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite11 a color.....	72

3. 17 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica01 en escala de grises. .....	77
3. 18 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica05 en escala de grises. .....	78
3. 19 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica08 a color. ....	82
3. 20 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica12 a color. ....	84
3. 21 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico02 en escala de grises. .....	88
3. 22 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico06 en escala de grises. .....	89
3. 23 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico07 a color. ....	93
3. 24 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico10 a color. ....	95
4. 1 Proceso de creación de video utilizando método de SR en imágenes. ....	99
4. 2 Secuencia de cuadro No. 300 de video “Traffic_IP_camLR” en baja resolución (SD). .....	100
4. 3 Secuencia de cuadro No. 300 de video “Traffic_IP_camSR” en alta resolución (HD). .....	101
4. 4 Secuencia de cuadro No. 620 de video Traffic_IP_camLR en alta baja resolución (SD). .....	102
4. 5 Secuencia de cuadro No. 620 de video Traffic_IP_camLR en alta baja resolución (SD). .....	102
A 1 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Baboon” en escala de grises. .....	111
A 2 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Goldhill” en escala de grises. .....	112
A 3 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Barbara” en escala de grises. .....	113
A 4 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “JetPlane” en escala de grises. .....	114
A 5 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Lena” en escala de grises. ....	115

A 6 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Peppers” en escala de grises. .....	116
A 7 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Baboon” a color. ....	117
A 8 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Sailboat” a color. ....	118
A 9 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “House” a color. ....	119
A 10 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “JetPlane” a color. ....	120
A 11 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Lena” a color.....	121
A 12 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Peppers” a color. ....	122
A 13 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite01” en escala de grises. .....	123
A 14 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite02” en escala de grises. .....	124
A 15 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite03” en escala de grises. .....	125
A 16 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite04” en escala de grises. .....	126
A 17 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite05” en escala de grises. .....	127
A 18 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite06” en escala de grises. .....	128
A 19 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite07” a color.....	129
A 20 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite08” a color.....	130
A 21 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite09” a color.....	131
A 22 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite10” a color.....	132
A 23 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite11” a color.....	133
A 24 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite12” a color.....	134
A 25 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica01” en escala de grises. .....	135
A 26 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica02” en escala de grises. .....	136

A 27 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica03” en escala de grises. .....	137
A 28 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica04” en escala de grises. .....	138
A 29 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica05” en escala de grises. .....	139
A 30 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica06” en escala de grises. .....	140
A 31 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica07” a color.....	141
A 32 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica08” a color.....	142
A 33 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica09” a color.....	143
A 34 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica10” a color.....	144
A 35 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica11” a color.....	145
A 36 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica12” a color.....	146
A 37 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico01” en escala de grises. .....	147
A 38 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico02” en escala de grises. .....	148
A 39 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico03” en escala de grises. .....	149
A 40 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico04” en escala de grises. .....	150
A 41 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico05” en escala de grises. .....	151
A 42 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico06” en escala de grises. .....	152
A 43 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico07” a color.....	153
A 44 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico08” a color.....	154
A 45 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico09” a color.....	155
A 46 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico10” a color.....	156
A 47 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico11” a color.....	157

A 48 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico12” a color. .... 158

## Índice de Tablas

3. 1 Resultados correspondientes al error absoluto medio en imágenes estándar en escala de grises. ....	50
3. 2 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes estándar en escala de grises. ....	51
3. 3 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes estándar en escala de grises. ....	51
3. 4 Resultados correspondientes al error absoluto medio en imágenes estándar a color. ...	56
3. 5 Resultados correspondientes al pico señal a ruido en imágenes estándar a color. ....	56
3. 6 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes estándar a color. ....	57
3. 7 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes estándar a color. ....	57
3. 8 Resultados correspondientes al error absoluto medio en imágenes satelitales en escala de grises. ....	63
3. 9 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes satelitales en escala de grises. ....	63
3. 10 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes satelitales en escala de grises. ....	64
3. 11 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes satelitales a color. ....	68
3. 12 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes satelitales a color. ....	69
3. 13 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes satelitales a color. ....	69
3. 14 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes satelitales a color. ....	70
3. 15 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes médicas en escala de grises. ....	74

3. 16 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes médicas en escala de grises.....	75
3. 17 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes médicas en escala de grises.....	75
3. 18 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes médicas a color. .	79
3. 19 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes médicas a color. ....	80
3. 20 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes médicas a color. ....	80
3. 21 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes médicas a color. ....	81
3. 22 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes de tráfico vehicular en escala de grises.....	85
3. 23 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes de tráfico vehicular en escala de grises. ....	86
3. 24 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes de tráfico vehicular en escala de grises.....	87
3. 25 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes de tráfico vehicular a color. ....	90
3. 26 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes de tráfico vehicular a color.....	91
3. 27 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes de tráfico vehicular a color.....	91
3. 28 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes de tráfico vehicular a color. ....	92

## Resumen

Hoy en día, existen una gran variedad de tecnologías que requieren del procesamiento de imágenes para mejorar la resolución espacial de las mismas, estas tecnologías realizan importantes avances en ramas como la medicina, la Geografía, la Biología, la Astronomía y la Fotografía por citar algunos ejemplos, en estos casos, es importante que la imagen sea lo más clara y nítida posible, sin embargo no siempre se dispone de equipo especializado que permita obtener estas imágenes de gran calidad debido más que nada a su alto coste. Por otro lado, la transmisión de imágenes entre distintos dispositivos propicia en algunas ocasiones pérdida de calidad debido a requerir sistemas de compresión para el envío y lectura de las mismas.

Este tipo de inconveniente en las imágenes perjudica en aquellas aplicaciones en las que la precisión de la resolución espacial es una cuestión delicada y crítica, por ello el objetivo de este trabajo es presentar un estudio de los algoritmos de súper resolución más comunes en imágenes digitales, realizando una selección e implementación de aquellos que mejor desempeño arrojen para el mejoramiento de resolución en imágenes y video. Se realizará una inspección teórica sobre los antecedentes, desde lo que es una imagen digital, tipos de formato de imagen, procesamiento digital de imágenes, métodos clásicos de súper resolución de imágenes y técnicas de interpolación más comunes.

Se seleccionarán aquellos algoritmos cuyo enfoque esté orientado hacia la aplicación de video, se implementará en software científico (MATLAB) la simulación de los mismos, y utilizando imágenes de prueba estándar se medirá la calidad de los mismos, se comparará su efectividad entre los métodos existentes utilizando los criterios objetivos de evaluación como son el PSNR, MAE, SSIM y NCD, también de forma subjetiva se comparará el resultado de la imagen visualmente.

Por último y con base a los criterios de evaluación se seleccionará el algoritmo que mejor desempeño haya logrado y se implementará en la simulación de video a color.

## Introducción

El procesamiento digital de imágenes es uno de los campos más importantes en el desarrollo de ciertas áreas de la ciencia, una de estas técnicas de procesado es la de mejorar la resolución, la cual busca aumentar la calidad de las imágenes, dicho de otro modo, se busca que los detalles de una imagen sean más sencillos de identificar, que la imagen presente la mayor nitidez y claridad posible [2].

Por ello, en el estudio de la súper resolución se han buscado diferentes técnicas que permitan implementar uno o varios procesos a la imagen misma para mejorarla visualmente, la súper resolución es importante por ejemplo, en el caso de imágenes de satélite, ya que permite un mejor reconocimiento de la cartografía, además ayuda a implementar mejoras que faciliten la identificación de las características de una zona específica, logrando con ello un mejor reconocimiento de sus propiedades, tales como el clima, la humedad, la temperatura, etc. [2].

En el caso de la medicina el tener a disposición una imagen mejorada aumenta la eficacia para reconocer enfermedades, tumores, deficiencias óseas, etc. y con ello diagnosticar padecimientos de forma oportuna. En la Figura 1 podemos observar la imagen en tiempo real de una operación médica y la importancia de que presente perfección en los detalles [29].



Figura 1 Operación en mujer de 50 años con fistula pancreática.

En la parte de la Biología, la implementación de métodos de súper resolución son de utilidad para, el estudio detallado de células, microorganismos y en general cualquier implementación de imágenes microscópicas que precisen de una buena resolución.

Así pues hay una gran variedad de áreas que requieren el procesamiento de imágenes para mejorar sus trabajos de investigación y desarrollo, algunas de estas áreas requieren sistemas complejos de procesamiento de imágenes que en cuyo caso representa el uso de tecnología de punta la cual es muy costosa. Otra de las áreas que requiere de sistemas de mejoramiento de imagen, es el de los sistemas de video vigilancia de las ciudades, en este caso normalmente al tener que disponer de una cantidad de decenas de miles de cámaras de video, para monitorear en tiempo real el estado y funcionamiento de una ciudad, hace que los costos para implementar una infraestructura con una tecnología capaz de ofrecer alta resolución se disparen considerablemente, es entonces que ante estos tipos de casos se busquen alternativas

Es por esto que, la implementación de métodos de súper resolución de imágenes forma parte de un desarrollo en el procesamiento digital de imágenes que empieza a cobrar importancia en áreas en donde se pudiera presentar como una alternativa económica y con resultados admisibles. Estos métodos consisten en la elaboración de algoritmos programables en distintos lenguajes de programación según la aplicación en la cual vayan a ser utilizados, para que con ello puedan mejorar la resolución de una imagen que a su vez ayude a mejorar el reconocimiento de sus características a un menor costo.

## Planteamiento del problema

El problema es entonces el siguiente, ¿Cómo mejorar la calidad de una imagen sin ruido, de forma que permita apreciar con mayor claridad los detalles de la misma?

## Solución propuesta

Revisar los métodos clásicos de súper resolución en imágenes digitales para desarrollar algoritmos que permitan obtener una imagen de mayor resolución espacial preservando sus características.

## Justificación

Hoy en día, el uso de imágenes digitales sirve como un medio para la identificación de los aspectos físicos de lo que está mostrándose en la misma, siendo en la mayoría de los casos muy esclarecedor para determinar un objeto o detalle en particular, tal es el caso de las imágenes de satélite que permiten identificar la composición de un asteroide, estrella solar o planeta como recientemente sucedió con Plutón con la sonda espacial *New Horizons* [33], por su parte ciencias como la Medicina se han beneficiado de avances importantes en los métodos de obtención de imágenes en rayos X o ultrasonidos, dado que la precisión de los equipos utilizados ha ido mejorando notablemente con el avance de la tecnología. [3]

La Ciudad de México tiene el programa *Bicentenario Ciudad Segura* [34], el cual es una red de cerca de doce mil cámaras de video vigilancia que monitorean las 24 horas del día, el funcionamiento de la ciudad, también otras instancias como sucursales bancarias, el sistema de transporte colectivo Metro y centros comerciales poseen sistemas de video vigilancia similares, pero, todos cuentan con un problema en común, la calidad de imagen obtenida por estos sistemas es muy baja, esto es debido a que por necesidad se utilizan equipos de baja resolución, pues la utilización de equipos de alto desempeño dispararían los costos en la compra de los mismos.

Es por ello que este proyecto de tesis tiene la intención de desarrollar un algoritmo que permita mejorar la resolución de una imagen y que pueda ser aplicado en los sistemas de obtención de imágenes de satélite, médicas y video vigilancia.

## Objetivo general

Analizar e implementar algoritmos de súper resolución en imágenes y video, tanto en color como en escala de grises más comunes, verificando su funcionamiento mediante diferentes medidas de rendimiento.

## Objetivos específicos

- Seleccionar algoritmos de súper resolución basados en diferentes características.
- Implementar algoritmos seleccionados en software científico.
- Medir la calidad de algoritmos implementados mediante medidas de rendimiento.
- Hacer un análisis comparativo de los métodos implementados para identificar las ventajas y desventajas correspondientes.
- Implementar el algoritmo de mejor desempeño para su uso en videos.

## Cuerpo de trabajo de tesis

Esta tesis se compone de 4 capítulos, en los cuales se abarca lo siguiente:

En el capítulo 1, se recopila el estado del arte, donde se ven los principales conceptos teóricos para tener un panorama más amplio sobre las imágenes digitales, su procesamiento y la súper resolución.

En el capítulo 2, se revisan los métodos de súper resolución espacial más utilizados en la literatura científica, repasando las principales características de los mismos para la realización de los algoritmos correspondientes en el simulador.

En el capítulo 3, se presenta la evaluación de los algoritmos realizados mediante medidas de rendimiento tales como PSNR, MAE, SSIM y NCD que permitan realizar la comparación entre los distintos algoritmos, a fin de identificar el que mejor desempeño presenta para llevarlo a la simulación de video.

En el capítulo 4, se realiza un análisis comparativo a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de rendimiento, para con ello evaluar su utilidad en una aplicación de sistemas video vigilancia.

En el capítulo 5, se darán las conclusiones finales y el trabajo a futuro conforme a los resultados obtenidos.

# Capítulo 1

## Estado del arte

### 1.1 Imagen

Sabemos que una imagen es una impresión sobre papel (generalmente fotográfico) en la cual se ha captado un momento en específico de un evento [4].

### 1.2 Imagen digital

Una imagen digital de igual modo es la captación de un momento, pero esta, está formada a partir de una representación bidimensional de una imagen a partir de una matriz numérica, es decir, la imagen es un fichero de datos estructurados en forma de cuadrícula de manera que una computadora pueda procesarlos y representarlos en un monitor u otro sistema de salida. [5]

Generalmente existen dos tipos de imágenes digitales (imagen matricial y gráfico vectorial) en función del tipo de resolución que estas posean:

- Resolución estática
- Resolución dinámica.

### 1.3 Imagen Matricial

La imagen matricial o también conocida como mapa de bits<sup>1</sup>, es una estructura de datos representados en forma de una rejilla rectangular de pixeles<sup>2</sup> o puntos de color, denominada matriz de ahí su nombre (Figura 1.1), a este tipo de imágenes se les puede definir de acuerdo a su altura y anchura en pixeles y de acuerdo a la profundidad de color, este último define el número de colores distintos que se pueden almacenar en cada punto individual, y que

---

<sup>1</sup> Bit: expresión inglesa que significa dígito binario, se utiliza en informática para nombrar a una medida de información que puede tener solo dos valores, cero o uno.

<sup>2</sup> Pixel: acrónimo del inglés *picture element* 'Elemento de una imagen', es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

generalmente define en gran medida la calidad de color que presenta una imagen [35]. Una imagen de este tipo puede ser representada también entorno a los bits de profundidad variando desde 2 bits hasta 24 bits (generalmente divididos en 3 grupos).

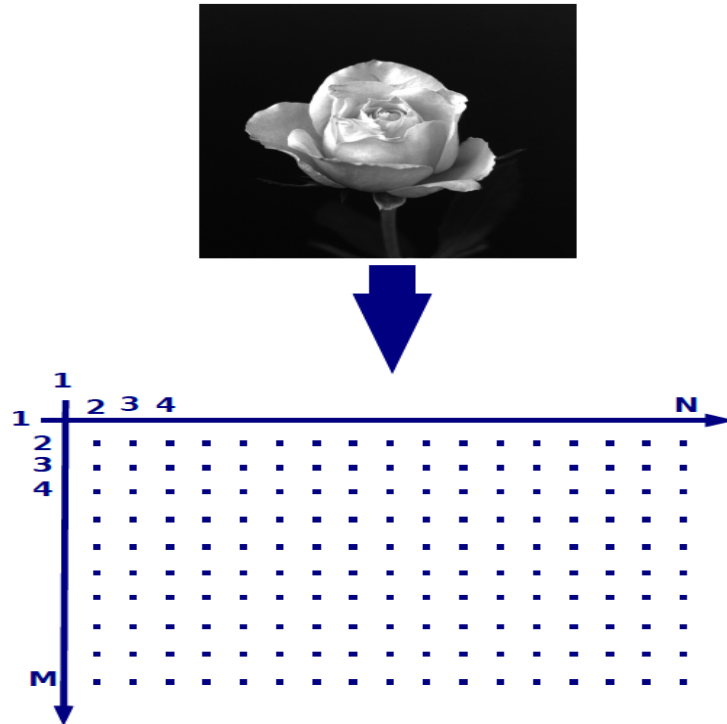


Figura 1. 1 Representación matricial de una imagen digital.

A partir de esta representación se pueden tomar tres tipos de imágenes digitales, *imágenes binarias*, *imágenes monocromáticas* e *imágenes a color o multi-canal*.

### 1.3.1 Imágenes binarias

Las imágenes binarias son aquellas en las que cada elemento de la imagen solo posee dos valores de intensidad (blanco o negro), generalmente se utilizan para métodos como la segmentación o la detección de umbrales [6]. La Figura 1.2 (a) muestra este tipo de imagen.

### 1.3.2 Imágenes monocromáticas

Las imágenes conocidas como imágenes monocromáticas (escala de grises) son imágenes que no solo poseen información de negro o blanco sino que además poseen información de valores de grises cuyo rango generalmente va entre 0-255 siendo el valor mínimo aquel en donde se tiene el color más oscuro y el valor máximo el color más claro [6]. La Figura 1.2 (b) representa este tipo de imagen.

### 1.3.3 Imágenes a color

Una imagen digital a color como la que se observa en la Figura 1.2 (c) puede definirse en función del modelo de representación de la misma, existen una gran variedad de modelos de imágenes a color, el más utilizado es el modelo RGB.

### 1.3.4 Modelo de color RGB

Es un sistema que se compone de tres planos basado en coordenadas cartesianas, y en el que cada color aparece con la combinación de sus tres componentes primarios de rojo, verde y azul, de forma que al combinar los planos entre sí, obtendremos un gran intervalo de colores [7].



Figura 1. 2 Representación de los tres tipos de imagen en función de su valor de pixel. a) Imagen binaria  
b) Imagen en escala de grises c) Imagen a color.

### 1.3.5 Modelo de color XYZ

En 1931 debido a que ningún conjunto finito de fuentes luminosas de color pudiera combinarse para desplegar todos los colores posibles, la Comisión Internacional de Iluminación CIE (del francés Commission Internationale de L'Eclairage) desarrolló unas curvas estandarizadas para un hipotético observador estándar. Estas curvas especifican como puede ser transformada una determinada distribución espectral de potencia de un estímulo externo (luz radiante visible incidente en el ojo), en un conjunto de tres números que especifican un color sobre la base de tres colores primarios estándar. Los tres colores primarios estándar son imaginarios positivos y se definen matemáticamente con funciones que especifican la cantidad de color primario necesario para describir cualquier color del espectro. [7, 8]. Generalmente un modelo de color XYZ ( $x, y, z$ ) se obtiene del modelo de color RGB ( $r, g, b$ ) transformado de acuerdo a las Ecuaciones 1.1, 1.2 y 2.3.

$$x = 0.412r + 0.358g + 0.180b, \quad (1.1)$$

$$y = 0.213r - 0.715g - 0.072b, \quad (1.2)$$

$$z = 0.019r - 0.119g - 0.950b. \quad (1.3)$$

### 1.3.6 Modelo de color L\*u\*v

El modelo L\*u\*v fue desarrollado a partir del modelo CIE XYZ como una solución a la no uniformidad que presentaba este último [8], para conseguir la uniformidad se realizan una serie de transformaciones de los valores XYZ de acuerdo a las Ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6

$$L^* = 116 * f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - 16, \quad (1.4)$$

$$u^* = 13 * L^* * (u' - u'_0), \quad (1.5)$$

$$v^* = 13 * L^* * (v' - v'_0). \quad (1.6)$$

Donde además las restricciones son las Ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9.

$$f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}}, & \frac{Y}{Y_0} > 0.008856, \\ 7.787\frac{Y}{Y_0} + \frac{16}{116}, & \frac{Y}{Y_0} \leq 0.008856, \end{cases} \quad (1.7)$$

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad u'_0 = \frac{4X_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}, \quad (1.8)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad v'_0 = \frac{9Y_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}. \quad (1.9)$$

Siendo X, Y y Z los valores triestímulo del modelo XYZ y X<sub>0</sub> Y<sub>0</sub> y Z<sub>0</sub> los valores normalizados del blanco de referencia elegido.

## 1.4 Imagen vectorial

También conocido como gráfico vectorial, es una imagen digital formada por medio de objetos geométricos independientes, tales como segmentos, polígonos, arcos, etc. Estos objetos geométricos están definidos por atributos matemáticos de forma, de posición, de color, etc. [9]. A diferencia del formato de imágenes matricial, el interés principal de los gráficos vectoriales es poder ampliar el tamaño de una imagen a voluntad sin sufrir la pérdida de calidad que sufrirían las imágenes matriciales. La Figura 1.3 muestra cómo se observaría una imagen vectorial al hacer zoom<sup>3</sup> sobre una de sus zonas sin perder detalle.

---

<sup>3</sup> Zoom: Es un objetivo fotográfico de distancia focal variable, es decir que se puede variar la distancia focal a voluntad y en consecuencia el ángulo de visión.

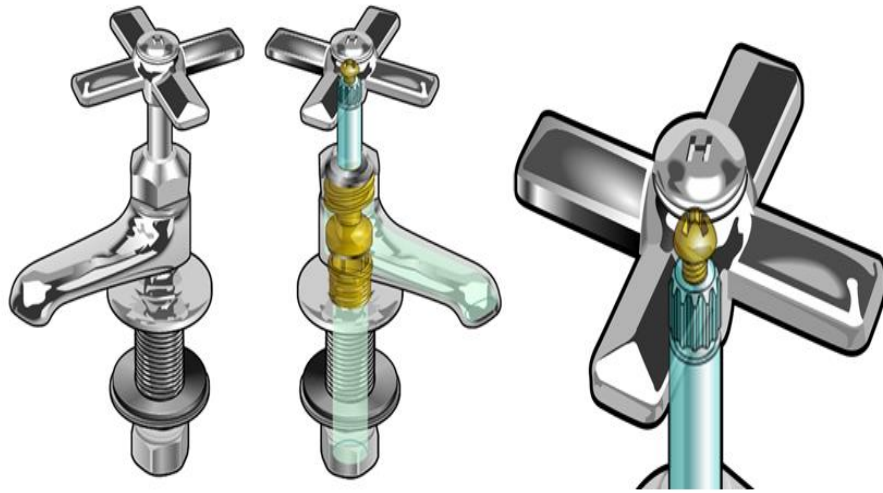


Figura 1. 3 Imagen vectorial.

## 1.5 Formatos de imagen

Otra clasificación de imágenes está dada en función de la forma en como son almacenadas las mismas, es decir, de la forma en que está definida la extensión del archivo.

De modo que existen diversos formatos que podrían agruparse dentro de dos grupos en general.

- Sin pérdidas.
- Con pérdidas.

## 1.6 Formatos sin pérdidas

Existen algunos dispositivos digitales que utilizan un formato el cual mantiene la imagen en su estado natural, al no realizar ninguna clase de compresión, permitiendo con ello mantener la máxima calidad de la imagen al igual que al momento en que fue captada [35]. En esta rama están los siguientes formatos.

- TIFF
- RAW

- BMP
- EPS
- PSD
- PDF

## 1.7 Formatos con pérdidas

Por su parte existen formatos de imágenes que desechan información innecesaria al ser almacenadas las imágenes, ocasionando con ello una pérdida de calidad, pero con la ventaja de que se obtienen archivos de menor tamaño de bytes<sup>4</sup>, lo que supone un ahorro de memoria en las computadoras [35]. Estos formatos son:

- JPEG.
- GIF.
- PNG.

## 1.8 Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de una imagen [11] es una serie de técnicas con las cuales se pueden manipular las propiedades de la misma, la idea de esto es cambiar su naturaleza con el fin de:

- Mejorar la información pictórica.
- Volverla más adecuada para la percepción de la maquina autónoma.

En el procesamiento digital de una imagen se requiere del uso de una computadora para cualquier modificación o tratamiento que queramos realizar sobre la misma, los dos aspectos antes mencionados son relevantes pues por un lado el ser humano requiere que la imagen luzca lo mejor posible, que sea nítida, clara y que los colores sean correctos (en caso de una imagen de color), pero a su vez por cuestiones de rendimiento al procesar una imagen la

---

<sup>4</sup> Byte: pronunciada “bait” es una unidad de información utilizada en ciencias como la informática, el Byte es múltiplo de bit, un Byte equivale a 8 bits por lo que en español se le denomina octeto.

maquina (computadora) se desempeña mejor con una imagen simple y sin complicaciones. De esta forma, para mejorar el aspecto de una imagen con el uso de una computadora se utilizan algoritmos que den un tratamiento a la imagen a procesar, para que una persona obtenga el resultado que desea.

Uno de estos casos por ejemplo es que mejore los bordes de la misma, de forma que sea más notoria la nitidez de la misma, la Figura 1.4 muestra un resultado de este efecto en una imagen tratada por un algoritmo encargado de este tipo de afilado de bordes.



Figura 1. 4 Imagen en la que se usa la técnica de afilado de bordes, la imagen b) muestra el resultado después de procesar la imagen original a).

Otro caso es el de la extracción de ruido en una imagen, siendo este último un problema que se presenta de forma común en la transmisión de datos, este es un aspecto que dificulta la visibilidad en una imagen pues suele ser muy común que el ruido se sobreponga sobre la imagen como se observa en la Figura 1.5. Existen una gran variedad de tipos de ruido en imágenes para los que cada tipo de ruido tiene una o varias técnicas de eliminación del

mismo, sin embargo este trabajo no abordará sobre estos fenómenos pues está fuera del alcance del mismo.

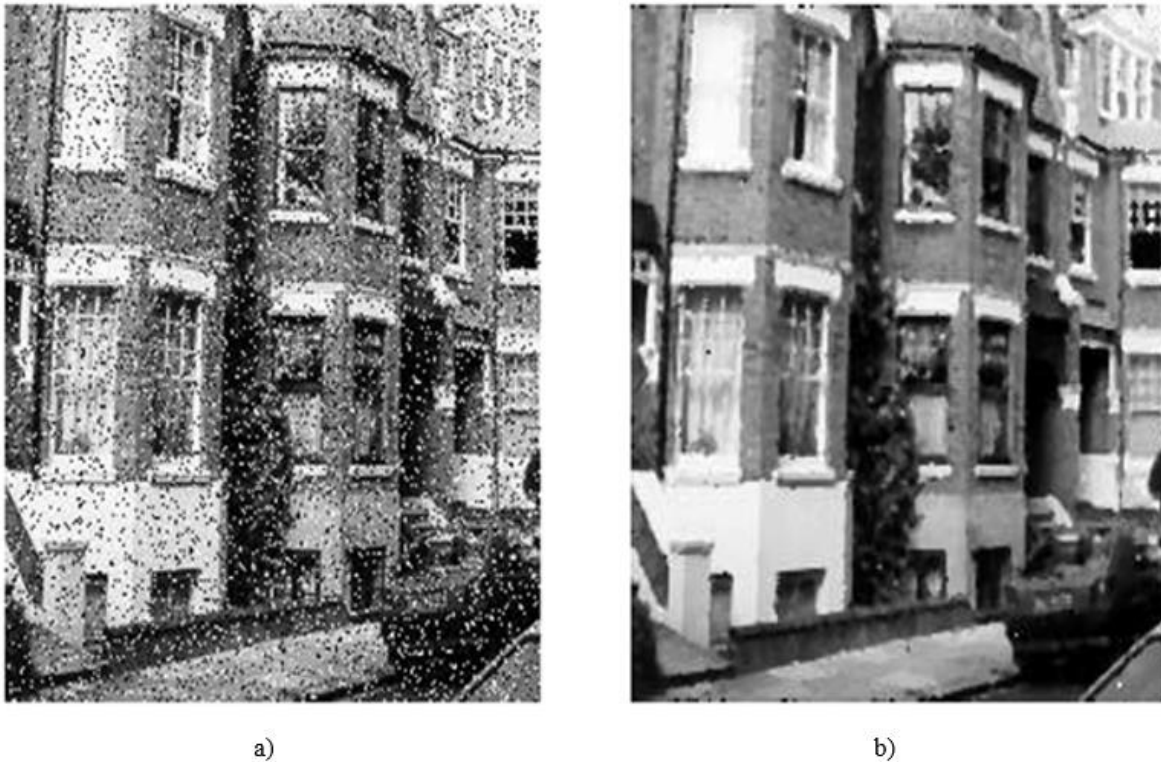


Figura 1. 5 Eliminación de ruido en una imagen. En a) la imagen presenta ruido, en b) la imagen sin ruido tras ser procesada.

Otro caso en el que se puede requerir el procesamiento de imágenes, es para la eliminación del desenfoque de movimiento de la misma, mayormente conocido como blur<sup>5</sup>, de igual modo que los dos casos anteriores existirán técnicas que permitan corregir este error, como por ejemplo el mostrado en la Figura 1.6.

---

<sup>5</sup> Blur: o Motion Blur es un efecto de rastro dejado por los objetos en movimiento en una fotografía o secuencia de imágenes, en la cual el objeto al ser grabado cambia su posición durante la captura.



a)



b)

Figura 1. 6 Imagen procesada para eliminar el desenfoco o Motion blur, que se aprecia en a) y cuyo resultado se obtiene b).

Por otro lado para que una computadora tenga un mejor desempeño en el procesamiento de una imagen como por ejemplo en los casos anteriores, de igual modo se presentan técnicas de procesado que coadyuvan a que la computadora interprete de mejor manera los datos.

Uno de estos casos es el utilizado para la obtención de líneas o bordes en una imagen, el cual es útil para la medición de objetos, permitiendo con ello la identificación del área que ocupan los objetos en una imagen, como por ejemplo el que observamos en la Figura 1.7, además esta técnica puede servir como previo para aquella en que se requiere el afilado de bordes.

Otro caso en el cual podemos tratar la imagen para simplificarla es en donde se presenta la extracción de detalles, esta técnica nos puede servir para el conteo de objetos, pues no es necesario tener una imagen nítida y clara para tal fin, permitiendo con ello que el procesamiento sea mucho más rápido y sencillo de ejecutar. La Figura 1.8 muestra cómo podemos reducir los detalles de la imagen pero manteniendo los objetos visibles y fácilmente identificables.



a)



b)

Figura 1. 7 Técnica utilizada para la identificación de bordes en una imagen, a) imagen original, b) imagen obtenida al aplicar el algoritmo de obtención de bordes.



a)



b)

Figura 1. 8 Proceso de extracción de detalles de una imagen original a), obteniendo de resultado la imagen b), para disminuir el trabajo de procesado en la computadora.

## 1.9 Resolución de una imagen

Hemos visto una variedad de técnicas de procesamiento que se pueden utilizar para el mejoramiento de una imagen, otra no menos importante y que está relacionada con algunas de las anteriores es la que corresponde a la resolución en una imagen.

## 1.10 Concepto

La resolución en su forma más simple se define como el más mínimo detalle perceptible o medible en una presentación visual. Investigadores en el campo del procesamiento digital de imágenes utilizan el término de resolución en tres distintas formas [13]:

- La resolución espacial: se refiere a la separación de los píxeles en una imagen y se mide en píxeles por pulgada (ppi). De forma que cuanto mayor sea la resolución espacial, mayor es el número de píxeles en la imagen y cuanto menor sea el número de píxeles menor será el tamaño de la imagen.
- La resolución de brillo: se refiere al número de niveles de brillo que se puede grabar en un píxel dado. Esto está relacionado con la cuantización de la energía de luz colectada en un dispositivo de carga acoplada (CCD). La resolución de brillo para imágenes monocromáticas suele ser de 256, implicando con ello que un nivel está representado por 8 bits.
- La resolución temporal: se refiere al número de fotogramas capturados por segundo, comúnmente conocido como velocidad de fotogramas. Está relacionado a la cantidad de movimiento perceptible entre los cuadros, siendo el típico de frecuencia de imagen para una vista agradable de al menos 24 fotogramas por segundo.

En esta tesis el término de resolución de forma inequívoca se referirá al de la resolución espacial, de modo que en las imágenes almacenadas como mapa de bits, se describe a la resolución como dos números enteros expresados en forma de producto, en donde el primero indica el número de píxeles de ancho (columnas) y el segundo el número de píxeles por alto (filas). De esta forma se puede describir una imagen en término de sus píxeles, la forma de calcularlo es multiplicando el número de filas por columnas. La Figura 1.9 muestra cómo se vería la imagen de acuerdo a esta operación en la resolución.

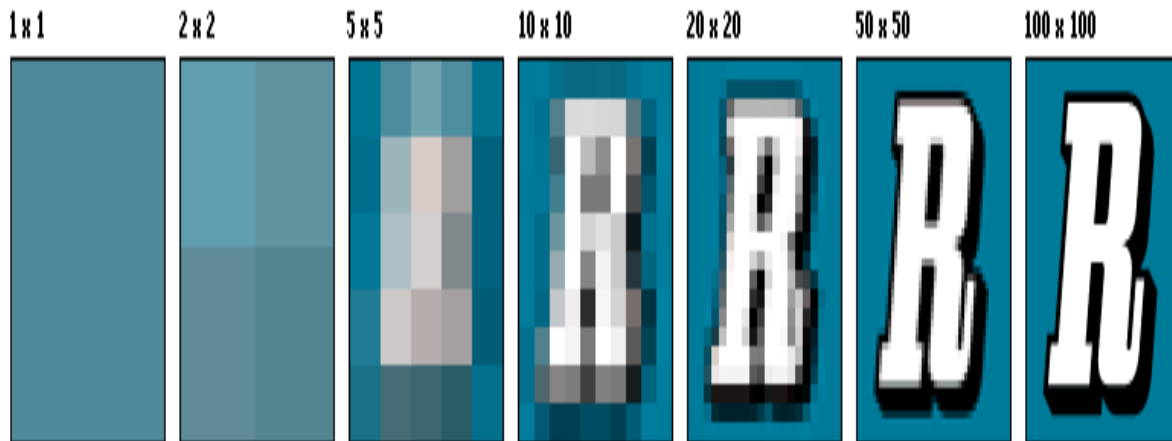


Figura 1. 9 Resolución en una imagen a partir de su número de píxeles.

## 1.11 Súper resolución

La súper resolución es conocida como un conjunto de técnicas que están diseñadas para aumentar la resolución espacial en una imagen, generalmente se realiza sobre la misma a partir de una secuencia de imágenes de menor resolución, el propósito general es el de obtener detalles que en un principio no eran apreciables en las imágenes originales [13].

## 1.12 Aplicaciones de la súper resolución

Debido a que la mayoría de la información que recibe el ser humano proviene por medios visuales y dado que la resolución de una imagen depende del dispositivo donde ha sido adquirida, dentro del procesamiento de imágenes se desarrolló la súper resolución de imágenes digitales, como una alternativa que fuese capaz de brindar un resultado esclarecedor ante el deseo de obtener una imagen con mayor cantidad de detalle a la que pudiese brindar un dispositivo por si solo como una cámara digital [13].

De esta manera, una imagen de alta resolución podría contribuir a una mejor clasificación de las regiones en una imagen multiespectral, o en una imagen telescópica podría reducir significativamente el margen de error en la identificación de la posición de estrellas y

planetas, o mostrar con mejor detalle su composición física en el caso de imágenes de satélite, también puede ayudar a una localización más precisa de un tumor en una imagen médica o podría facilitar una visión más agradable en los sistemas de video vigilancia.

## Capítulo 2

### Métodos clásicos de súper resolución

Como hemos visto anteriormente el procesamiento digital de imágenes, provee las herramientas para la manipulación de las mismas, una rama en específico que se encarga de manipular la cantidad de pixeles que posee una imagen, es la de súper resolución. Existen una gran cantidad de técnicas para llevar a cabo tal tarea, todas ellas utilizando como base operaciones matemáticas sobre matrices. La complejidad de las mismas reside en la teoría en la que se basen, habiendo métodos que van desde el uso de transformadas de Fourier, la transformada discreta del coseno, o con el uso de la transformada wavelet<sup>6</sup>. Sin embargo desde los orígenes del procesamiento digital de imágenes existen métodos menos complejos que pese a lo largo de los años su desempeño sigue siendo excelente, tanto que aun hoy en día son utilizados por programas de alto desempeño en el tratamiento de imágenes como Photoshop.

#### 2.1 Replica de pixel

Este es un método bastante sencillo y suele confundirse con el método de interpolación del vecino más cercano, únicamente realiza un copiado del pixel y lo almacena en una nueva localidad de acuerdo al factor de súper resolución deseado. Por ejemplo la Figura 2.1 muestra la representación matricial de una imagen, en ella podemos apreciar que cada casilla posee un valor numérico, este valor representa el nivel de gris o de coloración en una imagen que vendría a ser un pixel en la imagen [27].

---

<sup>6</sup> La transformada de ondícula o mejor conocida como transformada wavelet, es un tipo especial transformada matemática que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada óndula madre)

22	25	35	45	55
24	32	24	54	66
36	22	66	53	55
45	47	56	45	32
65	55	55	88	98

Figura 2.1 Representación de una imagen vista como matriz, cada casilla es información pictórica.

Posteriormente para obtener una imagen del doble de resolución en esta tesis se propone un método el cual consiste en primero crear una matriz vacía (de ceros) del factor de súper resolución deseado para en ella almacenar la imagen procesada con el algoritmo, por ejemplo la Figura 2.1 tiene una dimensión de 5x5, si quisiéramos aumentar al doble su resolución crearíamos una matriz vacía de 10x10, al cuádruple de 20x20, al óctuple de 40x40 y así sucesivamente, posteriormente para el copiado de los pixeles, como no es posible hacer operaciones entre sí con matrices de distinto tamaño, se toman uno a uno los valores de la matriz (imagen original) y son ordenados en un solo vector fila, finalmente éstos se copian en orden el número de veces deseado de acuerdo al factor de interpolación que hayamos escogido.

La Figura 2.2 resume este proceso para un factor del doble, primero se tiene una imagen de baja resolución a), se crea una matriz de ceros del doble del tamaño de la original b), los valores son entonces copiados a la matriz agrandada respetando la posición c), debido a que la información es la misma entre los 4 pixeles, se crea un efecto de pixel agrandado d).

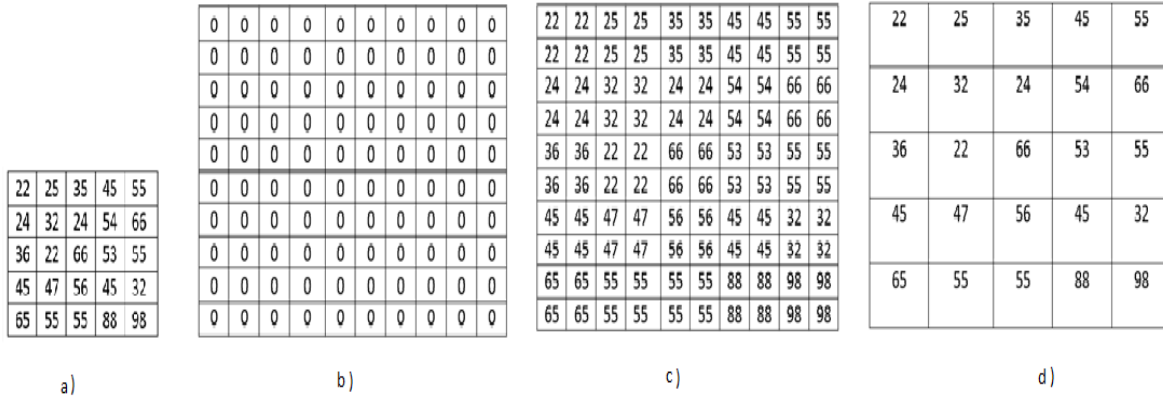


Figura 2. 2 Obtención de imagen de SR por medio de réplica de pixel. a) Imagen original, b) imagen del doble de tamaño donde será almacenada la imagen de SR, c) copiado de pixeles, imagen de SR d) efecto al poseer la misma información pictórica.

Aunque pudiera parecer que el pixel se agranda, en realidad no es así, puesto que las dimensiones siguen siendo del doble del tamaño (10x10) que la original (5x5). La Figura 2.3 muestra cómo se vería una imagen de color con esta técnica.

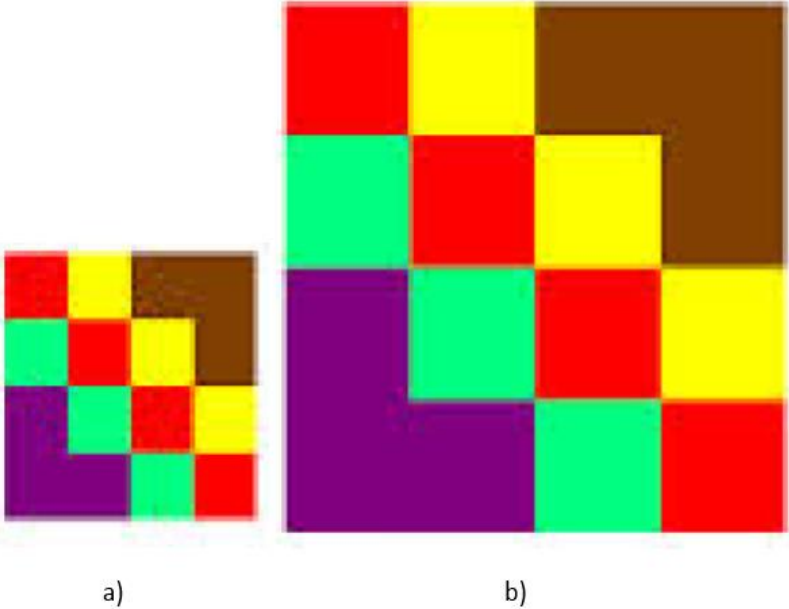


Figura 2. 3 Replica de pixel en imágenes a color, a) imagen de baja resolución b) imagen de súper resolución.

## 2.2 Proceso de plantilla de convolución

Para explicar el funcionamiento de los métodos de interpolación primero definiremos el proceso de plantilla de convolución, o como comúnmente se le conoce como “proceso de rejilla”

El proceso de plantilla (o rejilla) de convolución consiste en crear un arreglo compuesto por un conjunto de coeficientes de ponderación, generalmente la plantilla es de tipo cuadrada y su tamaño casi siempre es impar para poderse colocar de forma adecuada, por ejemplo, una plantilla de 3x3 es de tres pixeles de ancho por tres pixeles de largo (en total 9), generalmente la plantilla se sitúa centrada al pixel de referencia, de forma que el pixel al centro de la plantilla es el pixel de referencia, a partir de su colocación se pueden calcular nuevos valores del pixel, por medio de operaciones matemáticas cuyo resultado de estas se convierte en el pixel de salida.[14]

Su posicionamiento inicial se observa en la Figura 2.4 y es como sigue; se tiene una imagen, a esta se le superpone una rejilla deslizante de 3x3 de dimensión, como referencia se toma el pixel central, es decir, el que está en la posición (2,2) de la rejilla y que en la imagen corresponde al de la posición (1,1). Siendo esta la posición inicial, la rejilla realizará un barrido a lo largo y ancho de la imagen desplazándose de derecha a izquierda y de arriba hacia abajo en el orden de una casilla, la rejilla entonces irá adquiriendo los valores que contenga en cada desplazamiento e ira manipulándolos según el uso deseado (filtrado, súper resolución, etc.) hasta llegar al último pixel de la esquina inferior derecha.

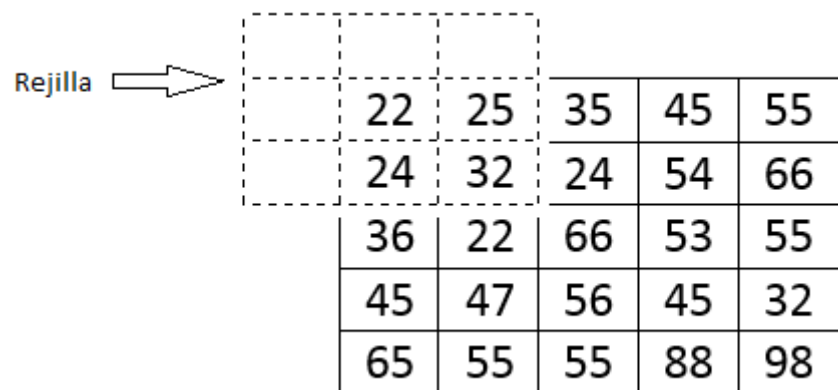


Figura 2. 4 Inicio del recorrido de rejilla deslizante.

Nótese entonces que habría que ajustar la imagen original para poder hacer la lectura del primer pixel (y en general de los pixeles de los límites) puesto que la rejilla se sale de la imagen original y generaría problemas en la toma de datos, generalmente para evitar este inconveniente se suelen adherir filas y columnas de ceros a la imagen original para permitir que la rejilla abarque a toda la imagen original y al final restar las mismas para no afectar a las dimensiones de la imagen.

## 2.3 Interpolación ponderada del vecino más cercano.

La interpolación es un proceso matemático que consiste en la generación de nuevos datos a partir de los existentes, la finalidad es la de conseguir un número de datos mayor que posean las mismas características de aquellos en los que previamente se tomaron como base para generar los nuevos [15].

En el caso del procesamiento digital de imágenes, el método es aplicado a los pixeles de la imagen misma, esto significa que en una imagen se crean nuevos pixeles a partir de los ya existentes, procurando mantener la homogeneidad<sup>7</sup> entre los mismos. Esta técnica de interpolar los pixeles en una imagen se utiliza en procesos como rotaciones de imagen, deformación, obtención de pixeles concretos, ampliación de imágenes, etc.

En nuestro caso nos centraremos en el de la ampliación de imágenes digitales o aumento de resolución, el cual es uno de los usos más comunes que tiene la técnica de la interpolación.

El método de interpolación ponderada del vecino más cercano propone que; para generar el nuevo pixel se tome el valor máximo de intensidad de una vecindad de pixeles en específico dentro de la rejilla [16], de forma que aquel pixel que presente mayor intensidad será el nuevo pixel para la imagen de súper resolución, visto de otra manera la Figura 2.5 nos muestra el barrido de la rejilla a lo largo de toda la imagen, siendo la posición de la esquina superior izquierda el comienzo del barrido y la posición de la esquina inferior derecha el final de todo el barrido,  $P_r$  representa el pixel de referencia que nos dice la posición de la rejilla, conforme se dé el desplazamiento de la rejilla,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  serán los valores que tomaremos de la tercer

---

<sup>7</sup> Homogeneidad: implica que está formado por elementos que presentan una serie de características comunes referidas a su naturaleza, para establecer entre ellos una relación de semejanza.

columna de la rejilla, estos tres valores serán comparados entre si y se obtendrá aquel que posea el valor de intensidad más alto, dando como resultado que el nuevo pixel ( $N_p$ ) será la copia de aquél que tenga mayor intensidad.

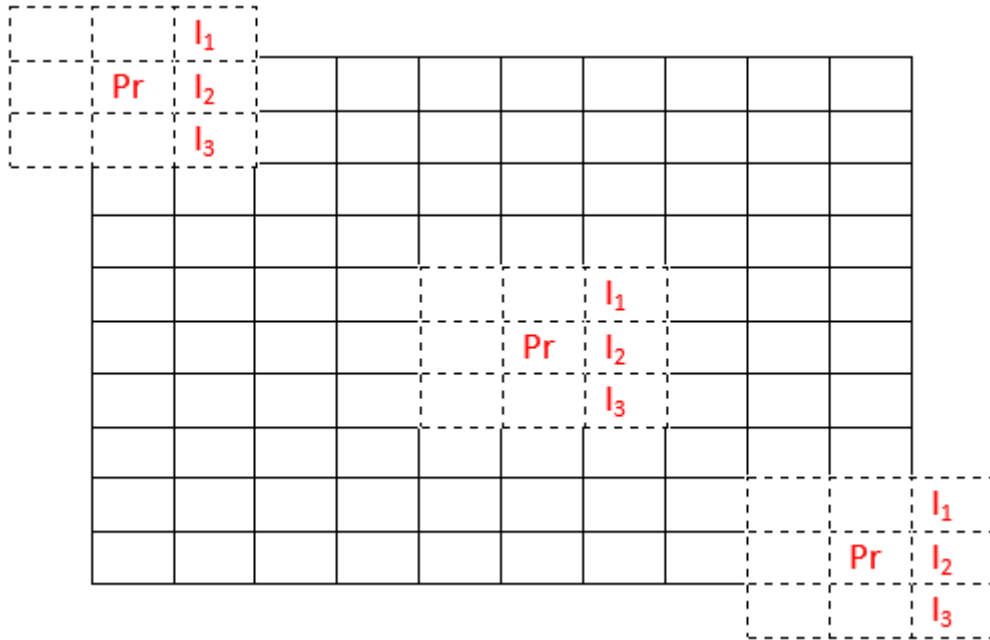


Figura 2. 5 Obtención del pixel de SR en método de interpolación ponderada del vecino más cercano con una rejilla de 3x3.

La Ecuación 2.1 describe el proceso para la obtención del nuevo pixel de súper resolución. Donde  $N_p$  será el pixel de súper resolución.

$$N_p = \text{maximo}(\text{maximo}(I_1, I_2, I_3)). \quad (2.1)$$

Nótese que al final del barrido de la rejilla, esta tomará los valores de cero correspondientes a las filas y columnas agregadas para el encuadre, para evitar que la imagen resultante no tenga este defecto, como solución general a este inconveniente en algunos de los algoritmos desarrollados se decidió que para no afectar los procesos de súper resolución, al final del proceso mismo se realice un ajuste de imagen, este ajuste de imagen consiste en copiar las filas y columnas con valores más cercanos que no sean cero en su totalidad. Es decir si por ejemplo las filas y columnas 1 y 2 respectivamente de la imagen resultante (SR) son cero,

se ha de copiar la fila y columna 3 en la posición de las anteriores y con ello conseguir una imagen uniforme.

Finalmente en este método se desarrollaron tres algoritmos que implementarán tres tipos de rejillas, una de 3x3 como en la Figura 3.5 anterior, otra de 5x5 y de 7x7 de acuerdo a las Figuras 2.6 y 2.7 respectivamente.

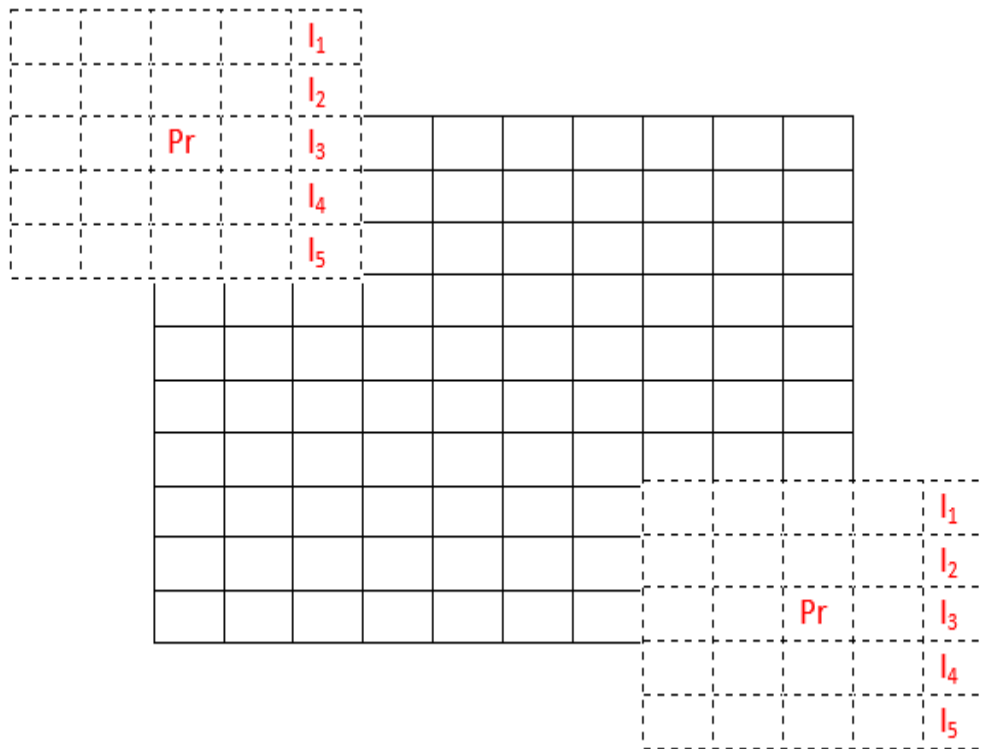


Figura 2. 6 Obtención del pixel de SR en método de interpolación ponderada del vecino más cercano con una rejilla de 5x5.

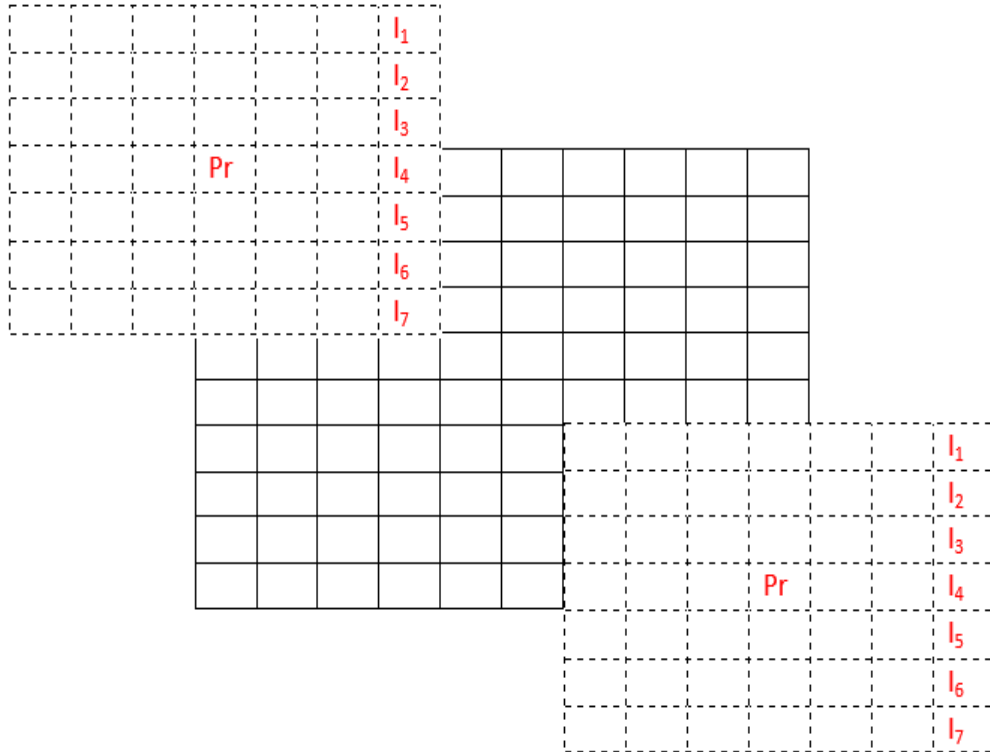


Figura 2. 7 Obtención del pixel de SR en método de interpolación ponderada del vecino más cercano con una rejilla de 7x7.

Obsérvese también que al aumentar la rejilla se tendrán un mayor número de vecinos a considerar para la obtención del valor máximo en este método.

## 2.4 Interpolación del vecino más cercano

En el método de interpolación del vecino más cercano [17] de la Figura 2.8 se muestra como el barrido de la rejilla de 3x3 sobre la imagen, tomará el valor del vecino más cercano ( $I_1$ ) correspondiente a la posición (1,1) de la rejilla, vemos que el pixel  $I_1$  está al rededor del pixel de referencia (Pr). Nótese que al comienzo del barrido los pixeles tomarán el valor de 0 ya que la posición de  $I_1$  cae de acuerdo a las filas y columnas agregadas para el encuadre de la rejilla. Para evitar que la imagen resultante presente este inconveniente se aplica el ajuste descrito en el punto 2.2.

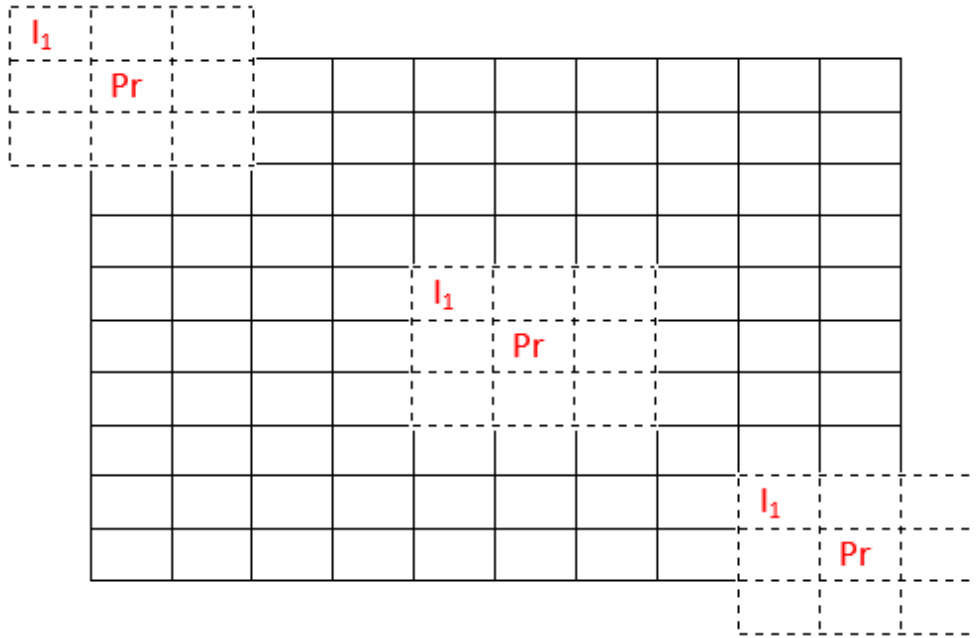


Figura 2. 8 Obtención del pixel de SR en método de interpolación del vecino más cercano en rejilla de 3x3.

De igual forma este método se implementó en algoritmos con rejillas de 3x3, 5x5 y 7x7 en donde la selección del nuevo pixel  $N_p$  se toma igualmente de la posición (1,1) de cada rejilla.

Finalmente las Ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4, y 2.5 muestran los pixeles que se tomarán para formar una imagen de SR estas ecuaciones aplican para los tres tipos de rejilla descritos.

$$P_1 = I_1, \quad (2.2)$$

$$P_2 = I_1, \quad (2.3)$$

$$P_3 = I_1, \quad (2.4)$$

$$P_4 = I_1. \quad (2.5)$$

Donde  $P_1, P_2, P_3$  y  $P_4$  pasarán a ser los valores de salida que generarán 4 nuevos pixeles dando origen a una imagen del doble del tamaño con respecto a la original.

## 2.5 Interpolación lineal

A diferencia de los tres métodos anteriores en donde solo se copian los pixeles de acuerdo a su posición o peso, el método de interpolación lineal utiliza un polinomio interpolador cuyo

objetivo es el de obtener un valor a partir de 4 píxeles vecinos, en consecuencia el resultado de este promedio da valor al nuevo píxel de SR generado [18].

La Figura 2.9 muestra este proceso para una rejilla de 3x3. En ella se puede observar que las posiciones de los píxeles (1,1), (1,3), (3,1) y (3,3) correspondientes a la rejilla, pertenecen a los vecinos interpoladores  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$  del píxel de referencia  $P_r$ , entonces la Ecuación 2.6 describe al polinomio interpolador en función de estos píxeles, con las consideraciones de las Ecuaciones 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10

$$f(x, y) = (1 - a) (1 - b) (I_1) + a (1 - b) (I_2) + (1 - a) b (I_3) + a b (I_4). \quad (2.6)$$

Donde:

$$l = \text{próximo}(x), \quad (2.7)$$

$$k = \text{póximo}(y), \quad (2.8)$$

$$a = x - l, \quad (2.9)$$

$$b = y - k. \quad (2.10)$$

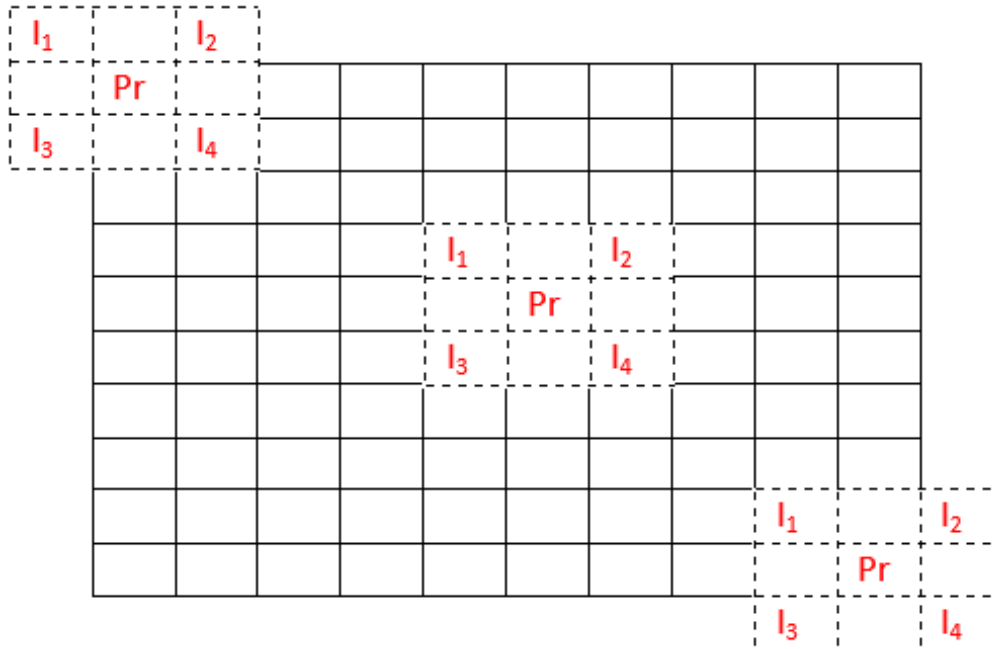


Figura 2. 9 Obtención del píxel de SR en método de interpolación lineal en rejilla de 3x3.

Este método de igual modo se realizó para rejillas de 5x5 y 7x7 conservando la selección de los pixeles de interpolación de los extremos de las rejillas, siendo las ecuaciones del polinomio interpolador así como sus restricciones las mismas al de la rejilla de 3x3.

### 2.6 Interpolación Bilineal

Si en una imagen se interpola linealmente a lo largo de cada fila y posteriormente a lo largo de cada columna, el resultado que se obtiene es una interpolación bilineal [20, 21].

Entonces en este método, de igual forma que en los métodos del vecino y lineal se utiliza una rejilla deslizante, pero además de igual forma que el método de interpolación lineal en este consideraremos dos polinomios de interpolación que consideran más vecinos para la obtención de promedios de interpolación, que a su vez darán lugar al nuevo pixel de salida. La Figura 2.10 señala como se tomarían los pixeles para crear los promedios interpoladores.

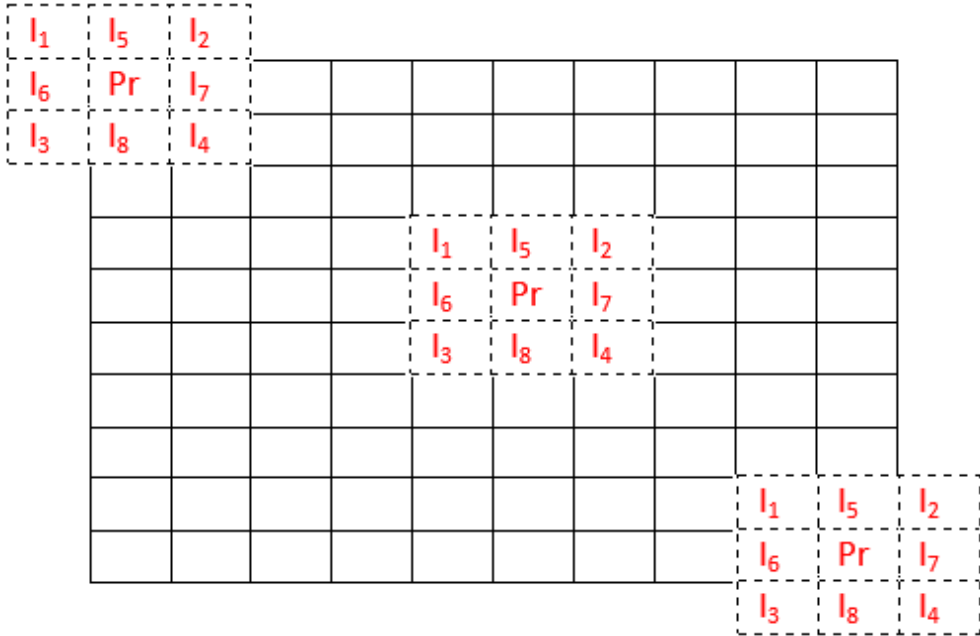


Figura 2. 10 Obtención del pixel de SR en método de interpolación Bilineal en rejilla de 3x3.

De acuerdo a la Figura 2.10 tenemos que los pixeles  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$  de la rejilla de convolución corresponderán al primer polinomio interpolador, mientras que los pixeles  $I_5$ ,  $I_6$ ,  $I_7$  e  $I_8$  corresponderán al segundo polinomio de interpolación, una vez establecidos ambos

polinomios se aplicarán las Ecuaciones 2.11 y 2.12 para obtener un valor por cada promedio calculado.

$$f_1(x, y) = (1 - a) (1 - b) (I_1) + a (1 - b) (I_2) + (1 - a) b (I_3) + a b (I_4), \quad (2.11)$$

$$f_2(x, y) = (1 - c) (1 - d) (I_5) + c (1 - d) (I_6) + (1 - c) d (I_7) + c d (I_8). \quad (2.12)$$

Donde nuevamente se tienen las restricciones de las Ecuaciones 2.13 y 2.14 para ambos polinomios  $f_1$  y  $f_2$ .

$$l = \text{próximo}(x), \quad (2.13)$$

$$k = \text{próximo}(y). \quad (2.14)$$

Además para la Ecuación 2.11 se tienen las restricciones de las Ecuaciones 2.15 y 2.16 donde:

$$a = x - l, \quad (2.15)$$

$$b = y - k. \quad (2.16)$$

Mientras que para la Ecuación 2.12 se tienen las restricciones de las Ecuaciones 2.17 y 2.18 donde:

$$c = x - k, \quad (2.17)$$

$$d = y - l. \quad (2.18)$$

Una vez que se han obtenido los resultados correspondientes a cada polinomio de interpolación el nuevo pixel  $N_p$  se obtendrá de un promedio de estos, de acuerdo a la Ecuación 2.19.

$$N_p = \frac{f_1(x, y) + f_2(x, y)}{2}. \quad (2.19)$$

Este nuevo pixel resultante será el que se utilice para la imagen de súper resolución el cual será copiado en función del factor deseado en el agrandado de la imagen. De igual forma en este método se han empleado rejillas de 5x5 y 7x7 de acuerdo a las Figuras 2.11 y 2.12

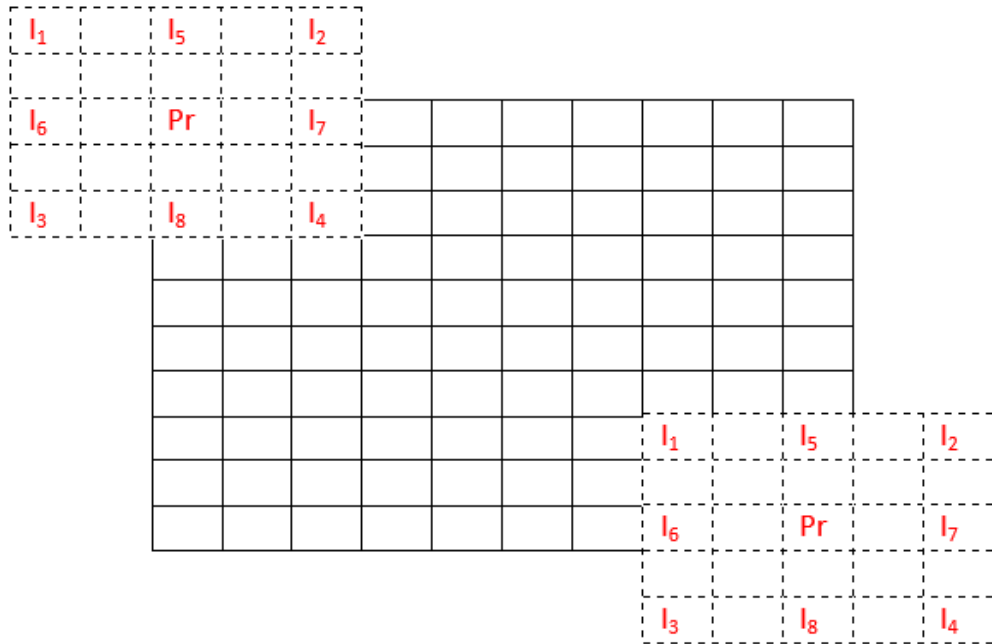


Figura 2. 11 Obtención del pixel de SR en método de interpolación Bilineal en rejilla de 5x5.

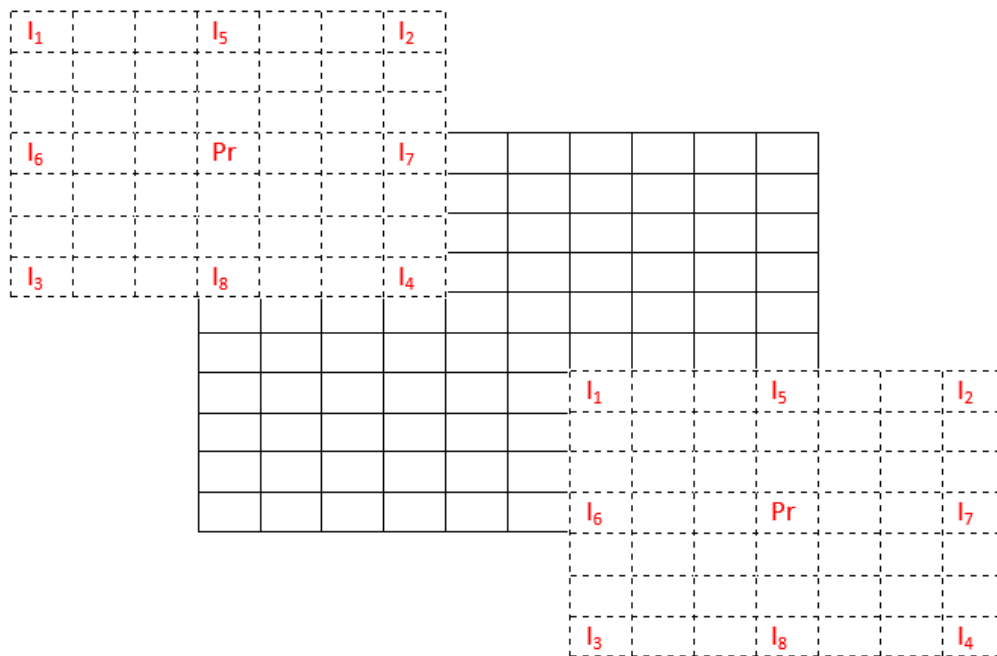


Figura 2. 12 Obtención del pixel de SR en método de interpolación Bilineal en rejilla de 7x7.

## 2.7 Interpolación Bicúbica I

La interpolación Bicúbica es uno de los métodos más utilizados en la súper resolución de imágenes, aunque requiere un mayor consumo computacional, los resultados son mejores respecto a los métodos de interpolación anteriores. El método funciona a partir de tomar una vecindad de 16 pixeles como se observa en la Figura 2.13.

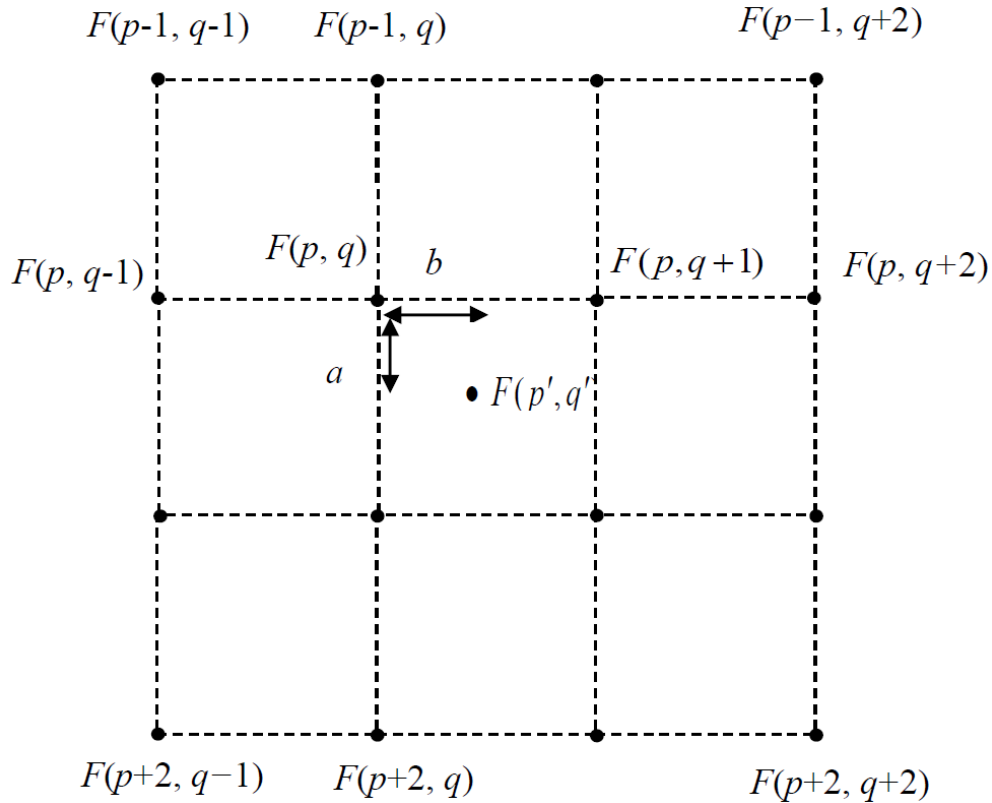


Figura 2. 13 Proceso de interpolación Bicúbica en una vecindad de 16.

En dicha figura podemos apreciar que el nuevo pixel  $F(p', q')$  se formará a partir de dos distancias  $a$  y  $b$  con referencia al pixel vecino más cercano  $F(p, q)$ .

En este método la rejilla no se aumentará, en su lugar se ha optado por probar diferentes polinomios de interpolación bicúbica, específicamente 3, existentes en la literatura del PDI, dando como resultado 3 algoritmos de interpolación bicúbica distintos.

Para el caso del algoritmo de interpolación bicúbica I [28]. El proceso es como sigue:

Se interpola horizontalmente (eje x) y verticalmente (eje y) utilizando las Ecuaciones 2.20 y 2.21.

$$f_{HR}(p', q') = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 F(p + m, q + n) * R(x), \quad (2.20)$$

$$f_{HR}(p', q') = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 F(p + m, q + n) * R(y). \quad (2.21)$$

Donde x e y están dadas por las Ecuaciones 2.22 y 2.23.

$$x = m - a, \quad (2.22)$$

$$y = n - b. \quad (2.23)$$

Como se observa x e y serán un valor obtenido al calcular la diferencia entre las coordenadas a y b de acuerdo a la Figura 2.13 con los valores m y n de la serie, posteriormente este valor resultante será evaluado en el polinomio de interpolación para x e y respectivamente en las Ecuaciones 2.24 y 2.25.

$$R(x) = \frac{1}{6} [P(x + 2)^3 - 4P(x + 1)^3 + 6P(x)^3 - 4P(x - 1)^3], \quad (2.24)$$

$$R(y) = \frac{1}{6} [P(y + 2)^3 - 4P(y + 1)^3 + 6P(y)^3 - 4P(y - 1)^3]. \quad (2.25)$$

Finalmente existe una restricción que se aplica para cada polinomio según las ecuaciones 2.26 y 2.27

$$P = \begin{cases} x & x > 0, \\ 0 & x \leq 0, \end{cases} \quad (2.26)$$

$$P = \begin{cases} y & y > 0, \\ 0 & y \leq 0. \end{cases} \quad (2.27)$$

## 2.7.1 Interpolación Bicúbica II

Para el método de interpolación Bicúbica II [30]. La expresión que evalúa la vecindad de los 16 pixeles vecinos es similar a la de Bicúbica I, está dada de acuerdo a la Ecuación 2.28. Con sus restricciones en las Ecuaciones 2.29 y 2.30.

$$F(p', q') = \sum_{m=-1}^2 \sum_{n=-1}^2 F(p + m, q + n) * H_c(m - a) * H_c(n - b), \quad (2.28)$$

$$H_c(x) = h(x), \quad (2.29)$$

$$h(x) = \begin{cases} \frac{3}{2}|x|^3 - \frac{5}{2}|x|^2 + 1 & \text{si } 0 < |x| < 1, \\ -\frac{1}{2}|x|^3 + \frac{5}{2}|x|^2 - 4|x| + 2 & \text{si } 1 < |x| < 2, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2.30)$$

Donde F (p, q) es el vecino más cercano que sirve como referencia para obtener F (p', q') el cual es el nuevo pixel de SR, H<sub>c</sub>(x) es la evaluación del polinomio en x, siendo esta ultima la diferencia entre las coordenadas a y b con los valores m y n de la serie de acuerdo a la Figura 2.13. La ecuación 2.30 interpola en x (m-a), por lo que después habría que interpolar en y (n-b) como se realizó en Bicúbica I.

## 2.7.2 Interpolación Bicúbica III

Para el método de interpolación Bicúbica III [32]. La expresión que evalúa la vecindad de los 16 pixeles vecinos es la misma que la de la interpolación bicúbica II, cambiando únicamente el polinomio interpolador, entonces el algoritmo se construye de acuerdo a la Ecuación 2.31. Con sus restricciones en las Ecuaciones 2.32 y 2.33 en la que habría que interpolar en x e y.

$$F(p', q') = \sum_{m=-1}^2 \sum_{n=-1}^2 F(p + m, q + n) * H_c(m - a) * H_c(n - b), \quad (3.31)$$

$$H_c(x) = h(x), \quad (3.32)$$

$$h(x) = \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & \text{si } 0 < |x| < 1, \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & \text{si } 1 < |x| < 2, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (3.33)$$

Donde nuevamente  $F(p, q)$  es el vecino más cercano que sirve como referencia para obtener  $F(p', q')$  el cual es el nuevo pixel de SR,  $H_c(x)$  es la evaluación del polinomio en  $x$ , siendo esta última la diferencia entre las coordenadas  $a$  y  $b$  con los valores  $m$  y  $n$  de la serie de acuerdo a la misma Figura 2.13 y las Ecuaciones 2.22 y 2.23 de Bicúbica I.

## Capítulo 3

### Desarrollo y evaluación de los métodos investigados

Hemos visto anteriormente los métodos más comunes en súper resolución de imágenes, ahora en este capítulo nos centraremos en su desarrollo en software de simulación para con ello evaluarlos y revisar su desempeño más profundamente.

#### 3.1 Desarrollo de algoritmos

Para la elaboración de los algoritmos se ha elegido la herramienta MATLAB R2013a [21-23], ya que es un entorno matemático bastante útil que permite la manipulación de matrices de forma muy intuitiva. En cuanto a los algoritmos se han realizado dos versiones para cada método de los vistos en el capítulo 2, una versión en escala de grises y otra versión para imágenes en RGB. Algunos de ellos variando el tamaño de la rejilla y en el caso de los de interpolación bicúbica cambiando el polinomio de interpolación.

#### 3.2 Imágenes de prueba

Para la evaluación del desempeño de los algoritmos se han utilizado una serie de imágenes de varios tipos y características que cubran algunos escenarios posibles de la vida real, para ello se han seleccionado imágenes estándar, imágenes médicas, imágenes satelitales y por último, imágenes de tráfico vial. A su vez se tendrán tres categorías de imágenes, las imágenes originales (imágenes de alta resolución HR), las imágenes de baja resolución (imágenes LR) y las imágenes obtenidas mediante los algoritmos de súper resolución (imágenes SR).

La idea es tener una imagen de referencia (imagen HR), a la que se le bajará la resolución con la ayuda de la instrucción “imresize” obteniendo así una imagen de baja resolución (imagen LR), y por medio de los algoritmos de súper resolución obtener una imagen de súper resolución (imagen SR) de las mismas dimensiones que la imagen HR con la finalidad de comparar ambas imágenes (HR y SR).

### 3.2.1 Imágenes estándar

Primeramente se ha seleccionado un conjunto estándar ampliamente utilizado en el procesamiento digital de imágenes (PDI) por sus características y diversidad en fuentes visuales, obtenidas en bases de datos de algunas universidades de Estados Unidos especializadas en el PDI, [36-38] estas imágenes son: a) Baboon, b) Goldhill, c) Barbara, d) JetPlane, e) Lena y f) Peppers, todas de 512x512 de resolución en formato BMP con 8 bits de profundidad para la simulación de los algoritmos en escala de grises de acuerdo a la Figura 3.1.

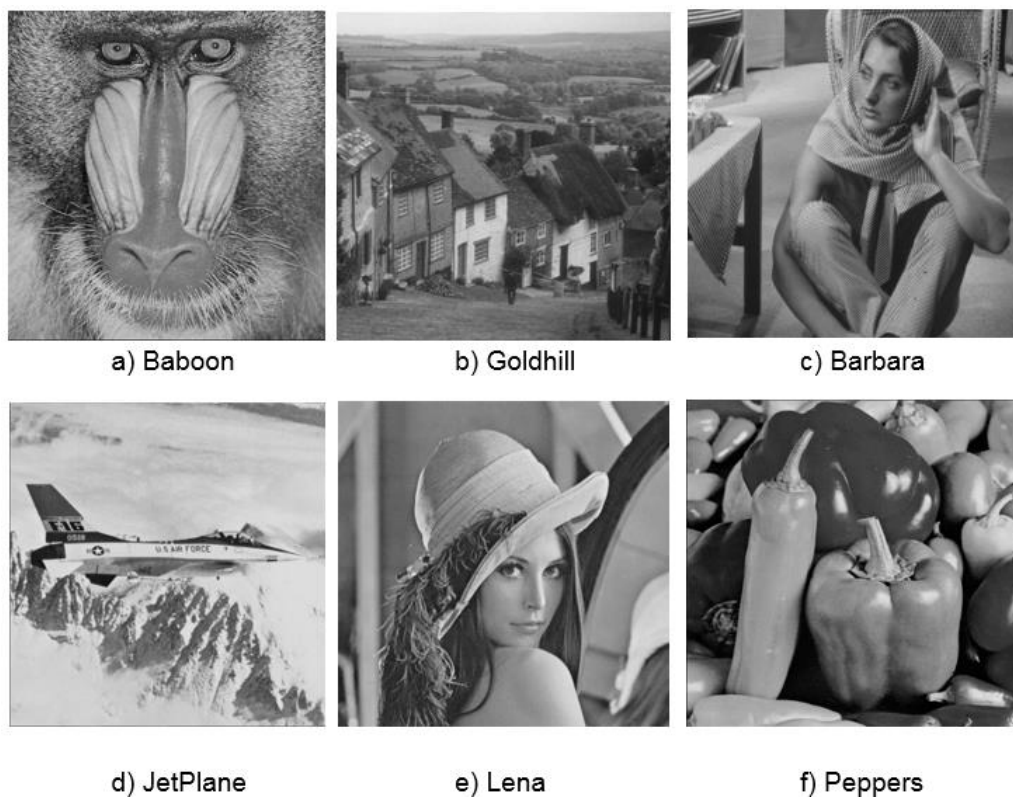


Figura 3. 1 Selección de imágenes estándar en escala de grises para algoritmos de SR.

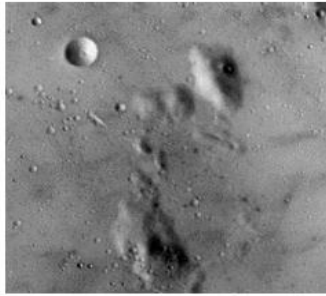
Y para los algoritmos en RGB se han seleccionado de igual forma, un set compuesto por: a) Baboon, b) Sailboat, c) House, d) JetPlane, e) Lena y f) Peppers, de 512x512 de resolución en formato TIFF con 24 bits de profundidad como el que muestra la Figura 3.2.



Figura 3. 2 Selección de imágenes estándar para algoritmos de SR en RGB.

### 3.2.2 Imágenes satelitales

Por su parte para las imágenes satelitales, obtenidas igualmente de base de datos especializadas para el uso de PDI [43], tenemos una selección de 6 imágenes nombradas a) Satellite01, b) Satellite02, c) Satellite03, d) Satellite04, e) Satellite05 y f) Satellite06 de 512x512 de resolución correspondientes a los algoritmos para imágenes en escala de grises en formato BMP con 24 bits de profundidad, como se observa en la Figura 3.3.



a) Satellite01



b) Satellite02



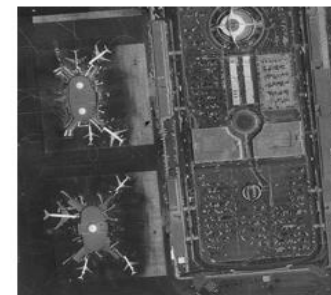
c) Satellite03



d) Satellite04



e) Satellite05



f) Satellite06

Figura 3. 3 Selección de imágenes satelitales para algoritmos de SR en escala de grises.

En cuanto a las imágenes satelitales para los algoritmos en imágenes a color se seleccionó de igual forma un conjunto de 6 imágenes nombradas; a) Satellite07, b) Satellite08, c) Satellite09, d) Satellite10, e) Satellite11 y f) Satellite12, de 512x512 de resolución en formato TIFF con 24 bits de profundidad, como el mostrado en la Figura 3.4.



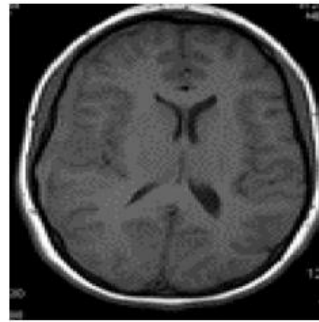
Figura 3. 4 Selección de imágenes satelitales para algoritmos de SR en RGB.

### 3.2.3 Imágenes médicas

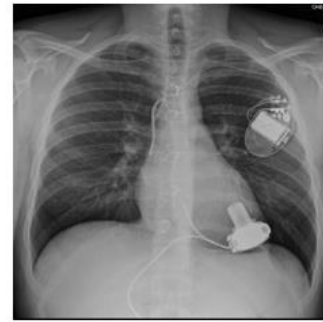
Para las imágenes médicas tenemos una selección de 6 imágenes en escala de grises de nombres; a) Medica01, b) Medica02, c) Medica03, d) Medica04, e) Medica05 y f) Medica06 como se observa en la Figura 3.5, estas imágenes muestran escenarios de radiografías, ultrasonidos y tomografías, obtenidas de la web en general [39-42], representan la naturaleza a la que pertenecen, siendo el tipo de imágenes más comunes que se pueden encontrar en su caso. Las imágenes constan de una resolución de 512x512 en formato JPG con 24 bits de profundidad.



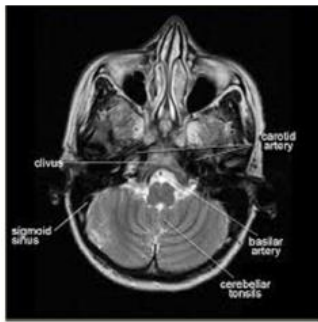
a) Medica01



b) Medica02



c) Medica03



d) Medica04



e) Medica05



f) Medica06

Figura 3. 5 Selección de imágenes médicas de muestra para algoritmos SR en escala de grises.

En cuanto a las imágenes a color se realizó una selección de 6 imágenes similar en escenarios a la de la escala de grises, utilizando de igual forma, el formato JPG a 512x512 de resolución con 24 bits de profundidad. Estas son: a) Medica07, b) Medica08, c) Medica09, d) Medica10, e) Medica11 y f) Medica12 tal como se observa en la Figura 3.6.

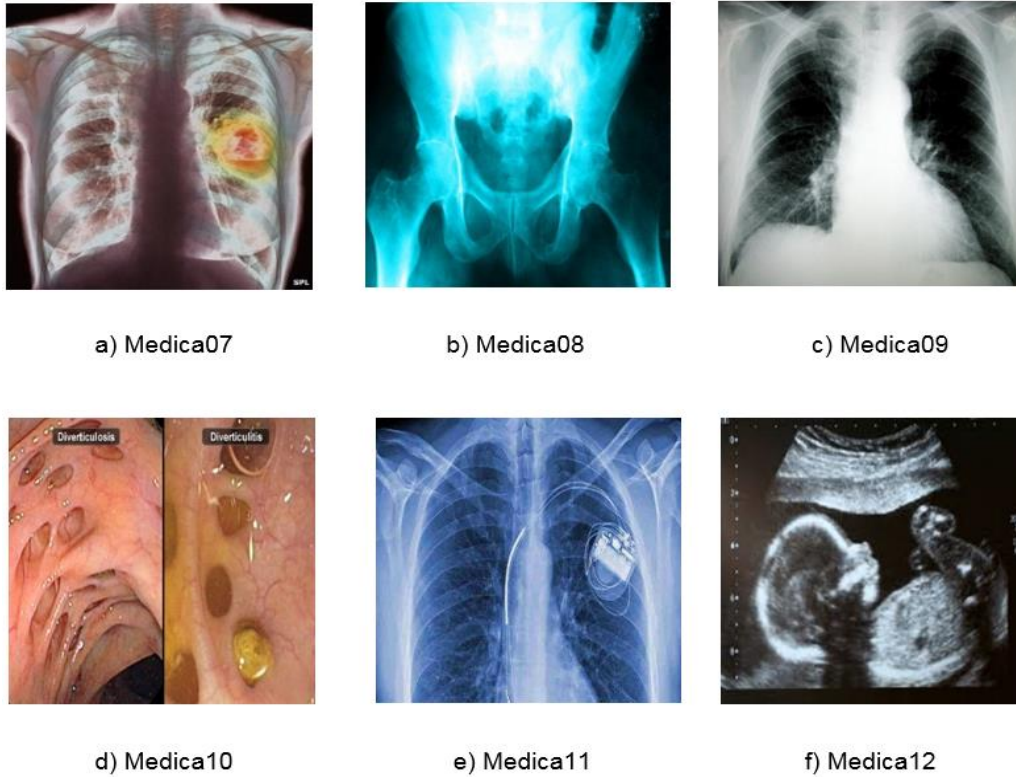


Figura 3. 6 Selección de imágenes médicas para algoritmos de SR en RGB.

### 3.2.4 Imágenes de tráfico vehicular

Por último los algoritmos se evaluarán con imágenes de tráfico vehicular, siendo este escenario uno de los ideales para la identificación de signos y letras, de modo que nos permitirá verificar su desempeño en imágenes de este tipo. Obtenidas algunas de bases de datos especializadas en PDI [43], y de la web en general [36-38], se ha hecho una selección de imágenes que muestren distintos ángulos y tomas de cámara en diferentes distancias de los objetivos, y con ello tener distintos escenarios dentro del mismo tipo de imagen.

Primeramente, para las imágenes en escala de grises se tienen 6 imágenes de acuerdo a lo mostrado en la Figura 3.7, las cuales se han nombrado como; a) Trafico01, b) Trafico02, c) Trafico03, d) Trafico04, e) Trafico05, y f) Trafico06. Las cuales a su vez poseen una resolución de 512x512 en formato PNG con 24 bits de profundidad.



a) Trafico01



b) Trafico02



c) Trafico03



d) Trafico04



e) Trafico05



f) Trafico06

Figura 3. 7 Selección de imágenes de tráfico vehicular para algoritmos de SR en escala de grises.

Finalmente la selección de las 6 imágenes de tráfico vehicular a color son las mostradas por la Figura 3.8 en las cuales nuevamente, se presentan distintos escenarios para identificar aspectos variados de la imagen. Las imágenes en formato PNG se han nombrado; a) Trafico07, b) Trafico08, c) Trafico09, d) Trafico10, e) Trafico11 y f) Trafico12, todas con una resolución de 512x512 con 24 bits de profundidad.



a) Trafico07



b) Trafico08



c) Trafico09



d) Trafico10



e) Trafico11



f) Trafico12

Figura 3. 8 Selección de imágenes de tráfico vehicular para algoritmos de SR en RGB.

### 3.3 Criterios objetivos de evaluación

Para comprobar el desempeño de los algoritmos desarrollados, existen una serie de criterios de medición ampliamente utilizados en PDI, estos miden de forma objetiva ciertos aspectos de la imagen que permiten esclarecer el desempeño de los algoritmos. Estos son: la relación pico señal a ruido (PSNR), el error absoluto medio (MAE), el índice de similitud estructural (SSIM) y la diferencia de color normalizado (NCD), este último solo aplicable en las imágenes a color.

### 3.3.1 Relación pico señal a ruido (PSNR)

El PSNR [26] determina la relación de la energía de una señal y el ruido que la afecta, su valor en escala logarítmica está dado en dB cuya expresión matemática está dada por la Ecuación 3.1, es una medida relativa de la calidad de imagen y se basa en el error cuadrático medio (MSE) de la Ecuación 3.2, el cual se utiliza como medida de desviación del promedio cuadrático para hallar la estimación del valor verdadero, es entonces la medida objetiva más común para comparar el filtrado de una imagen.

$$PSNR = 10 \log \left[ \frac{255^2}{MSE} \right] dB, \quad (3.1)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ \frac{(|R(i,j) - R'(i,j)|^2 + |G(i,j) - G'(i,j)|^2 + |B(i,j) - B'(i,j)|^2)}{3} \right]. \quad (3.2)$$

Donde M y N representan las dimensiones de la imagen, R (i, j), G (i, j), B (i, j) representan los valores de los planos de la imagen original (imagen HR) y R' (i, j), G' (i, j), B' (i, j) representan los valores de la imagen restaurada (imagen SR). Nótese entonces que en la Ecuación 3.2 se trata de una imagen en RGB por lo que para una imagen en escala de grises se omiten dos planos y el factor divisible.

### 3.3.2 Error absoluto medio (MAE)

El error absoluto medio [31] sirve para identificar la conservación de contornos y detalles finos, como está correlacionado con el sistema visual humano, se calcula por medio de la Ecuación 3.3.

$$MAE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ \frac{(|R(i,j) - R'(i,j)| + |G(i,j) - G'(i,j)| + |B(i,j) - B'(i,j)|)}{3} \right]. \quad (3.3)$$

Donde M, N, R (i, j), G (i, j), B (i, j) y R' (i, j), G' (i, j), B' (i, j) son los mismos parámetros de la Ecuación 3.2, y de igual forma para una imagen en escala de grises hay que tomar las consideraciones de la misma.

### 3.3.3 Índice de similitud estructural (SSIM)

Debido a que los dos parámetros anteriores suelen ser poco consistentes con la percepción del sistema visual humano, existe el índice de similitud estructural, el cual es una medida que pretende cuantificar de forma numérica y automática la calidad visual de una imagen para un observador humano [26], consiste en comparar tres aspectos de una imagen, estos son; la luminancia (Ecuación 3.4), el contraste (Ecuación 3.5), y la estructura (Ecuación 3.6).

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}. \quad (3.4)$$

Donde  $\mu_x$  y  $\mu_y$  son los promedios de cada imagen, se toma a  $C_1 = (K_1L)^2$ , siendo L el rango dinámico de valores del pixel y  $K_1 \ll 1$  ( $K=0.01$ ).

$$C(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}. \quad (3.5)$$

Donde  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las varianzas de cada imagen,  $C_2 = (K_2L)^2$  cumpliendo las mismas condiciones de  $C_1$ .

$$S(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}. \quad (3.6)^\circ$$

Donde  $\sigma_{xy}$  es la covarianza de x e y,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  definidas anteriormente y  $C_3 = (C_2/2)$ .

Finalmente, haciendo uso de las ecuaciones de luminancia, contraste y estructura se define de forma general el índice de similitud estructural entre dos imágenes x e y, de acuerdo a la ecuación 3.7.

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (3.7)$$

### 3.3.4 Diferencia de color normalizado (NCD)

La diferencia de color normalizado NCD es un parámetro que estima el error perceptual entre dos vectores de color, debido a que la percepción humana del color no puede ser descrita mediante el modelo RGB [24], es necesario un espacio de color perceptualmente uniforme

más apropiado para definir medidas precisas de error perceptual, este es el modelo  $L^*u^*v^*$  descrito anteriormente en el capítulo 1.

La Ecuación 3.8 describe el error de color perceptual entre dos vectores de color como la distancia euclidiana entre ellos, esto es:

$$\Delta E_{Luv} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}. \quad (3.8)$$

Donde  $\Delta E_{Luv}$  es el error,  $\Delta L^*$ ,  $\Delta u^*$  y  $\Delta v^*$  son la diferencia en las componentes  $L^*$ ,  $u^*$  y  $v^*$  respectivamente entre los dos vectores de color bajo consideración.

Una vez determinada  $\Delta E_{Luv}$  se estima entonces la diferencia de color normalizada por medio de la Ecuación 3.9:

$$NCD = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |\Delta E_{Luv}|}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |\Delta E^*_{Luv}|}, \quad (3.9)$$

Con:

$$E^*_{Luv} = [(L^*)^2 + (u^*)^2 + (v^*)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.10)$$

Donde  $E^*_{Luv}$  es la norma o magnitud del vector del pixel de la imagen original no corrompida en el espacio  $L^* u^* v^*$ ,  $M$  y  $N$  son las dimensiones de la imagen.

### 3.4 Resultados

Como se señaló anteriormente, se realizó una selección variada de imágenes que cubrieran distintos escenarios en el que la técnica de súper resolución de imágenes fuese determinante en la ayuda del mejoramiento de las mismas con el fin de percibir de mejor manera los detalles que la integran.

Ahora se mostrarán los resultados obtenidos al aplicar los criterios objetivos de evaluación en cada caso, donde entre menor sea el MAE y mayor sea el PSNR la calidad de la imagen resultante es mejor, por su parte el SSIM se espera lo más cercano a la unidad (1) ya que es la condición ideal de igualdad deseada entre dos imágenes, pero además se hará también una valoración subjetiva, mostrando de manera visual un recuadro de la imagen, para de esta forma observar las diferencias que presenta cada método.

### 3.4.1 Resultados obtenidos en imágenes estándar

Primeramente para las imágenes estándar en escala de grises en formato BMP, se tienen las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 que muestran MAE, PSNR y SSIM respectivamente, en ellas se ha marcado el recuadro de aquel algoritmo que mejores valores presenta, en consecuencia es el que mejor desempeño obtuvo.

MAE						
Método/Imagen	Baboon	Goldhill	Barbara	JetPlane	Lena	Peppers
Réplica de Pixel.	6.093	2.621	4.046	2.155	1.966	2.174
Vecino Ponderado 3x3	4.723	2.504	4.075	1.734	2.481	2.111
Vecino Ponderado 5x5	4.275	2.986	4.397	2.105	3.465	3.123
Vecino Ponderado 7x7	3.897	3.252	4.928	2.151	4.183	4.031
Interp. Vecino 3x3	10.809	5.744	7.304	5.899	5.378	5.564
Interp. Vecino 5x5	12.572	7.869	9.844	8.987	8.124	9.043
Interp. Vecino 7x7	13.499	9.171	11.736	11.035	10.214	11.904
Interp. Lineal 3x3	10.809	5.744	7.304	5.989	5.378	5.564
Interp. Lineal 5x5	12.572	7.869	9.844	8.987	8.124	9.043
Interp. Lineal 7x7	13.499	9.171	11.736	11.035	10.214	11.904
Interp. Bilineal 3x3	9.829	4.915	6.180	4.817	3.999	4.432
Interp. Bilineal 5x5	11.128	6.602	8.069	7.396	5.853	7.005
Interp. Bilineal 7x7	11.734	7.566	9.371	9.153	7.283	9.168
Interp. Bicúbica I	6.979	3.177	4.748	2.548	2.462	2.643
Interp. Bicúbica II	6.441	2.724	4.387	2.307	2.160	2.380
Interp. Bicúbica III	6.390	2.724	4.399	2.329	2.180	2.394

Tabla 3. 1 Resultados correspondientes al error absoluto medio en imágenes estándar en escala de grises.

<b>PSNR (dB)</b>						
Método/Imagen	Baboon	Goldhill	Barbara	JetPlane	Lena	Peppers
Replica de Pixel.	30.874	34.783	32.880	36.212	36.600	36.466
Vecino Ponderado 3x3	32.104	35.092	32.079	37.548	35.322	36.594
Vecino Ponderado 5x5	32.583	34.690	32.862	37.250	34.329	35.409
Vecino Ponderado 7x7	33.003	34.637	32.623	37.414	34.014	34.703
Interp. Vecino 3x3	29.336	31.382	30.948	32.372	32.139	32.357
Interp. Vecino 5x5	28.932	30.454	30.163	31.209	30.796	30.711
Interp. Vecino 7x7	28.769	30.090	29.737	30.624	30.118	29.841
Interp. Lineal 3x3	29.336	31.382	30.948	32.372	32.139	32.357
Interp. Lineal 5x5	28.932	30.454	30.163	31.209	30.796	30.711
Interp. Lineal 7x7	28.769	30.090	29.737	30.624	30.118	29.841
Interp. Bilineal 3x3	29.605	31.833	31.322	32.846	33.248	33.179
Interp. Bilineal 5x5	29.214	30.812	30.491	31.471	31.790	31.512
Interp. Bilineal 7x7	29.032	30.421	30.006	30.783	31.008	30.610
Interp. Bicúbica I	30.460	33.685	32.243	35.087	35.293	35.199
Interp. Bicúbica II	30.675	34.469	32.554	35.675	36.018	35.935
Interp. Bicúbica III	30.687	34.479	32.533	35.539	35.924	35.877

Tabla 3. 2 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes estándar en escala de grises.

<b>SSIM</b>						
Método/Imagen	Baboon	Goldhill	Barbara	JetPlane	Lena	Peppers
Replica de Pixel.	0.692	0.768	0.691	0.785	0.764	0.723
Vecino Ponderado 3x3	0.205	0.339	0.329	0.346	0.398	0.420
Vecino Ponderado 5x5	0.038	0.117	0.180	0.122	0.197	0.239
Vecino Ponderado 7x7	0.0022	0.055	0.105	0.066	0.126	0.154
Interp. Vecino 3x3	0.138	0.271	0.316	0.299	0.326	0.380
Interp. Vecino 5x5	0.015	0.059	0.140	0.077	0.150	0.193
Interp. Vecino 7x7	0.0031	0.019	0.090	0.027	0.101	0.111
Interp. Lineal 3x3	0.138	0.271	0.316	0.299	0.326	0.380
Interp. Lineal 5x5	0.015	0.059	0.140	0.077	0.150	0.193
Interp. Lineal 7x7	0.0031	0.019	0.090	0.027	0.101	0.111
Interp. Bilineal 3x3	0.215	0.353	0.408	0.398	0.456	0.463
Interp. Bilineal 5x5	0.058	0.121	0.230	0.143	0.274	0.290
Interp. Bilineal 7x7	0.039	0.079	0.171	0.066	0.207	0.200
Interp. Bicúbica I	0.518	0.641	0.555	0.608	0.631	0.623
Interp. Bicúbica II	0.639	0.740	0.648	0.758	0.735	0.699
Interp. Bicúbica III	0.658	0.751	0.655	0.767	0.744	0.705

Tabla 3. 3 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes estándar en escala de grises.

En las tres tablas anteriores se observa que los algoritmos de réplica de pixel y vecino ponderado 3x3, presentan los mejores resultados objetivos al poseer un MAE menor y un PSNR más alto que el resto de algoritmos, en cuanto al SSIM el método de réplica de pixel

tiene los valores más altos de acuerdo a las imágenes que se utilizaron en las simulaciones, en los algoritmos en donde se implementó rejilla de mayor tamaño (5x5 y 7x7) se observó que arrojan un desempeño cada vez más pobre comparado con el de rejilla de 3x3.

Ahora la Figura 3.9 muestra un acercamiento de 1/8 de la imagen Lena, para de forma subjetiva observar los resultados que presenta cada algoritmo de súper resolución y ver como rinden estos en cuanto a la apreciación de los detalles. Donde para todos los ejemplos a) es la imagen original HR, b) es la imagen reducida LR y el resto de incisos corresponderán a cada método de súper resolución aplicado a la imagen LR.

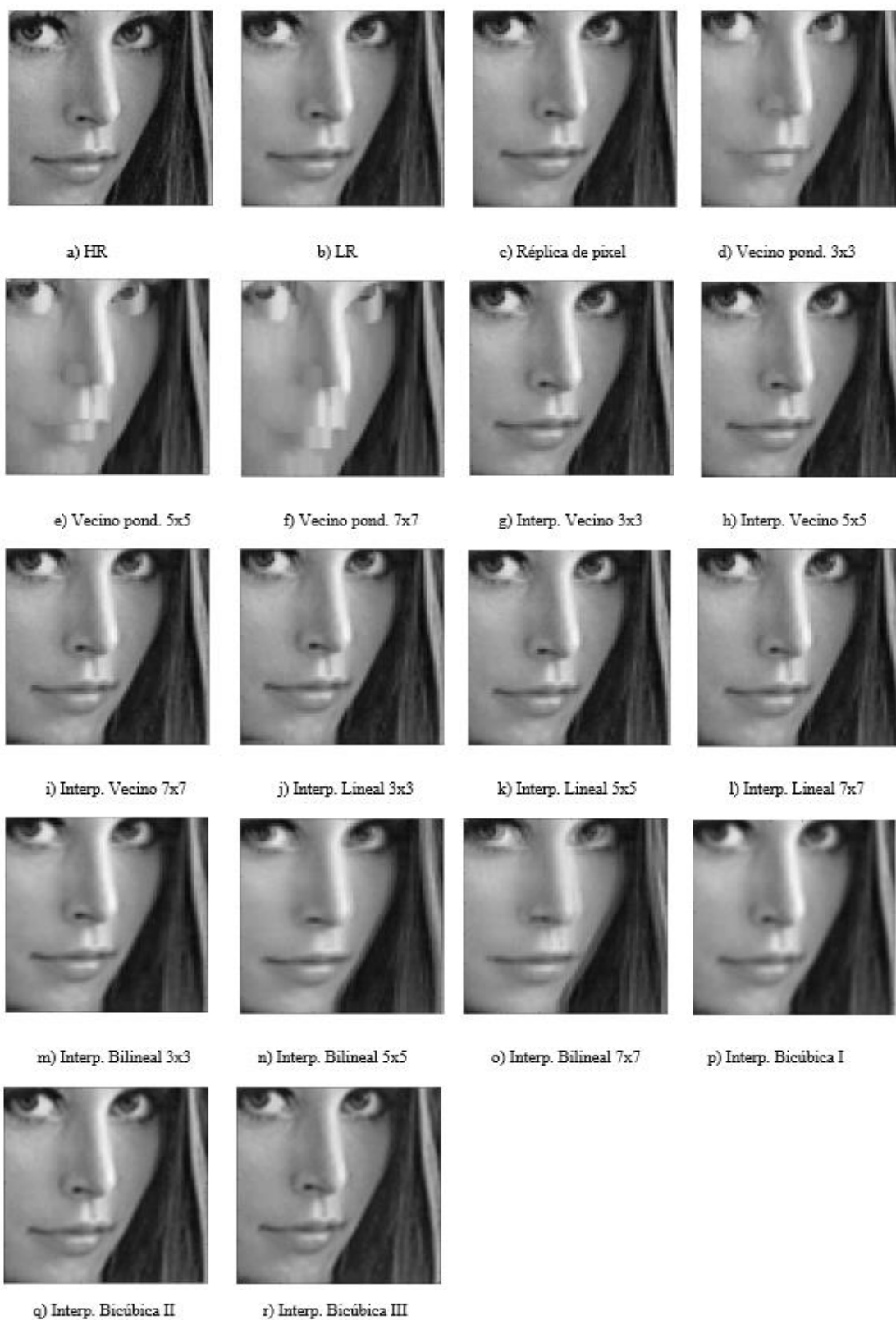


Figura 3. 9 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Lena en escala de grises.

En la Figura 3.9 anterior podemos apreciar que los métodos de; réplica de pixel, interpolación del vecino, interpolación lineal e interpolación bilineal para rejillas de 3x3 presentan una imagen buena salvo con un ligero dentado en bordes, siendo notorio esto en la nariz y mejilla, mientras que en los tres métodos de interpolación bicúbica no se adolece de este inconveniente, sin embargo estos últimos presentan un mayor suavizado, lo que termina pesando al obtener un menor SSIM respecto al método de réplica y que se corresponde con los resultados de la Tabla 3.3.

Por otro lado en el método de vecino ponderado se observa el defecto de ensanchamiento de colores claros, como se aprecia en el ojo al atenuarse la pupila, al aumentar el tamaño de la rejilla de convolución el resultado es aún más notorio.

En el caso del método Bilineal al aumentar la rejilla a 5x5 y 7x7 la imagen de SR que se obtiene presenta desenfoque.

Finalmente en el caso de los tres métodos de interpolación Bicúbica se pueden apreciar las diferencias en cuanto al suavizado de la imagen resultante, siendo menor el de la imagen correspondiente al polinomio 3, esto mismo se puede corroborar con la tabla 3.3 pues en ella se tiene que el mejor SSIM entre estos tres métodos, le corresponde a este último polinomio.

La Figura 3.10 ahora presenta la comparación de los mismos métodos en un acercamiento de 1/8 para la imagen Goldhill, en ella de igual forma el efecto de dentado en bordes está presente en los algoritmos, para el caso del método de vecino ponderado el ensanchamiento de colores claros también afecta a la imagen como se observa en las ventanas, de igual forma el desenfoque y suavizado están presente en los métodos de interpolación Bilineal y Bicúbica respectivamente.

Para el resto de las imágenes en escala de grises, los resultados subjetivos se muestran en el Apéndice de esta tesis.

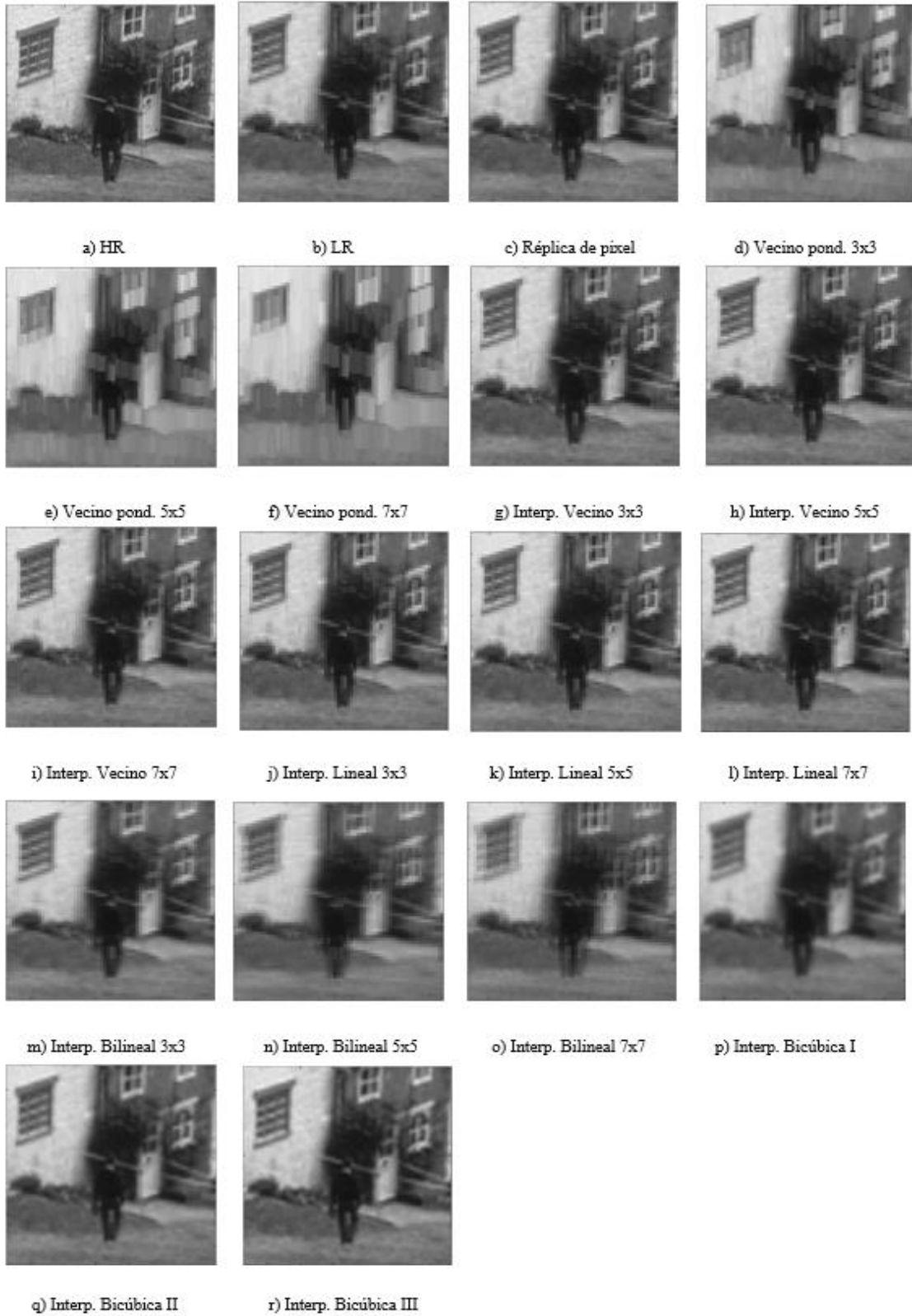


Figura 3. 10 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Goldhill en escala de grises.

Por su parte para las imágenes a color las Tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 muestran los resultados objetivos de MAE, PSNR, SSIM y NCD respectivamente para revisar el desempeño de los métodos en imágenes en RGB.

<b>MAE</b>						
Método/Imagen	Baboon	Sailtboat	House	JetPlane	Lena	Peppers
Replica de Pixel.	6.555	3.626	3.070	2.099	2.171	2.539
Vecino Ponderado 3x3	5.148	3.272	2.945	1.627	2.473	2.270
Vecino Ponderado 5x5	4.790	3.736	3.432	1.884	3.228	3.000
Vecino Ponderado 7x7	4.549	3.942	3.592	1.897	3.775	3.654
Interp. Vecino 3x3	11.378	7.592	7.382	5.285	5.259	5.553
Interp. Vecino 5x5	13.314	10.306	10.085	7.649	7.627	8.497
Interp. Vecino 7x7	14.459	12.087	11.805	9.150	9.378	10.869
Interp. Lineal 3x3	11.378	7.592	7.382	5.285	5.259	5.553
Interp. Lineal 5x5	13.314	10.306	10.085	7.649	7.627	8.497
Interp. Lineal 7x7	14.459	12.087	11.805	9.150	9.378	10.869
Interp. Bilineal 3x3	10.216	6.473	6.093	4.274	3.935	4.447
Interp. Bilineal 5x5	11.688	8.925	8.554	6.320	5.567	6.668
Interp. Bilineal 7x7	12.487	10.598	10.158	7.702	6.808	8.511
Interp. Bicúbica I	7.582	4.213	3.721	2.545	2.602	2.927
Interp. Bicúbica II	6.923	3.809	3.242	2.204	2.357	2.716
Interp. Bicúbica III	6.868	3.810	3.240	2.216	2.363	2.709

Tabla 3. 4 Resultados correspondientes al error absoluto medio en imágenes estándar a color.

<b>PSNR(dB)</b>						
Método/Imagen	Baboon	Sailtboat	House	JetPlane	Lena	Peppers
Replica de Pixel.	33.002	34.888	36.032	38.496	37.393	36.406
Vecino Ponderado 3x3	34.312	36.233	37.376	40.223	37.421	37.480
Vecino Ponderado 5x5	34.717	36.433	37.549	40.345	37.156	37.107
Vecino Ponderado 7x7	35.000	36.590	37.886	40.694	37.125	36.845
Interp. Vecino 3x3	32.064	33.603	33.955	35.451	34.456	33.940
Interp. Vecino 5x5	31.784	33.168	33.465	34.553	33.608	32.970
Interp. Vecino 7x7	31.646	32.903	33.215	34.082	33.142	32.456
Interp. Lineal 3x3	32.064	33.603	33.955	35.451	34.456	33.940
Interp. Lineal 5x5	31.784	33.168	33.465	34.553	33.608	32.970
Interp. Lineal 7x7	31.646	32.903	33.215	34.082	33.142	32.456
Interp. Bilineal 3x3	32.315	33.934	34.280	35.951	35.370	34.633
Interp. Bilineal 5x5	32.035	33.488	33.709	34.875	34.435	33.637
Interp. Bilineal 7x7	31.875	33.210	33.443	34.318	33.919	33.098
Interp. Bicúbica I	32.770	34.565	35.214	37.408	36.632	35.736
Interp. Bicúbica II	32.901	34.746	35.760	37.953	36.939	36.092
Interp. Bicúbica III	32.881	34.682	35.744	37.841	36.871	36.062

Tabla 3. 5 Resultados correspondientes al pico señal a ruido en imágenes estándar a color.

SSIM						
Método/Imagen	Baboon	Sailtboat	House	JetPlane	Lena	Peppers
Replica de Pixel.	0.676	0.655	0.732	0.744	0.708	0.652
Vecino Ponderado 3x3	0.213	0.285	0.277	0.310	0.343	0.354
Vecino Ponderado 5x5	0.053	0.093	0.088	0.114	0.167	0.188
Vecino Ponderado 7x7	0.014	0.039	0.054	0.068	0.103	0.119
Interp. Vecino 3x3	0.148	0.254	0.224	0.268	0.276	0.316
Interp. Vecino 5x5	0.026	0.074	0.061	0.071	0.121	0.147
Interp. Vecino 7x7	0.008	0.024	0.037	0.032	0.079	0.084
Interp. Lineal 3x3	0.148	0.254	0.224	0.268	0.276	0.316
Interp. Lineal 5x5	0.026	0.074	0.061	0.071	0.121	0.147
Interp. Lineal 7x7	0.0089	0.024	0.037	0.032	0.079	0.084
Interp. Bilineal 3x3	0.221	0.335	0.325	0.363	0.396	0.392
Interp. Bilineal 5x5	0.069	0.141	0.124	0.129	0.230	0.230
Interp. Bilineal 7x7	0.048	0.072	0.083	0.065	0.173	0.160
Interp. Bicúbica I	0.513	0.561	0.622	0.640	0.605	0.569
Interp. Bicúbica II	0.623	0.630	0.702	0.718	0.673	0.624
Interp. Bicúbica III	0.641	0.640	0.710	0.727	0.683	0.631

Tabla 3. 6 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes estándar a color.

NCD						
Método/Imagen	Baboon	Sailtboat	House	JetPlane	Lena	Peppers
Replica de Pixel.	0.098	0.054	0.045	0.033	0.028	0.034
Vecino Ponderado 3x3	0.173	0.119	0.111	0.084	0.069	0.075
Vecino Ponderado 5x5	0.227	0.178	0.160	0.128	0.109	0.119
Vecino Ponderado 7x7	0.246	0.223	0.195	0.159	0.142	0.159
Interp. Vecino 3x3	0.171	0.116	0.110	0.087	0.072	0.078
Interp. Vecino 5x5	0.198	0.164	0.150	0.130	0.107	0.122
Interp. Vecino 7x7	0.213	0.197	0.176	0.158	0.135	0.159
Interp. Lineal 3x3	0.171	0.116	0.110	0.087	0.072	0.078
Interp. Lineal 5x5	0.198	0.164	0.150	0.130	0.107	0.122
Interp. Lineal 7x7	0.213	0.197	0.176	0.158	0.135	0.159
Interp. Bilineal 3x3	0.155	0.100	0.092	0.073	0.055	0.064
Interp. Bilineal 5x5	0.174	0.140	0.126	0.109	0.079	0.098
Interp. Bilineal 7x7	0.184	0.168	0.149	0.134	0.098	0.126
Interp. Bicúbica I	0.113	0.063	0.055	0.041	0.034	0.040
Interp. Bicúbica II	0.104	0.056	0.049	0.035	0.031	0.036
Interp. Bicúbica III	0.103	0.057	0.049	0.036	0.031	0.037

Tabla 3. 7 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes estándar a color.

En la serie de tablas anteriores podemos observar que nuevamente los métodos réplica y vecino ponderado presentan el mejor desempeño al poseer el menor MAE que el resto y el mayor PSNR, sin embargo el método de réplica de pixel, posee la ventaja en cuanto al SSIM y NCD, siendo en todos los casos menor la diferencia de color con respecto al método de

Ampliación con promedio. Esto comienza a tener sentido si consideramos que dado que este método copia el pixel simplemente conservando con ello sus características de coloración, mientras que el resto de métodos manipulan los valores de color e intensidad dando como resultado un índice de similitud menor y una diferencia de color mayor.

Ahora analizando de forma subjetiva se muestra la imagen Sailboat en la Figura 3.11. En ella se ha realizado un acercamiento de  $1/8$  sobre la imagen para mostrar detalles más precisos y observar las diferencias entre los distintos métodos de súper resolución nuevamente.

Entonces podemos apreciar que nuevamente en los algoritmos de rejilla de  $3 \times 3$  de interpolación del vecino, lineal y bilineal las imágenes resultantes presentan visualmente una buena calidad, salvo por el defecto de dentado que se alcanza a notar en los bordes de la vela del bote, nuevamente el método de vecino ponderado presenta serios problemas, pues en las imágenes correspondientes a este método la persona que va sobre el bote de color rojo y el bote de color café, se atenúan conforme se aumenta la rejilla llegando hasta perderse para la rejilla de  $7 \times 7$ , en cuanto a la vela del bote se aprecia que esta aumenta de tamaño ensanchándose más de lo normal.

Referente a los métodos de interpolación bilineal, nuevamente se observa que el efecto de desenfoque está presente al aumentar el tamaño de la rejilla.

En cuanto a los métodos de interpolación Bicúbica el nivel de suavizado es fácilmente identificable entre los tres polinomios de cada método, siendo de esta manera más clara la diferencia que supone el implementar el tercer polinomio interpolador, al no generar una imagen con un suavizado muy alto.

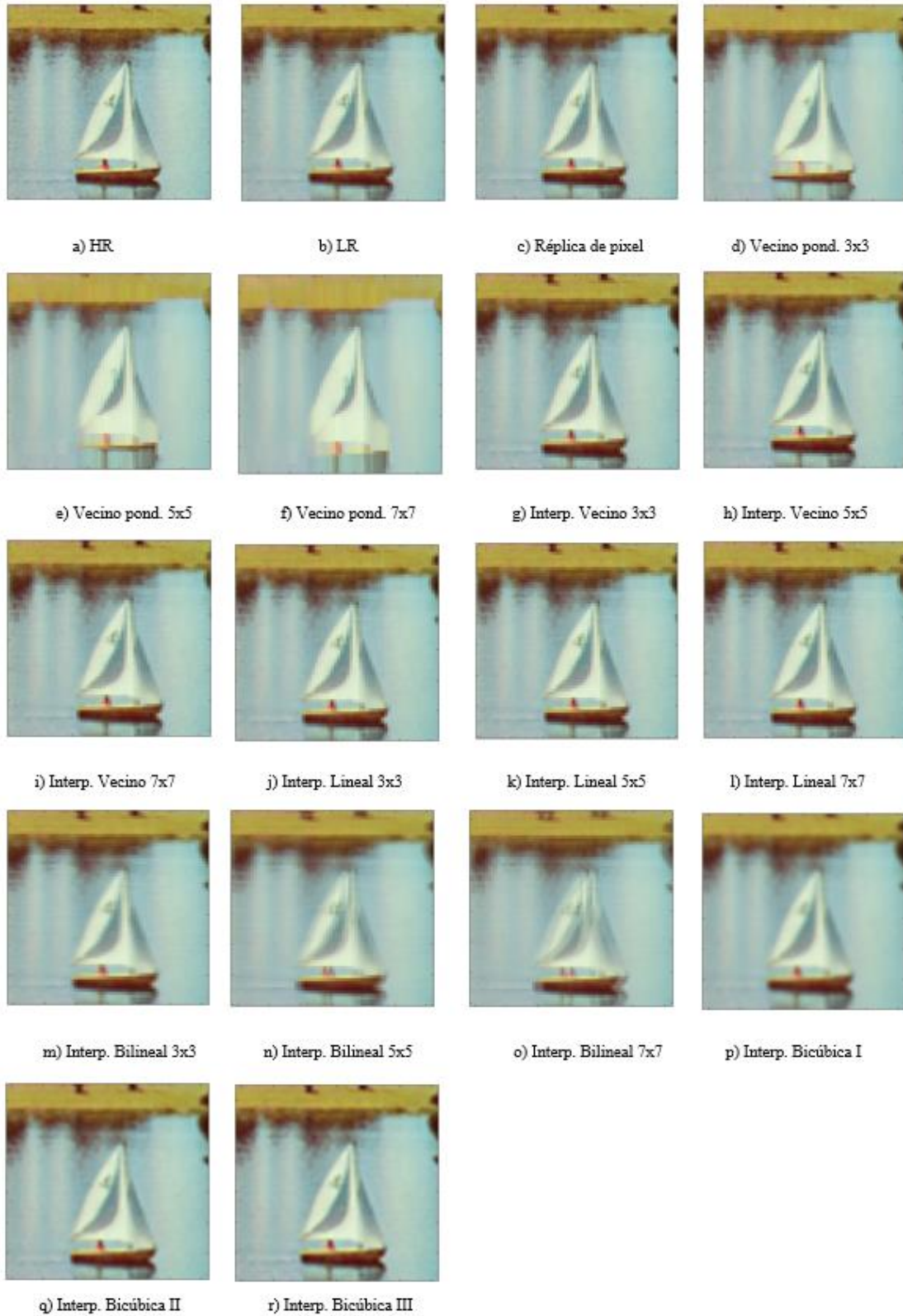


Figura 3. 11 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Sailboat a color.

Otro caso que mostraremos para comparar los métodos subjetivamente es el de la Figura 3.12, correspondiente a la imagen JetPlane.

De nueva cuenta se observa que los métodos de réplica e interpoladores en rejillas de 3x3, muestran una imagen resultante con un resultado uniforme y aceptable.

Además en esta imagen en particular se puede apreciar de mejor manera que para el método de interpolación lineal, conforme se aumenta el tamaño de la rejilla hay presencia de un ligero suavizado, este es uno de los inconvenientes que se comentaron en el capítulo anterior y que puede ser contrastado con los criterios objetivos de evaluación de las tablas 3.4 a 3.7, en ellas se observa que a medida que se aumenta la rejilla, el método va teniendo un desempeño cada vez más pobre.

Por su parte el efecto de ensanchamiento en el método del vecino ponderado produce que las letras del jet sean indescifrables, así mismo la cabina del piloto y la montaña del fondo se empequeñecen en sus áreas de color oscuro.

Nuevamente el efecto de desenfoco presente en el método de interpolación bilineal, sugiere que la implementación de rejillas de mayor tamaño, no es una buena idea, ya que la calidad de la imagen decae considerablemente, esto se puede reforzar comparando los datos de las tablas 3.4 a 3.7, en las que podemos apreciar que las medidas obtenidas al aplicar los criterios objetivos de evaluación son peores conforme se aumenta el tamaño de la rejilla de convolución.

Finalmente para los métodos interpoladores con ecuaciones bicúbica, el efecto de suavizado es una constante nuevamente, sin embargo, se pueden ver de mejor manera los detalles de la imagen en estos métodos debido a la supresión del dentado en los bordes, por ejemplo la cabina del piloto y el piloto se pueden identificar más fácilmente que en el resto de métodos.

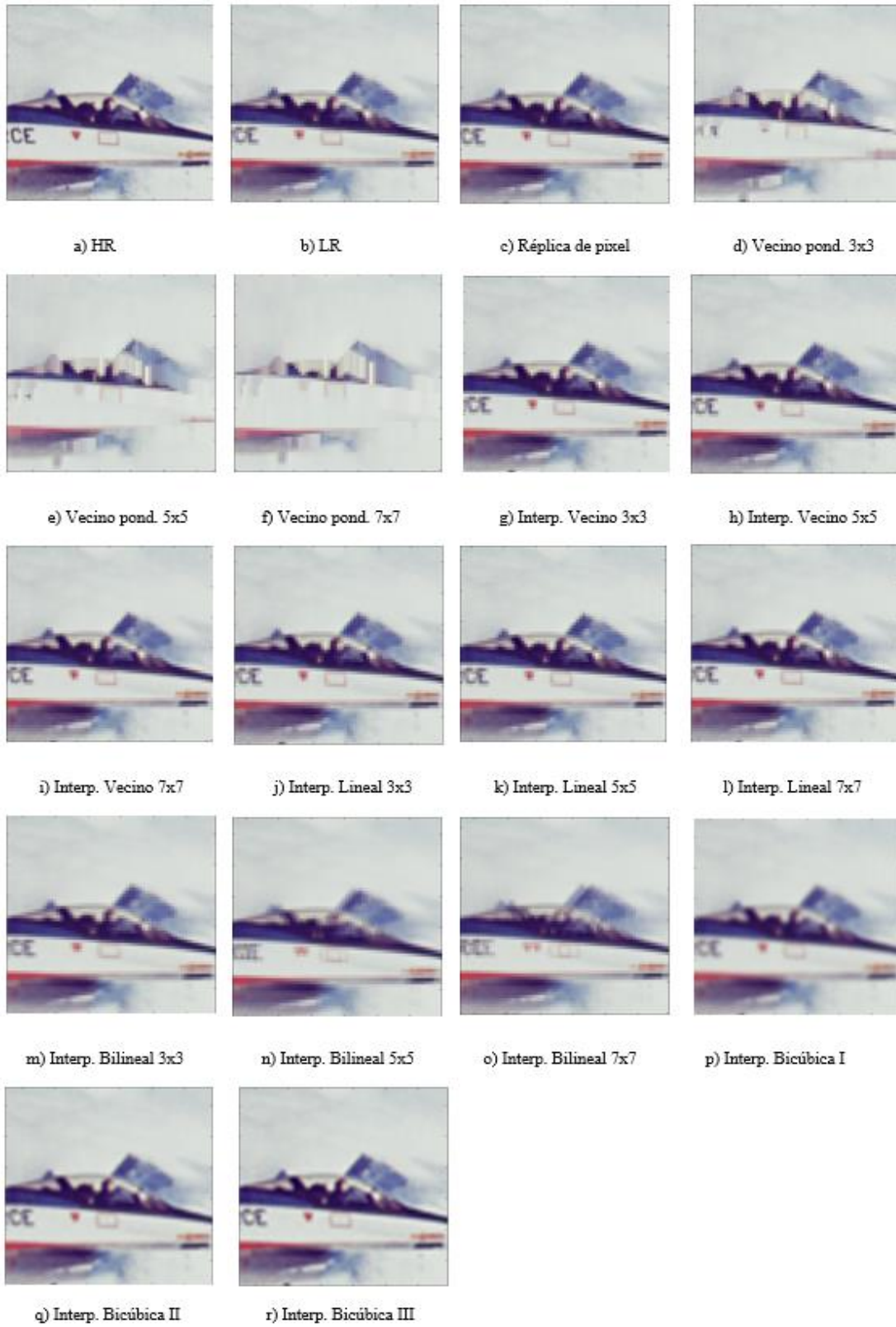


Figura 3. 12 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen JetPlane a color.

Con esto se observa que los algoritmos ofrecen un desempeño aceptable, sobre todo si se toma en cuenta que los datos para las imágenes de SR se obtienen de la imagen LR, donde hay una pérdida del 50% de información al reducir la resolución, lo que implica que se tiene en algunos casos una mejoría de imagen pero sin llegar a igualar la imagen original (HR).

Los métodos de interpolación Bicúbica poseen un SSIM ligeramente menor con respecto a los métodos de réplica de pixel, sin embargo esto se debe al suavizado de imagen que presenta este método, lo que termina repercutiendo en un índice de similitud estructural menor con respecto a los otros métodos, a su favor, este método corrige los defectos de dentado presentes de la imagen LR, permitiendo con ello una mejor identificación de los detalles de la misma.

El resto de imágenes estándar a color analizadas de forma subjetiva se presentan en el Apéndice de esta tesis.

### 3.4.2 Resultados obtenidos en imágenes satelitales

Ahora para el conjunto de imágenes satelitales como se mencionó anteriormente, se realizó una selección que presentara distintos escenarios de su entorno, las imágenes en escala de grises son en formato BMP ahora con 24 bits de profundidad, mientras que las imágenes en RGB son en formato TIFF con 24 bits de profundidad, nuevamente valoraremos el rendimiento de los algoritmos en este tipo de imágenes.

Cabe señalar que las imágenes en escala de grises al ser de 24 bits de profundidad, implica que están contenidas en tres planos de acuerdo al modelo RGB, sin embargo los algoritmos desarrollados para imágenes en escala de grises en esta tesis son para un solo plano (imágenes de 8 bits), por lo que para evitar este inconveniente, se utilizó la instrucción “rgb2gray” dentro del simulador.

Al igual que en las imágenes estándar, para el conjunto de imágenes satelitales en escala de grises se han obtenido las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10 que nos muestran los criterios objetivos de MAE, PSNR y SSIM respectivamente. De igual forma se ha señalado el mejor resultado en cada caso.

MAE						
Método/Imagen	Satelite01	Satelite02	Satelite03	Satelite04	Satelite05	Satelite06
Replica de Pixel.	0.908	1.235	1.022	5.153	4.675	5.329
Vecino Ponderado 3x3	2.162	2.952	2.136	3.539	3.839	5.351
Vecino Ponderado 5x5	2.031	3.544	2.467	3.192	3.904	5.564
Vecino Ponderado 7x7	1.980	3.578	2.459	2.809	3.704	5.561
Interp. Vecino 3x3	4.611	8.923	7.699	10.743	8.198	9.152
Interp. Vecino 5x5	5.516	13.012	11.353	13.86	10.693	11.047
Interp. Vecino 7x7	6.095	15.677	12.793	15.442	12.033	12.246
Interp. Lineal 3x3	4.611	8.923	7.699	10.743	8.198	9.152
Interp. Lineal 5x5	5.516	13.012	11.353	0.026	10.693	11.047
Interp. Lineal 7x7	6.095	15.677	12.793	15.442	12.033	12.246
Interp. Bilineal 3x3	3.893	7.992	6.772	9.572	7.169	7.832
Interp. Bilineal 5x5	4.641	11.942	9.768	12.402	0.069	9.240
Interp. Bilineal 7x7	5.099	14.567	11.161	13.801	10.408	10.135
Interp. Bicúbica I	2.988	4.616	3.855	5.719	0.495	6.261
Interp. Bicúbica II	2.209	3.691	2.981	5.436	4.945	5.684
Interp. Bicúbica III	2.272	3.812	3.086	5.427	4.968	5.683

Tabla 3. 8 Resultados correspondientes al error absoluto medio en imágenes satelitales en escala de grises.

PSNR						
Método/Imagen	Satelite01	Satelite02	Satelite03	Satelite04	Satelite05	Satelite06
Replica de Pixel.	43.355	40.729	42.299	31.450	32.085	31.653
Vecino Ponderado 3x3	34.404	33.687	34.831	33.419	33.298	32.446
Vecino Ponderado 5x5	35.257	33.881	34.710	33.973	33.460	32.762
Vecino Ponderado 7x7	35.643	34.033	35.108	34.518	33.602	33.020
Interp. Vecino 3x3	30.926	29.479	29.739	29.487	30.196	30.382
Interp. Vecino 5x5	30.469	28.861	29.047	28.934	29.244	29.875
Interp. Vecino 7x7	30.187	28.573	28.899	28.672	28.856	29.537
Interp. Lineal 3x3	30.926	29.479	29.739	29.487	30.196	30.382
Interp. Lineal 5x5	30.469	28.861	29.047	28.934	29.244	29.875
Interp. Lineal 7x7	30.187	28.573	28.899	28.672	28.856	29.537
Interp. Bilineal 3x3	32.128	29.937	30.334	29.637	30.542	30.724
Interp. Bilineal 5x5	31.491	29.143	29.484	28.899	29.530	30.312
Interp. Bilineal 7x7	31.105	28.787	29.237	28.596	29.071	30.020
Interp. Bicúbica I	34.052	31.726	32.619	30.952	31.681	31.223
Interp. Bicúbica II	35.490	32.856	33.865	31.200	31.865	31.484
Interp. Bicúbica III	35.359	32.745	33.740	31.225	31.798	31.411

Tabla 3. 9 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes satelitales en escala de grises.

SSIM						
Método/Imagen	Satelite01	Satelite02	Satelite03	Satelite04	Satelite05	Satelite06
Replica de Pixel.	0.958	0.980	0.975	0.696	0.627	0.542
Vecino Ponderado 3x3	0.093	0.424	0.370	0.237	0.239	0.128
Vecino Ponderado 5x5	0.034	0.172	0.098	0.047	0.054	0.015
Vecino Ponderado 7x7	0.029	0.087	0.014	0.006	0.009	-0.010
Interp. Vecino 3x3	0.128	0.382	0.236	0.181	0.192	0.099
Interp. Vecino 5x5	0.063	0.150	-0.072	0.026	0.021	0.005
Interp. Vecino 7x7	0.051	0.77	-0.064	-0.011	-0.015	-0.012
Interp. Lineal 3x3	0.128	0.382	0.236	0.181	0.192	0.099
Interp. Lineal 5x5	0.063	0.150	-0.072	0.026	0.021	0.005
Interp. Lineal 7x7	0.051	0.077	-0.064	-0.011	-0.015	-0.012
Interp. Bilineal 3x3	0.243	0.469	0.333	0.261	0.274	0.193
Interp. Bilineal 5x5	0.107	0.170	0.002	0.038	0.069	0.079
Interp. Bilineal 7x7	0.076	0.058	-0.058	-0.010	-0.004	0.054
Interp. Bicúbica I	0.530	0.743	0.696	0.566	0.495	0.383
Interp. Bicúbica II	0.721	0.931	0.803	0.662	0.584	0.486
Interp. Bicúbica III	0.729	0.831	0.805	0.677	0.599	0.502

Tabla 3. 10 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes satelitales en escala de grises.

De acuerdo a la primer Tabla 3.8, podemos observar que el algoritmo que mostró el mejor desempeño al poseer el menor MAE en la mayoría de las imágenes evaluados nuevamente fue el de réplica de pixel, en cuanto al PSNR replica y vecino ponderado son los de mayores parámetros nuevamente como lo señala la Tabla 3.9. Finalmente el SSIM de la Tabla 3.10 presenta al algoritmo de réplica como el mejor al poseer valores cercanos a la unidad en el caso de las tres primares imágenes de muestra.

Ahora de forma subjetiva la Figura 3.13 nos muestra un acercamiento a la imagen “Satelite01” para valorar el desempeño de los métodos en los detalles más precisos.

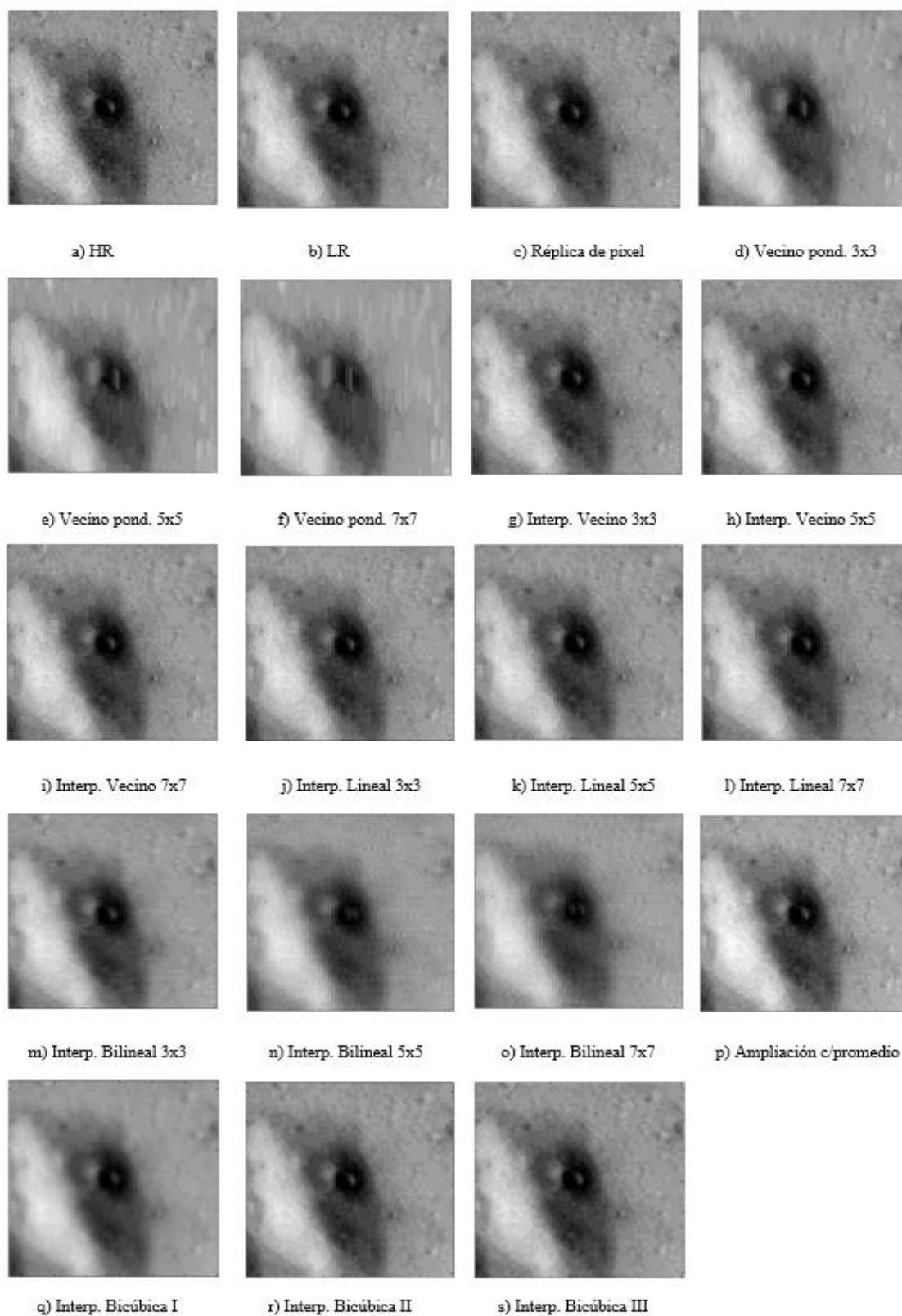


Figura 3. 13 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite01 en escala de grises.

Como se puede observar en la Figura anterior, el nivel de detalle de la imagen original no es muy elevado, esto provoca que el resultado subjetivamente sea en la mayoría de los casos bueno, con las diferencias ya vistas para las imágenes estándar, en donde nuevamente el método de vecino ponderado reduce los colores oscuros derivando en ello que los pequeños cráteres de esta imagen no se vean adecuadamente.

O el método de interpolación bilineal, que conforme se aumenta el tamaño de la rejilla el efecto de desenfoque aumenta. Y que el método de interpolación bicúbica I que posee su nivel de suavizado característico. Los tres métodos de interpolación bicúbica, debido al suavizado que poseen, reducen la calidad ligeramente en los detalles de la imagen, como por ejemplo los cráteres, los cuales en el primer polinomio son menos distinguibles.

Para la Figura 3.14 se ha seleccionado la imagen “Satelite05” con un acercamiento, que nos permitirá ver las diferencias de los métodos en caminos y rutas. Como se puede apreciar en ella, pese a que hay una pérdida considerable de detalle al reducir la imagen, los métodos de réplica, interpolación de vecino, lineal y bilineal en rejilla 3x3 obtienen un resultado uniforme cercano a la imagen LR, puesto que ninguno de estos métodos es capaz de mejorar el dentado en bordes.

Por su parte los métodos de interpolación bicúbica pese a si corregir el dentado, el suavizado de imagen provoca que la vegetación se vea ligeramente difuminada con respecto a la imagen original (HR). El resultado es proporcional en el resto de imágenes que se muestran al final de esta tesis.

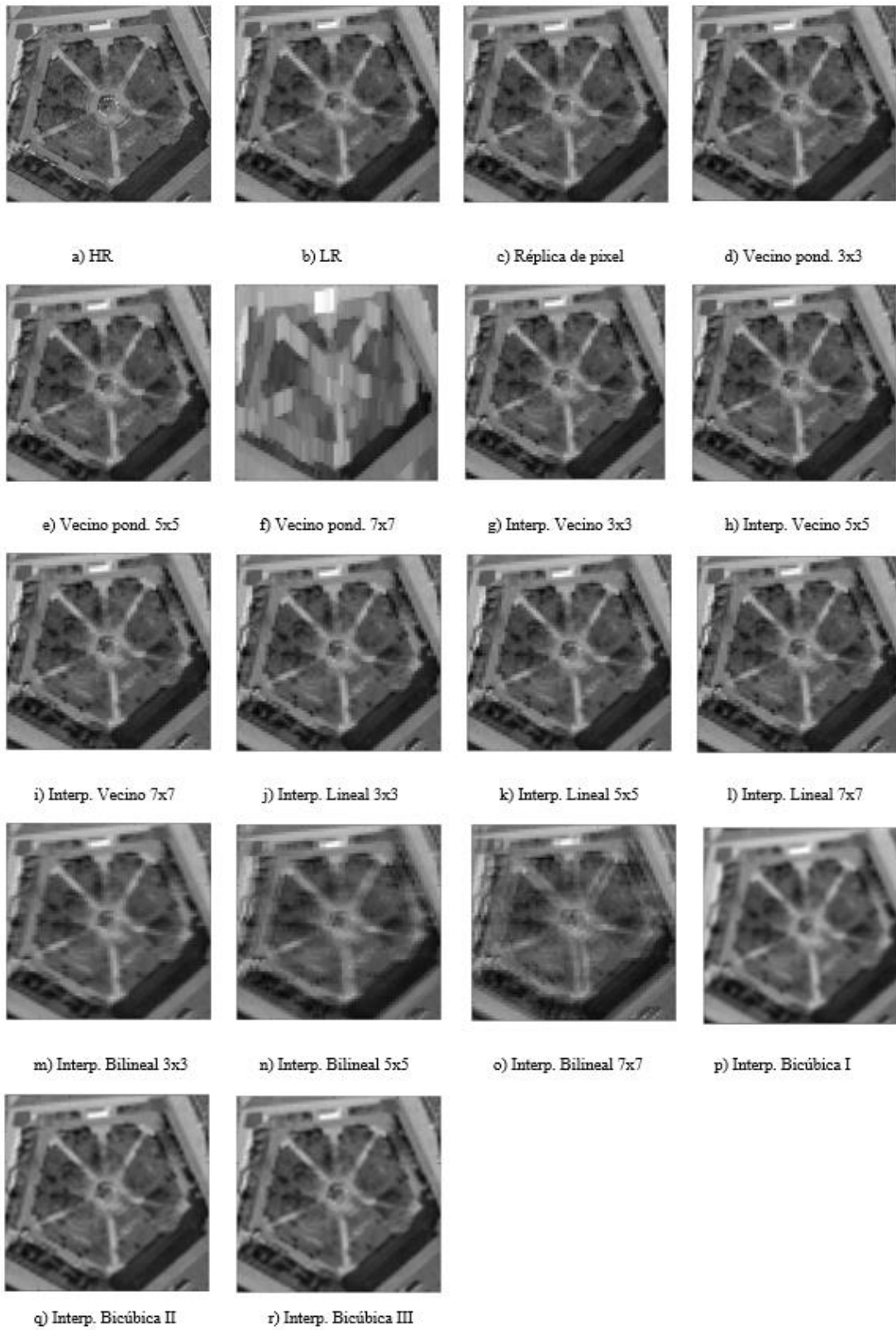


Figura 3. 14 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite05 en escala de grises.

De igual modo, para las imágenes satelitales en RGB, se tienen las Tablas 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 con los criterios objetivos de evaluación, estos son; el MAE, PSNR, SSIM, NCD respectivamente.

MAE						
Método/Imagen	Satelite07	Satelite08	Satelite09	Satelite10	Satelite11	Satelite12
Replica de Pixel.	4.571	6.066	1.988	3.316	4.760	1.863
Vecino Ponderado 3x3	3.489	4.733	1.713	2.669	3.823	1.622
Vecino Ponderado 5x5	3.344	4.133	1.640	2.731	3.608	1.614
Vecino Ponderado 7x7	3.057	3.528	1.499	2.558	3.211	1.539
Interp. Vecino 3x3	8.406	11.498	3.750	7.704	9.921	3.346
Interp. Vecino 5x5	10.581	13.554	4.575	10.581	12.172	4.135
Interp. Vecino 7x7	11.735	14.479	4.913	12.225	13.194	4.614
Interp. Lineal 3x3	8.406	11.498	3.750	7.704	9.921	3.346
Interp. Lineal 5x5	10.581	13.554	4.575	10.581	12.172	4.135
Interp. Lineal 7x7	11.735	14.479	4.913	12.225	13.194	4.614
Interp. Bilineal 3x3	7.675	10.245	3.157	6.577	8.554	2.766
Interp. Bilineal 5x5	9.771	12.143	3.879	9.191	10.551	3.360
Interp. Bilineal 7x7	10.841	12.947	4.185	10.695	11.395	3.702
Interp. Bicúbica I	5.338	7.334	2.343	4.130	5.728	2.138
Interp. Bicúbica II	4.723	6.462	2.119	3.533	5.067	1.961
Interp. Bicúbica III	4.684	6.382	2.099	3.522	5.027	1.946

Tabla 3. 11 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes satelitales a color.

Nuevamente podemos observar en la Tabla 3.11 que el menor error absoluto medio (MAE) lo obtiene el algoritmo de vecino ponderado (7x7), así como la mayor relación pico señal a ruido (PSNR) de acuerdo a la Tabla 3.12, por su parte el algoritmo de réplica de pixel ofrece el mayor índice de similitud estructural SSIM y diferencia de color normalizado NCD conforme a las tablas 3.13 y 3.14.

<b>PSNR(dB)</b>						
Método/Imagen	Satelite07	Satelite08	Satelite09	Satelite10	Satelite11	Satelite12
Replica de Pixel.	34.205	33.621	38.112	35.628	33.708	37.963
Vecino Ponderado 3x3	35.912	35.314	39.292	37.316	35.249	38.761
Vecino Ponderado 5x5	36.509	36.037	39.789	37.915	35.812	39.079
Vecino Ponderado 7x7	37.038	36.635	40.217	38.564	36.417	39.429
Interp. Vecino 3x3	33.052	32.648	36.098	33.601	32.142	35.598
Interp. Vecino 5x5	32.767	32.427	35.508	33.051	31.810	35.086
Interp. Vecino 7x7	32.648	32.333	35.232	32.782	31.686	34.811
Interp. Lineal 3x3	33.052	32.648	36.098	33.601	32.142	35.598
Interp. Lineal 5x5	32.767	32.427	35.508	33.051	31.810	35.086
Interp. Lineal 7x7	32.648	32.333	35.232	32.782	31.686	34.811
Interp. Bilineal 3x3	32.217	32.772	36.646	33.945	32.438	36.259
Interp. Bilineal 5x5	32.870	32.466	36.047	33.297	32.077	35.716
Interp. Bilineal 7x7	32.733	32.360	35.777	33.027	31.961	35.473
Interp. Bicúbica I	33.807	33.077	37.536	34.788	33.261	37.219
Interp. Bicúbica II	34.092	33.447	37.843	35.321	33.525	37.632
Interp. Bicúbica III	34.074	33.491	37.822	35.299	33.490	37.641

Tabla 3. 12 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes satelitales a color.

<b>SSIM</b>						
Método/Imagen	Satelite07	Satelite08	Satelite09	Satelite10	Satelite11	Satelite12
Replica de Pixel.	0.718	0.712	0.544	0.765	0.762	0.528
Vecino Ponderado 3x3	0.268	0.189	0.149	0.286	0.255	0.128
Vecino Ponderado 5x5	0.068	0.024	0.032	0.078	0.042	0.025
Vecino Ponderado 7x7	0.023	0.0008	0.012	0.035	0.004	0.010
Interp. Vecino 3x3	0.255	0.166	0.100	0.287	0.181	0.110
Interp. Vecino 5x5	0.073	0.026	0.005	0.077	0.008	0.022
Interp. Vecino 7x7	0.034	0.009	0.007	0.031	-0.009	0.009
Interp. Lineal 3x3	0.255	0.166	0.100	0.287	0.181	0.110
Interp. Lineal 5x5	0.073	0.026	0.005	0.077	0.008	0.022
Interp. Lineal 7x7	0.034	0.009	0.007	0.031	-0.009	0.009
Interp. Bilineal 3x3	0.302	0.241	0.168	0.367	0.277	0.174
Interp. Bilineal 5x5	0.054	0.036	0.026	0.094	0.026	0.060
Interp. Bilineal 7x7	0.004	0.008	0.014	0.023	-0.013	0.042
Interp. Bicúbica I	0.581	0.542	0.390	0.638	0.613	0.372
Interp. Bicúbica II	0.688	0.665	0.488	0.739	0.722	0.471
Interp. Bicúbica III	0.705	0.685	0.505	0.754	0.738	0.489

Tabla 3. 13 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes satelitales a color.

NCD						
Método/Imagen	Satelite07	Satelite08	Satelite09	Satelite10	Satelite11	Satelite12
Replica de Pixel.	0.084	0.117	0.035	0.062	0.080	0.036
Vecino Ponderado 3x3	0.172	0.231	0.069	0.157	0.177	0.069
Vecino Ponderado 5x5	0.241	0.297	0.092	0.236	0.243	0.093
Vecino Ponderado 7x7	0.290	0.339	0.107	0.294	0.286	0.109
Interp. Vecino 3x3	0.156	0.224	0.066	0.287	0.172	0.067
Interp. Vecino 5x5	0.200	0.267	0.080	0.212	0.212	0.083
Interp. Vecino 7x7	0.225	0.286	0.085	0.248	0.231	0.093
Interp. Lineal 3x3	0.156	0.224	0.066	0.150	0.172	0.067
Interp. Lineal 5x5	0.200	0.267	0.080	0.212	0.212	0.083
Interp. Lineal 7x7	0.225	0.286	0.085	0.248	0.231	0.093
Interp. Bilineal 3x3	0.145	0.201	0.058	0.130	0.150	0.058
Interp. Bilineal 5x5	0.185	0.239	0.070	0.184	0.185	0.070
Interp. Bilineal 7x7	0.207	0.255	0.074	0.217	0.201	0.077
Ampliación c/Promedio	0.133	0.187	0.146	0.147	0.166	0.185
Interp. Bicúbica I	0.099	0.141	0.041	0.078	0.097	0.042
Interp. Bicúbica II	0.087	0.125	0.037	0.067	0.086	0.038
Interp. Bicúbica III	0.087	0.123	0.037	0.067	0.085	0.038

Tabla 3. 14 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes satelitales a color.

Ahora, se seleccionó un área de acercamiento de cada imagen para valorar subjetivamente el rendimiento de los métodos, entonces, de acuerdo a la Figura 3.15, se muestra la imagen “Satelite10” para verificar las diferencias de los métodos en imágenes satelitales a color.

En la Figura podemos apreciar nuevamente que los métodos de réplica de pixel, interpolación del vecino más cercano, interpolación lineal, e interpolación bilineal con rejilla de 3x3 obtienen una imagen resultante con las mismas características observadas en los ejemplos anteriores, como el dentado en bordes.

De igual manera el método del vecino ponderado produce un ensanchamiento en los caminos de la imagen satelital, distorsionando la imagen resultante conforme a la original. A su vez la sección correspondiente a las edificaciones se emborrona siendo aún más difícil la percepción de detalles, en edificaciones.

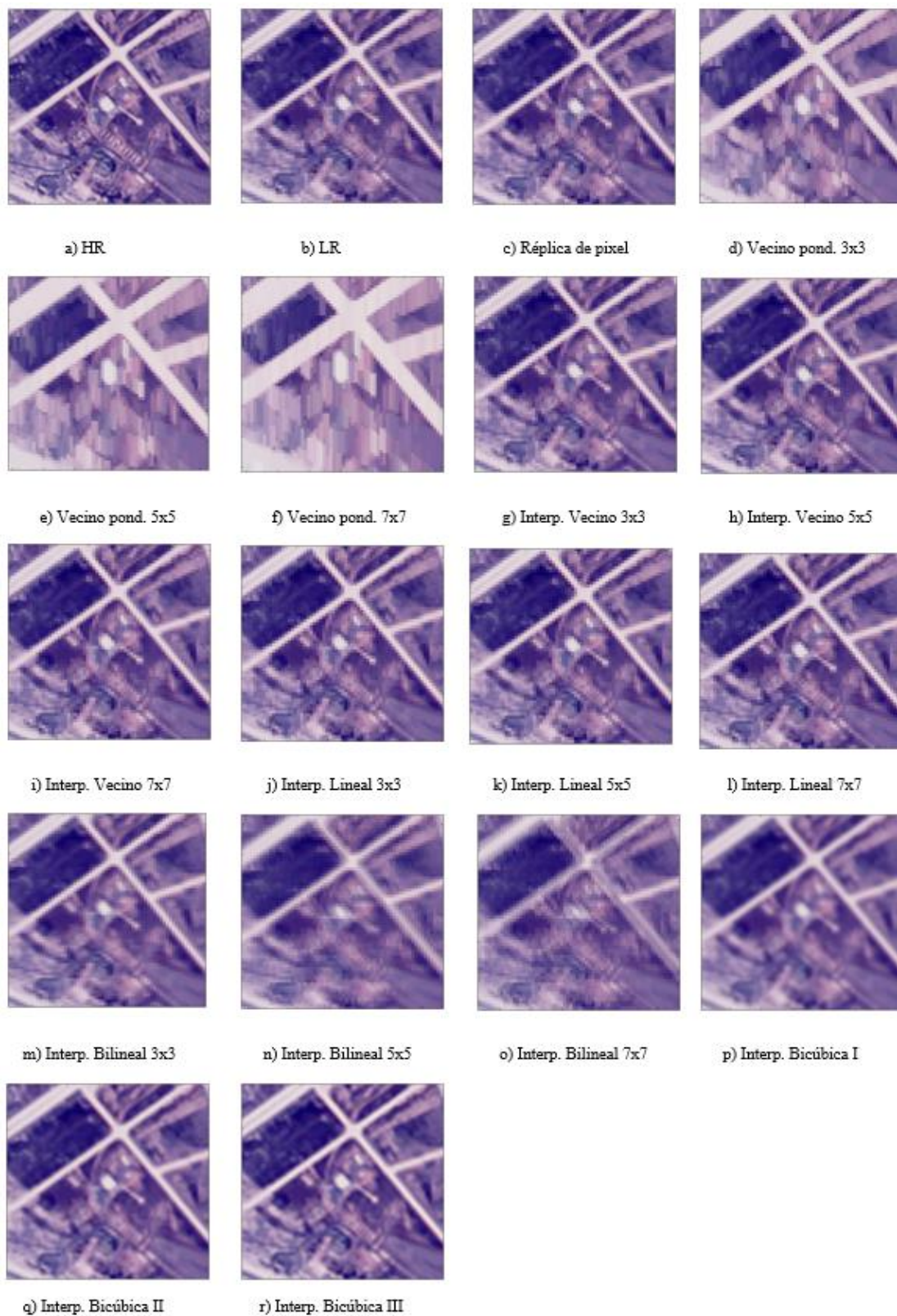


Figura 3. 15 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite10 a color.

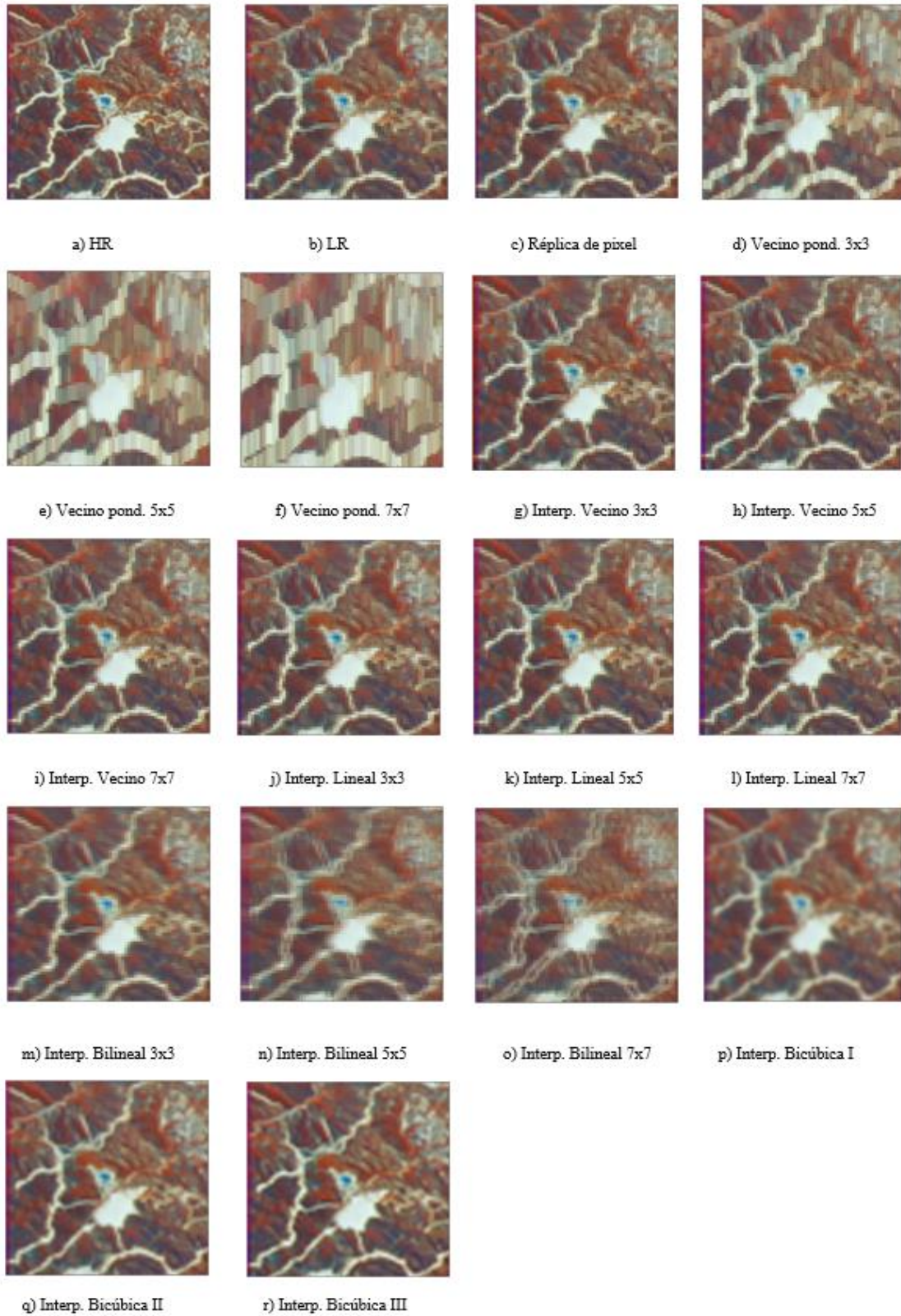


Figura 4. 16 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Satellite11 a color.

Otro ejemplo para el análisis subjetivo es el mostrado en la Figura 3.16 correspondiente a la imagen “Satelite11” en la que nuevamente se ha seleccionado un área de acercamiento para poder valorar de mejor manera, la mejora en los detalles que presenta cada método de súper resolución. Dicha imagen dispone de una montaña con diferentes caminos y rutas, así como un lago.

Observando la Figura 3.16 se puede notar que los métodos de interpolación bicúbica corrigen el defecto de dentado en bordes de los caminos de la imagen, haciéndolos más legibles que en el resto de métodos, de igual modo presentan su correspondiente suavizado en la imagen.

Por su parte el método de interpolación bilineal produce el desenfoque característico al aumentar el tamaño de la rejilla de convolución, lo que impide ver con claridad la posición correcta de los caminos de la montaña, así como el lago.

Por su parte el método de vecino ponderado nuevamente ensancha los caminos al ser estos de color blanco, lo que ocasiona una distorsión en la imagen, en especial en aquellas que usan rejillas de 5x5 y 7x7 puesto que las imágenes resultantes son de muy distintas a la imagen original.

Finalmente como se observó de forma tanto subjetiva en las figuras como objetiva en las tablas el desempeño de los algoritmos de SR, tanto en escala de grises como en RGB para imágenes satelitales no han tenido un resultado satisfactorio pues el SSIM en general es bajo, pudiendo además apreciar estos resultados de forma visual en las imágenes. Al perder mucho detalle cuando la imagen es reducida se pierde mucha información, por consecuencia los algoritmos no son capaces de recuperar esa información para obtener un resultado cercano a la imagen HR. No obstante los caminos y rutas de las imágenes de muestra son mejorados de acuerdo al desempeño visto por los algoritmos en las imágenes estándar para PDI, (alisado de bordes y suavizado).

### 3.4.3 Resultados obtenidos en imágenes médicas

En cuanto a las imágenes médicas, la selección tanto para escala de grises como en RGB, se ha realizado en formato JPG con 24 bits de profundidad en ambos casos, la idea es verificar cual es el desempeño de los algoritmos en otros formatos de imágenes.

Igualmente dado que las imágenes en escala de grises son de 24 bits de profundidad, se utilizó la instrucción “rgb2gray” en el simulador para convertir la imagen a 8 bits de profundidad y poder ejecutar la simulación correctamente.

En cuanto los resultados objetivos las Tablas 3.15, 3.16 y 3.17 nos muestran el rendimiento que los algoritmos ofrecen para las imágenes médicas, donde podemos observar que el SSIM es bueno, considerando que la media está alrededor del 85%, por lo que en este caso los algoritmos para las imágenes médicas en formato JPG poseen un mejor rendimiento que en los grupos de imágenes anteriores.

MAE						
Método/Imagen	Medica01	Medica02	Medica03	Medica04	Medica05	Medica06
Replica de Pixel.	0.923	2.000	1.231	2.079	1.901	0.714
Vecino Ponderado 3x3	1.034	2.141	1.052	2.862	1.747	0.461
Vecino Ponderado 5x5	1.247	2.810	1.398	3.945	2.252	0.561
Vecino Ponderado 7x7	1.573	3.304	1.656	4.278	2.813	0.537
Interp. Vecino 3x3	2.536	5.227	3.241	6.929	4.880	2.284
Interp. Vecino 5x5	3.692	8.250	5.064	10.360	7.686	3.697
Interp. Vecino 7x7	4.875	10.546	6.517	12.291	10.069	4.629
Interp. Lineal 3x3	2.536	5.227	3.241	6.929	4.880	2.284
Interp. Lineal 5x5	3.692	8.250	5.064	10360	7.686	0.343
Interp. Lineal 7x7	4.875	10.546	6.517	12.291	10.069	4.629
Interp. Bilineal 3x3	2.099	4.302	2.772	5.567	4.148	2.171
Interp. Bilineal 5x5	2.973	6.795	4.267	8.375	6.625	3.663
Interp. Bilineal 7x7	3.852	8.640	5.434	10.052	8.585	4.703
Interp. Bicúbica I	1.334	2.956	1.657	2.996	2.898	0.987
Interp. Bicúbica II	1.039	2.262	1.319	2.180	2.148	0.685
Interp. Bicúbica III	1.031	2.260	1.311	0.851	2.163	0.694

Tabla 3. 15 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes médicas en escala de grises.

De acuerdo a la Tabla 3.15 podemos apreciar que los algoritmos que menor error medio absoluto presenta y en consecuencia esto los hacen el mejor son; los de réplica de pixel y vecino ponderado, siendo solo superados en un caso por el algoritmo de Bicúbica III para la imagen “Medica04”.

En cuanto a la relación pico señal a ruido de la Tabla 3.16, muestra que nuevamente el método de réplica de pixel consigue los mejores resultados objetivos.

PSNR(dB)						
Método/Imagen	Medica01	Medica02	Medica03	Medica04	Medica05	Medica06
Replica de Pixel.	43.400	36.744	40.334	35.377	37.065	42.334
Vecino Ponderado 3x3	40.149	36.636	39.396	35.156	37.357	43.227
Vecino Ponderado 5x5	38.213	35.495	37.429	34.559	36.323	42.163
Vecino Ponderado 7x7	36.650	32.273	36.445	34.564	36.025	42.280
Interp. Vecino 3x3	35.178	32.552	34.069	31.910	32.881	35.323
Interp. Vecino 5x5	32.792	31.140	31.812	31.180	31.617	33.426
Interp. Vecino 7x7	31.351	30.666	30.634	30.880	31.218	32.733
Interp. Lineal 3x3	35.178	32.552	34.069	31.910	32.881	35.323
Interp. Lineal 5x5	32.792	31.140	31.812	31.180	31.617	33.426
Interp. Lineal 7x7	31.351	30.666	30.634	30.880	31.218	32.733
Interp. Bilineal 3x3	36.662	33.223	34.875	32.302	33.502	35.486
Interp. Bilineal 5x5	34.197	31.709	32.601	31.432	32.119	33.389
Interp. Bilineal 7x7	32.593	31.281	31.373	31.086	31.709	32.623
Interp. Bicúbica I	40.545	34.893	38.131	34.398	34.899	40.677
Interp. Bicúbica II	42.535	36.116	39.617	35.276	36.096	42.520
Interp. Bicúbica III	42.623	36.081	39.649	35.270	36.006	42.428

Tabla 3. 16 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes médicas en escala de grises.

SSIM						
Método/Imagen	Medica01	Medica02	Medica03	Medica04	Medica05	Medica06
Replica de Pixel.	0.845	0.792	0.851	0.861	0.761	0.933
Vecino Ponderado 3x3	0.408	0.405	0.495	0.445	0.366	0.661
Vecino Ponderado 5x5	0.307	0.237	0.279	0.168	0.217	0.419
Vecino Ponderado 7x7	0.228	0.182	0.202	0.114	0.170	0.341
Interp. Vecino 3x3	0.345	0.386	0.426	0.389	0.354	0.597
Interp. Vecino 5x5	0.277	0.221	0.227	0.133	0.206	0.343
Interp. Vecino 7x7	0.199	0.187	0.173	0.102	0.182	0.283
Interp. Lineal 3x3	0.345	0.386	0.426	0.389	0.354	0.597
Interp. Lineal 5x5	0.277	0.221	0.227	0.133	0.206	0.343
Interp. Lineal 7x7	0.199	0.187	0.173	0.102	0.182	0.283
Interp. Bilineal 3x3	0.459	0.483	0.506	0.524	0.443	0.644
Interp. Bilineal 5x5	0.355	0.263	0.291	0.252	0.232	0.347
Interp. Bilineal 7x7	0.280	0.222	0.230	0.183	0.200	0.254
Interp. Bicúbica I	0.688	0.703	0.693	0.630	0.646	0.850
Interp. Bicúbica II	0.816	0.775	0.829	0.847	0.735	0.931
Interp. Bicúbica III	0.827	0.779	0.836	0.851	0.739	0.933

Tabla 3. 17 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes médicas en escala de grises.

De igual forma en el caso del índice de similitud estructural, el algoritmo de réplica de pixel mostró mejor desempeño al lograr los valores más altos, e igualar alguno con el algoritmo de Bicúbica III.

Para la evaluación subjetiva se ha seleccionado la imagen “Medica01” que se muestra en la Figura 3.17. En la imagen se realizó un acercamiento para diferenciar los detalles que presenta como resultado cada método de súper resolución, la imagen representa una radiografía del torso de una persona, un escenario bastante común de obtención de imágenes dentro de la rama de la medicina, el acercamiento corresponde al hombro izquierdo en donde se desea ver con mayor detalle los huesos que lo componen a fin de identificar alguna anomalía en su estructura.

Si observamos, los métodos de vecino ponderado e interpolación bilineal manifiestan sus inconvenientes nuevamente, al presentar ensanchamiento de colores claros y desenfoque respectivamente, sin embargo en el resto de métodos la imagen resultante es buena, esto también se debe a que la imagen LR no pierde mucho detalle al ser reducida de tamaño, por lo que los métodos de SR obtienen un mejor desempeño, se puede observar que los huesos no presentan efecto de dentado y el suavizado no impide apreciar los detalles como en otros casos.

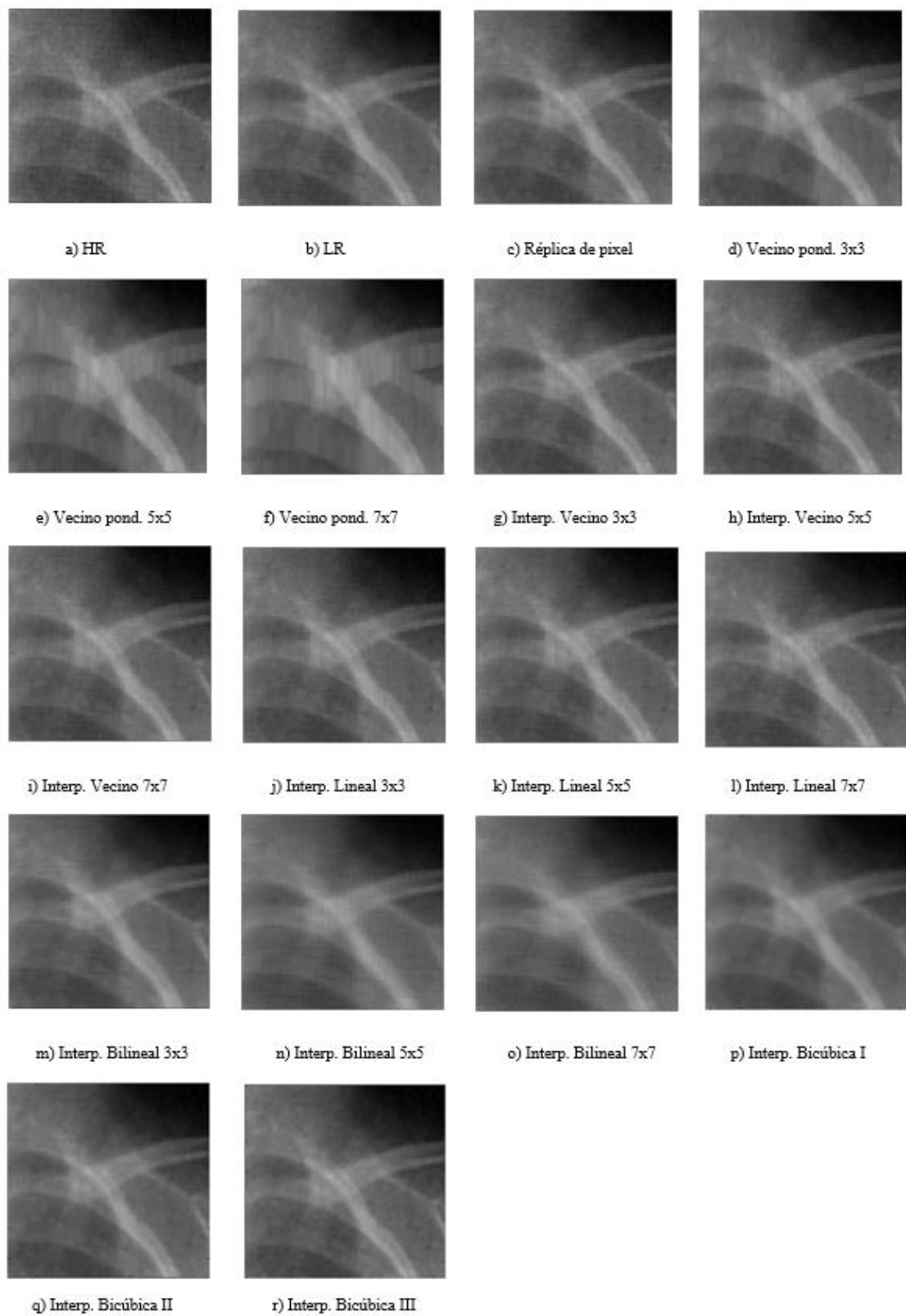


Figura 3. 17 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica01 en escala de grises.

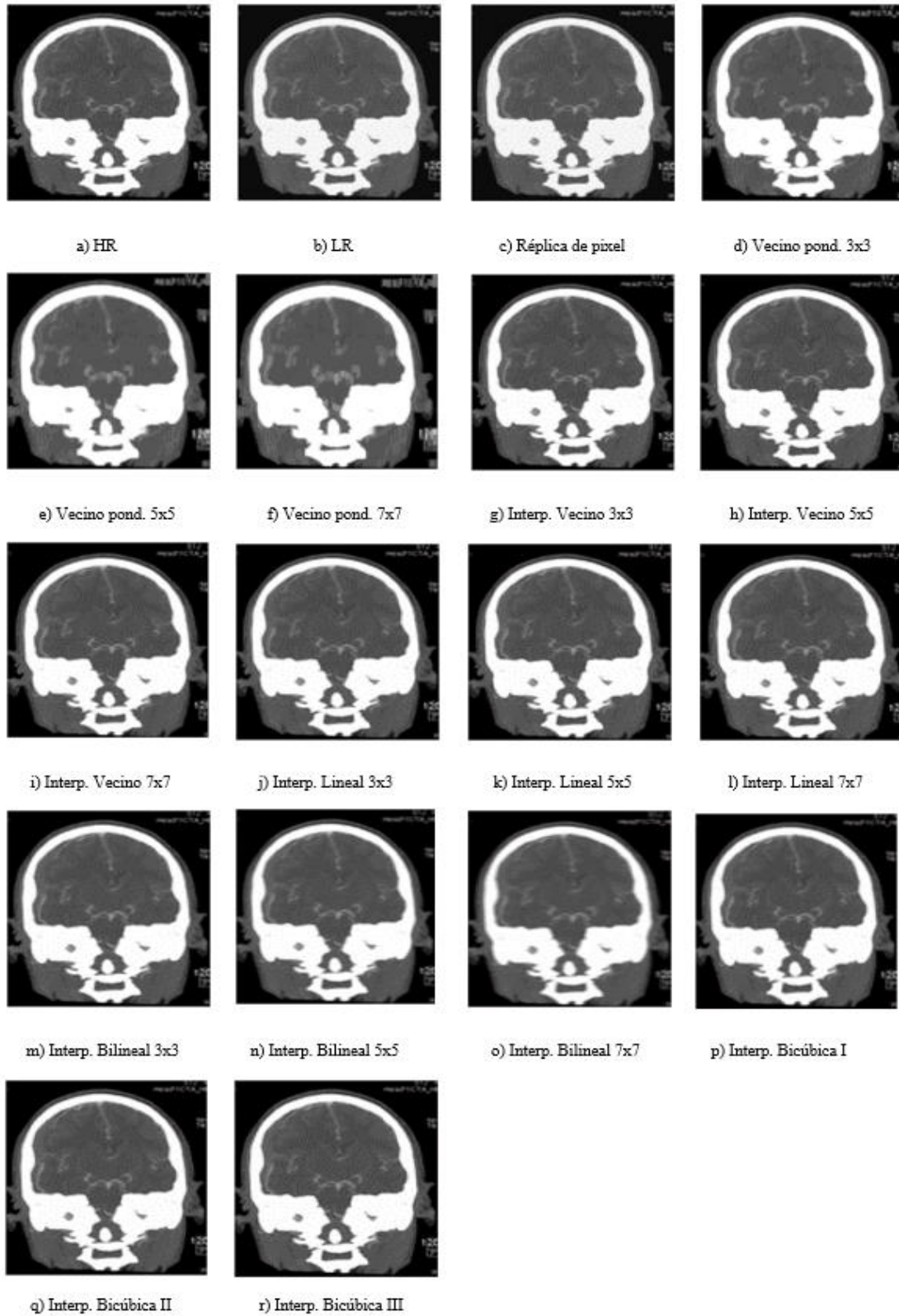


Figura 3. 18 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica05 en escala de grises.

Otra imagen que se analizó subjetivamente es el de la Figura 3.18, correspondiente a la “Medica05”, en este caso no se realizó un acercamiento al tratarse de una tomografía en la que se deseaba ver todo el contorno de la cabeza. En dicha imagen podemos ver que los algoritmos de réplica de pixel e interpolación bicúbica, arrojan una imagen resultante con una gran similitud con la imagen original HR. Esto se puede corroborar con la Tabla 3.17 al tener un valor de SSIM más alto que el resto de métodos.

En el método de vecino ponderado nuevamente se observa el ensanchamiento del color claro, provocando que por ejemplo el ojo izquierdo y la boca desaparezcan a medida que se aumenta la rejilla de convolución.

Por su parte, para las imágenes médicas en RGB las Tablas 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 nos muestran los resultados de los criterios objetivos de evaluación del MAE, PSNR, SSIM y NCD respectivamente.

MAE						
Método/Imagen	Medica07	Medica08	Medica09	Medica10	Medica11	Medica12
Replica de Pixel.	1.304	0.694	0.986	1.488	2.095	1.361
Vecino Ponderado 3x3	1.842	1.390	1.192	2.346	2.537	1.559
Vecino Ponderado 5x5	2.995	2.349	1.741	2.841	3.166	2.402
Vecino Ponderado 7x7	3.930	3.138	2.228	3.120	3.651	2.906
Interp. Vecino 3x3	4.509	2.368	3.121	4.638	5.130	4.808
Interp. Vecino 5x5	7.472	4.039	5.088	6.602	7.183	7.654
Interp. Vecino 7x7	9.804	5.408	6.812	7.742	8.744	9.398
Interp. Lineal 3x3	4.509	2.368	3.121	4.638	5.130	4.808
Interp. Lineal 5x5	7.472	4.039	5.088	6.602	7.183	7.654
Interp. Lineal 7x7	9.804	5.408	6.812	7.742	8.744	9.398
Interp. Bilineal 3x3	3.252	1.454	2.317	3.337	3.929	3.9101
Interp. Bilineal 5x5	5.537	2.484	3.734	4.901	5.479	6.452
Interp. Bilineal 7x7	7.258	3.340	4.935	5.881	6.555	8.090
Interp. Bicúbica I	1.588	0.799	1.246	1.970	2.585	1.601
Interp. Bicúbica II	1.376	0.700	1.097	1.650	2.296	1.401
Interp. Bicúbica III	1.377	0.699	1.092	1.651	2.285	1.423

Tabla 3. 18 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes médicas a color.

PSNR(dB)						
Método/Imagen	Medica07	Medica08	Medica09	Medica10	Medica11	Medica12
Replica de Pixel.	40.164	43.760	41.825	40.446	38.074	39.800
Vecino Ponderado 3x3	38.686	39.207	40.281	38.610	37.070	39.611
Vecino Ponderado 5x5	37.393	37.083	38.872	37.675	36.340	38.559
Vecino Ponderado 7x7	36.797	36.224	38.153	37.462	35.983	38.321
Interp. Vecino 3x3	35.057	36.919	36.237	35.193	34.315	35.447
Interp. Vecino 5x5	33.922	34.944	34.678	33.904	33.239	34.559
Interp. Vecino 7x7	33.421	34.149	33.951	33.389	32.727	34.231
Interp. Lineal 3x3	35.057	36.919	36.237	35.193	34.315	35.447
Interp. Lineal 5x5	33.922	34.944	34.678	33.904	33.239	34.559
Interp. Lineal 7x7	33.421	34.149	33.851	33.389	32.727	34.231
Interp. Bilineal 3x3	36.003	39.131	37.416	36.526	35.359	36.037
Interp. Bilineal 5x5	34.584	36.584	35.728	34.891	34.146	34.987
Interp. Bilineal 7x7	33.987	35.465	34.905	34.193	33.516	33.618
Interp. Bicúbica I	39.014	42.966	40.378	39.159	37.098	38.990
Interp. Bicúbica II	39.817	43.794	41.183	39.893	37.636	39.644
Interp. Bicúbica III	39.782	43.757	41.202	39.847	37.636	39.529

Tabla 3. 19 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes médicas a color.

SSIM						
Método/Imagen	Medica07	Medica08	Medica09	Medica10	Medica11	Medica12
Replica de Pixel.	0.918	0.880	0.880	0.896	0.839	0.900
Vecino Ponderado 3x3	0.573	0.478	0.550	0.385	0.377	0.532
Vecino Ponderado 5x5	0.328	0.247	0.367	0.090	0.163	0.245
Vecino Ponderado 7x7	0.240	0.191	0.311	0.060	0.091	0.156
Interp. Vecino 3x3	0.515	0.452	0.506	0.330	0.333	0.462
Interp. Vecino 5x5	0.280	0.238	0.340	0.063	0.142	0.170
Interp. Vecino 7x7	0.201	0.192	0.290	0.043	0.087	0.096
Interp. Lineal 3x3	0.515	0.452	0.506	0.330	0.333	0.462
Interp. Lineal 5x5	0.280	0.238	0.340	0.063	0.142	0.170
Interp. Lineal 7x7	0.201	0.192	0.290	0.043	0.087	0.096
Interp. Bilineal 3x3	0.629	0.603	0.613	0.548	0.497	0.537
Interp. Bilineal 5x5	0.392	0.379	0.435	0.238	0.269	0.227
Interp. Bilineal 7x7	0.309	0.309	0.373	0.135	0.192	0.116
Interp. Bicúbica I	0.874	0.814	0.819	0.814	0.731	0.816
Interp. Bicúbica II	0.913	0.865	0.863	0.880	0.809	0.850
Interp. Bicúbica III	0.915	0.870	0.866	0.885	0.819	0.851

Tabla 3. 20 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes médicas a color.

NCD						
Método/Imagen	Medica07	Medica08	Medica09	Medica10	Medica11	Medica12
Replica de Pixel.	0.022	0.012	0.012	0.022	0.035	0.020
Vecino Ponderado 3x3	0.076	0.042	0.038	0.070	0.087	0.074
Vecino Ponderado 5x5	0.129	0.073	0.063	0.103	0.133	0.129
Vecino Ponderado 7x7	0.173	0.100	0.086	0.127	0.170	0.173
Interp. Vecino 3x3	0.076	0.042	0.038	0.070	0.084	0.073
Interp. Vecino 5x5	0.125	0.072	0.062	0.099	0.120	0.119
Interp. Vecino 7x7	0.164	0.097	0.083	0.116	0.146	0.152
Interp. Lineal 3x3	0.076	0.042	0.038	0.070	0.084	0.073
Interp. Lineal 5x5	0.125	0.072	0.062	0.099	0.120	0.119
Interp. Lineal 7x7	0.164	0.097	0.083	0.116	0.146	0.152
Interp. Bilineal 3x3	0.059	0.029	0.029	0.051	0.064	0.060
Interp. Bilineal 5x5	0.096	0.048	0.045	0.074	0.088	0.101
Interp. Bilineal 7x7	0.124	0.064	0.600	0.089	0.105	0.129
Ampliación c/Promedio	0.119	0.103	0.141	0.122	0.139	0.073
Interp. Bicúbica I	0.027	0.015	0.015	0.029	0.042	0.024
Interp. Bicúbica II	0.024	0.013	0.014	0.024	0.038	0.021
Interp. Bicúbica III	0.024	0.013	0.014	0.025	0.038	0.022

Tabla 3. 21 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes médicas a color.

De la serie de tablas anterior, el método de réplica de pixel obtiene los mejores resultados en todos los casos al ser los valores ideales (más bajos y más altos) respectivamente conforme a las tablas 3.18 a 3.21.

Ahora pasando a la comparación subjetiva para verificar los valores de las tablas se muestra la Figura 3.19 correspondiente a la imagen "Medica08" en el que nuevamente se tiene una imagen en rayos x de la pelvis de una persona, en donde se ha realizado un acercamiento para apreciar mejor los detalles.

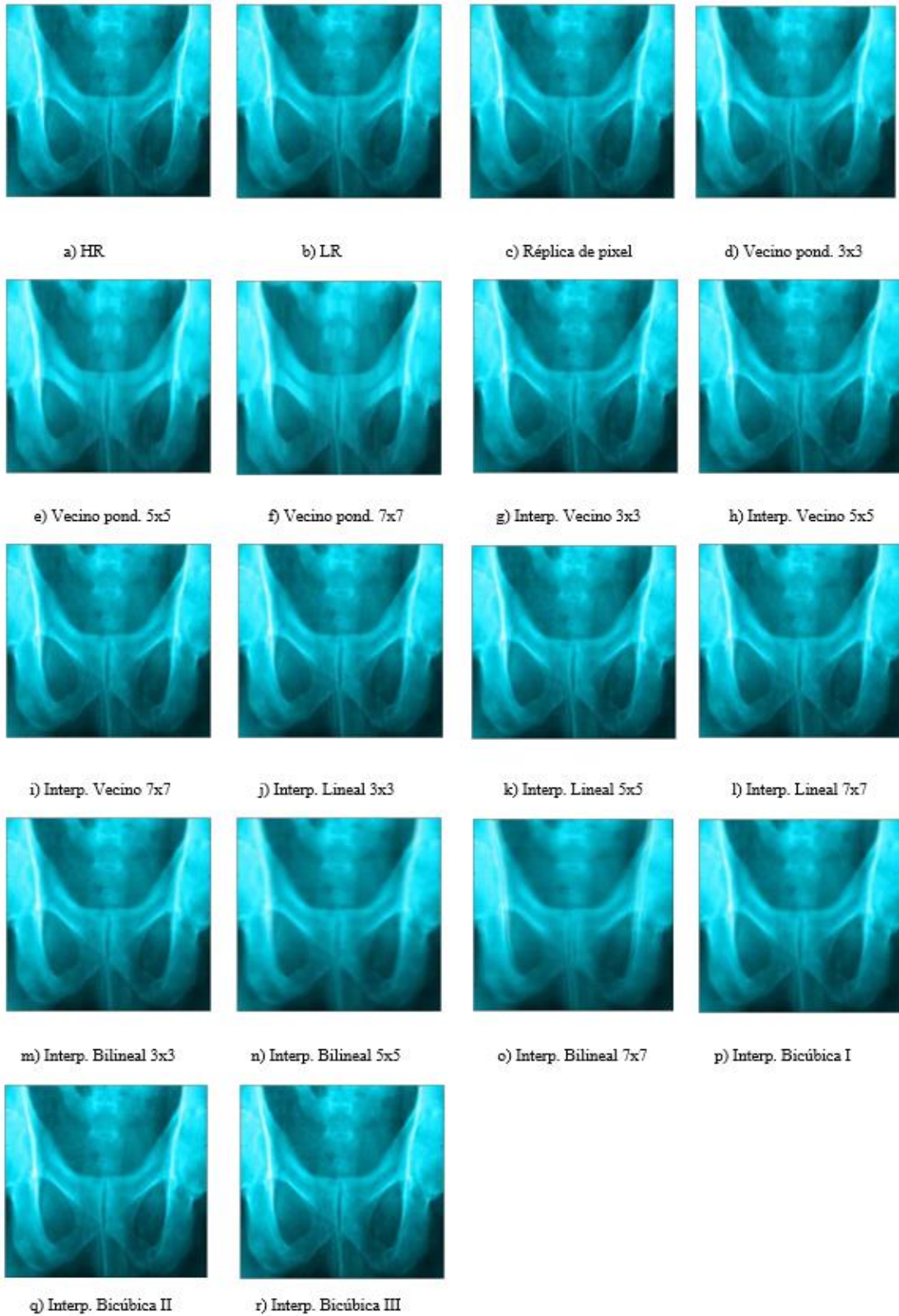


Figura 3. 19 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica08 a color.

En la Figura 3.19 podemos observar que los algoritmos de interpolación bicúbica I, II, III y el de réplica de pixel generan una imagen resultante de buena calidad, confirmándose los valores de la tabla del índice de similitud estructural en el que estos métodos presentan los mejores resultados.

En el caso del método de interpolación bilineal nuevamente, la presencia de desenfoque provoca que la parte central de la imagen no se aprecie con claridad, siendo más notorio este defecto en donde la rejilla de convolución se agrandó.

Otra imagen a analizar de forma subjetiva es la de “Medica12” de la Figura 3.20, en donde realizando un acercamiento de imagen podemos apreciar las diferencias entre cada método para una imagen de un ultrasonido.

Nuevamente en la Figura 3.20 podemos apreciar que los algoritmos que ofrecen un mejor desempeño son los de réplica de pixel e interpolación bicúbica, correspondiéndose con los valores obtenidos de la Tabla 3.20 del índice de similitud estructural, sin embargo, podemos apreciar que pese a que el método de réplica ofrece el valor más alto, la imagen presenta efecto de dentado siendo notorio en la nariz del bebé, mientras que los métodos de interpolación bicúbica corrigen este defecto.

Por su parte el método del vecino ponderado nuevamente muestra un ensanchamiento de los colores claros, esto se puede apreciar en la parte correspondiente al cráneo en donde el hueso de la frente se observa más grande.

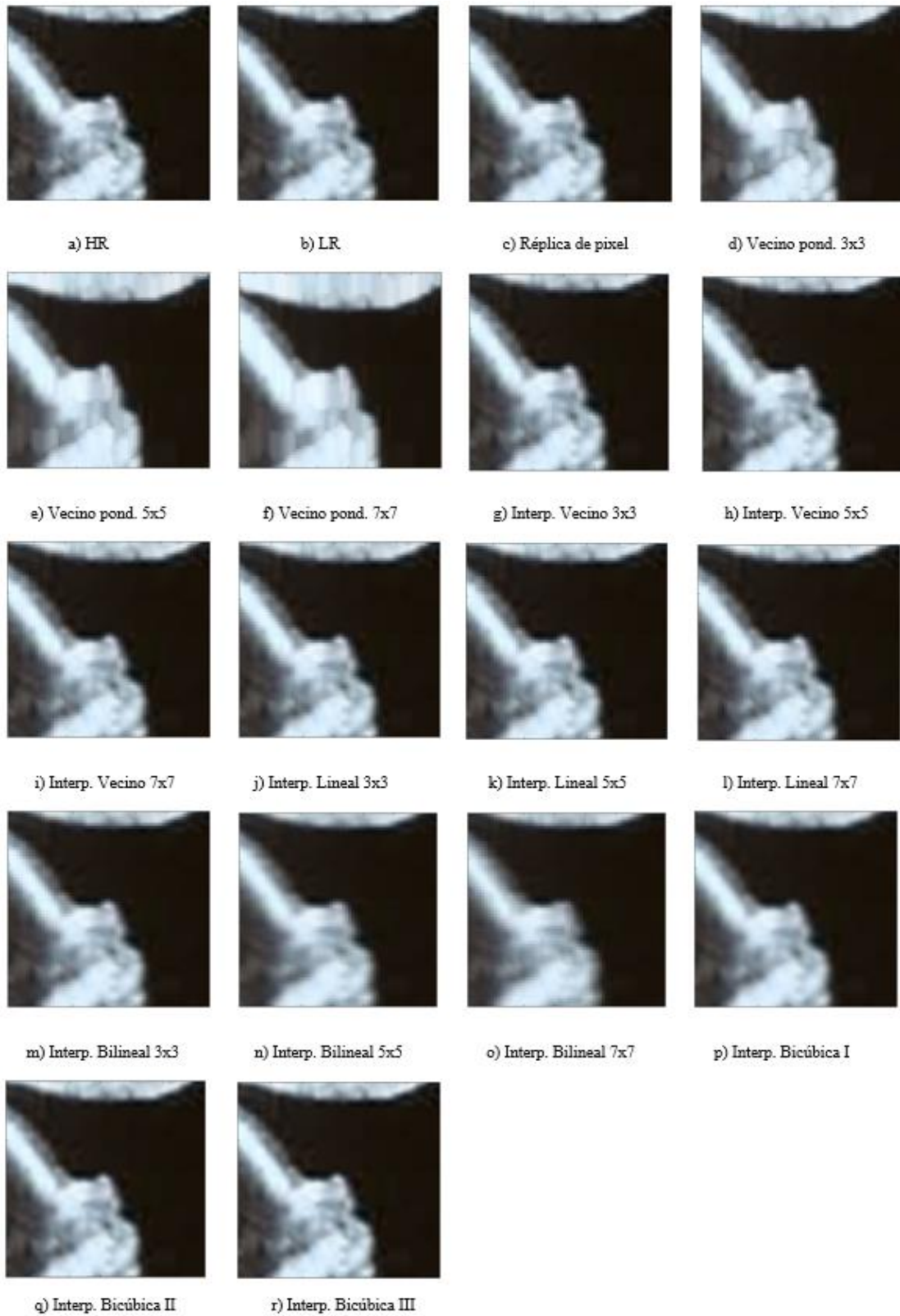


Figura 3. 20 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Medica12 a color.

Considerando únicamente aquellos defectos de dentado y suavizado presente para los mejores 4 métodos en las imágenes como los únicos inconvenientes serios y de acuerdo a que los resultados de los criterios objetivos también nos arrojan una media del 85% en SSIM, tenemos entonces que los algoritmos presentan un mejor desempeño en imágenes de tipo médicas resultando ser más eficientes al generar una mejor imagen de súper resolución.

### 3.4.4 Resultados obtenidos en imágenes de tráfico

Finalmente el último grupo de imágenes lo integran aquellas correspondientes a cámaras de video vigilancia, particularmente a aquellas correspondientes a las de tráfico vehicular en donde se seleccionarán para la evaluación subjetiva áreas de interés que permitan apreciar de mejor manera las diferencias existentes entre los algoritmos. Las imágenes son esta vez en formato PNG con 24 bits de profundidad, tanto para la escala de grises como en RGB y de igual forma para las imágenes en escala de grises se utilizó la instrucción “rgb2gray” para las simulaciones de los algoritmos en escala de grises. La Tabla 3.22 nos permite verificar el resultado encontrado para el error medio absoluto en las imágenes en escala de grises.

MAE						
Método/Imagen	Trafico01	Trafico02	Trafico03	Trafico04	Trafico05	Trafico06
Replica de Pixel.	4.083	2.856	3.477	4.858	2.388	3.159
Vecino Ponderado 3x3	5.499	3.152	4.366	5.600	2.079	3.532
Vecino Ponderado 5x5	6.631	3.957	5.846	6.424	2.287	4.396
Vecino Ponderado 7x7	6.794	4.206	6.391	6.337	2.243	4.679
Interp. Vecino 3x3	10.374	7.966	8.345	12.358	6.083	8.214
Interp. Vecino 5x5	14.571	11.956	12.270	17.430	8.644	11.933
Interp. Vecino 7x7	16.997	14.412	14.589	20.263	10.035	14.260
Interp. Lineal 3x3	10.374	7.966	8.345	12.358	6.083	0.243
Interp. Lineal 5x5	14.571	11.956	12.270	17.430	8.644	11.933
Interp. Lineal 7x7	16.997	14.412	14.589	20.263	10.035	14.260
Interp. Bilineal 3x3	7.942	6.501	6.607	10.030	5.214	6.849
Interp. Bilineal 5x5	11.080	9.742	9.631	14.322	7.505	10.020
Interp. Bilineal 7x7	13.012	11.798	11.620	16.814	8.824	12.103
Interp. Bicúbica I	5.160	3.672	4.299	6.225	3.052	4.236
Interp. Bicúbica II	4.424	3.140	3.680	5.289	2.541	3.413
Interp. Bicúbica III	4.421	3.148	3.671	5.299	2.556	3.419

Tabla 4. 22 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes de tráfico vehicular en escala de grises.

Nuevamente podemos apreciar que el algoritmo que menor MAE presenta es el correspondiente al de réplica de pixel. Por su parte la tabla 4.23 nos muestra que el mejor PSNR le corresponde igualmente a este y al de vecino ponderado, al poseer los valores más altos de la relación pico señal a ruido con respecto al resto.

PSNR(dB)						
Método/Imagen	Trafico01	Trafico02	Trafico03	Trafico04	Trafico05	Trafico06
Replica de Pixel.	32.814	34.653	34.035	32.193	35.039	34.097
Vecino Ponderado 3x3	32.547	34.999	33.662	32.960	36.082	34.558
Vecino Ponderado 5x5	32.180	34.477	32.908	32.840	35.862	34.157
Vecino Ponderado 7x7	32.258	34.470	32.628	32.936	35.901	34.056
Interp. Vecino 3x3	30.068	31.094	30.966	30.084	31.718	31.345
Interp. Vecino 5x5	29.256	29.911	29.905	29.331	30.700	30.435
Interp. Vecino 7x7	28.877	29.406	29.402	28.951	30.289	30.004
Interp. Lineal 3x3	30.068	31.094	30.966	30.084	31.718	31.345
Interp. Lineal 5x5	29.256	29.911	29.905	29.331	30.700	30.435
Interp. Lineal 7x7	28.877	29.406	29.402	28.951	30.289	30.004
Interp. Bilineal 3x3	30.601	31.662	31.616	30.427	32.113	31.852
Interp. Bilineal 5x5	29.649	30.400	30.533	29.591	31.035	30.882
Interp. Bilineal 7x7	29.213	29.831	29.991	29.167	30.589	30.364
Interp. Bicúbica I	31.792	33.430	32.725	31.341	34.100	32.958
Interp. Bicúbica II	32.481	34.194	33.480	31.925	34.731	33.742
Interp. Bicúbica III	32.470	34.161	33.471	31.852	34.679	33.669

Tabla 3. 23 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes de tráfico vehicular en escala de grises.

La Tabla 3.24 nos permite conocer de forma objetiva el desempeño de los algoritmos en este tipo de imágenes. En ella se observa que el desempeño es del alrededor del orden del 79% en cuanto al SSIM. Siendo el método de réplica de pixel el más alto.

SSIM						
Método/Imagen	Trafico01	Trafico02	Trafico03	Trafico04	Trafico05	Trafico06
Replica de Pixel.	0.805	0.837	0.799	0.800	0.826	0.793
Vecino Ponderado 3x3	0.290	0.378	0.360	0.300	0.397	0.285
Vecino Ponderado 5x5	0.066	0.131	0.094	0.082	0.167	0.089
Vecino Ponderado 7x7	0.032	0.076	0.029	0.050	0.102	0.049
Interp. Vecino 3x3	0.252	0.286	0.304	0.254	0.329	0.243
Interp. Vecino 5x5	0.038	0.030	0.053	0.028	0.089	0.051
Interp. Vecino 7x7	0.007	-0.002	0.0009	0.007	0.050	0.027
Interp. Lineal 3x3	0.252	0.286	0.304	0.254	0.329	0.243
Interp. Lineal 5x5	0.038	0.030	0.053	0.028	0.089	0.051
Interp. Lineal 7x7	0.007	-0.002	0.0009	0.007	0.050	0.027
Interp. Bilineal 3x3	0.435	0.424	0.473	0.397	0.428	0.372
Interp. Bilineal 5x5	0.200	0.140	0.225	0.135	0.152	0.140
Interp. Bilineal 7x7	0.139	0.079	0.123	0.085	0.081	0.099
Interp. Bicúbica I	0.673	0.696	0.680	0.663	0.612	0.620
Interp. Bicúbica II	0.775	0.813	0.783	0.770	0.806	0.762
Interp. Bicúbica III	0.784	0.821	0.789	0.779	0.812	0.771

Tabla 3. 24 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes de tráfico vehicular en escala de grises.

Ahora analizando subjetivamente los algoritmos, se tiene la Figura 3.21 en donde se muestra la imagen “Trafico02”, nuevamente podemos apreciar que los que mejor desempeño ofrecen son los mismos en los ejemplos anteriores, nuevamente los polinomios de interpolación bicúbica ofrecen bordes más finos evitando el dentado, un ejemplo es el perro en la imagen y que es apreciable en el resto de resultados. Por su parte los algoritmos de vecino ponderado presentan el inconveniente del engrosado de colores ya visto, mientras que el de interpolación bilineal exhibe el desenfoque al aumentarse el tamaño de la rejilla.



Figura 3. 21 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico02 en escala de grises.



Figura 3. 22 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico06 en escala de grises.

Por último la Figura 3.22 muestra la imagen “trafico06” en donde se ha realizado un acercamiento para poder apreciar detalles como la matrícula de un vehículo. Como se esperaba los algoritmos de interpolación bicúbica son los que mejor resultado obtienen pues al eliminar el efecto de dentado, la lectura de la matrícula es más fácil que en el resto de métodos. El resto de diferencias ya mencionadas siguen presentes.

Para finalizar solo restan los resultados en imágenes de tráfico vial a color, de modo que los valores objetivos hallados de MAE, PSNR, SSIM y NCD se muestran en las Tablas 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28 respectivamente.

MAE						
Método/Imagen	Trafico07	Trafico08	Trafico09	Trafico10	Trafico11	Trafico12
Replica de Pixel.	2.919	2.576	3.296	4.013	4.264	3.084
Vecino Ponderado 3x3	2.291	2.276	2.629	4.732	4.259	3.307
Vecino Ponderado 5x5	2.367	2.499	3.254	5.860	4.853	4.137
Vecino Ponderado 7x7	2.302	2.516	3.399	6.222	5.101	4.207
Interp. Vecino 3x3	7.500	6.533	9.167	9.746	8.856	9.266
Interp. Vecino 5x5	9.761	8.597	13.389	13.550	11.519	13.194
Interp. Vecino 7x7	11.181	9.870	15.676	15.751	13.139	15.132
Interp. Lineal 3x3	7.500	6.533	9.167	9.746	8.856	9.266
Interp. Lineal 5x5	9.761	8.597	13.389	13.550	11.519	13.194
Interp. Lineal 7x7	11.181	9.987	15.676	15.751	13.139	15.132
Interp. Bilineal 3x3	6.614	5.615	8.114	7.872	7.438	7.739
Interp. Bilineal 5x5	8.736	7.549	12.018	10.994	9.651	11.290
Interp. Bilineal 7x7	10.028	8.795	14.215	12.853	11.005	13.125
Interp. Bicúbica I	3.727	3.233	4.114	4.995	5.159	3.880
Interp. Bicúbica II	3.151	2.718	3.478	4.352	4.672	3.249
Interp. Bicúbica III	3.114	2.687	3.484	4.362	4.667	3.264

Tabla 3. 25 Resultados correspondientes al error medio absoluto en imágenes de tráfico vehicular a color.

Dentro de lo esperado, la Tabla 3.25 muestra que el error medio absoluto y la Tabla 3.26 correspondiente a la relación pico señal a ruido los algoritmos de réplica de pixel y vecino ponderado presentan el mejor desempeño que el resto de algoritmos evaluados.

PSNR(dB)						
Método/Imagen	Trafico07	Trafico08	Trafico09	Trafico10	Trafico11	Trafico12
Replica de Pixel.	37.051	37.601	36.175	35.628	35.592	36.359
Vecino Ponderado 3x3	38.703	38.753	37.887	36.106	36.527	37.319
Vecino Ponderado 5x5	39.090	38.992	37.637	35.939	36.457	36.984
Vecino Ponderado 7x7	39.473	39.341	37.739	35.972	36.487	37.104
Interp. Vecino 3x3	34.477	34.880	33.671	33.571	33.742	33.557
Interp. Vecino 5x5	33.847	34.275	32.875	32.919	33.095	32.885
Interp. Vecino 7x7	33.544	33.887	32.528	32.614	32.803	32.650
Interp. Lineal 3x3	34.477	34.880	33.671	33.571	33.742	33.557
Interp. Lineal 5x5	33.847	34.275	32.875	32.919	33.095	32.885
Interp. Lineal 7x7	33.544	33.887	32.528	32.614	32.803	32.650
Interp. Bilineal 3x3	34.873	32.423	33.993	34.081	34.214	34.051
Interp. Bilineal 5x5	34.137	34.685	33.100	33.379	33.553	33.277
Interp. Bilineal 7x7	33.816	34.283	32.699	33.048	33.216	33.006
Interp. Bicúbica I	36.208	36.763	35.602	34.995	35.082	35.624
Interp. Bicúbica II	36.772	37.402	36.177	35.355	35.269	36.150
Interp. Bicúbica III	36.825	37.430	36.101	35.251	35.196	36.039

Tabla 3. 26 Resultados correspondientes a la relación pico señal a ruido en imágenes de tráfico vehicular a color.

SSIM						
Método/Imagen	Trafico07	Trafico08	Trafico09	Trafico10	Trafico11	Trafico12
Replica de Pixel.	0.835	0.840	0.869	0.794	0.688	0.887
Vecino Ponderado 3x3	0.305	0.297	0.457	0.304	0.241	0.407
Vecino Ponderado 5x5	0.096	0.090	0.153	0.072	0.057	0.087
Vecino Ponderado 7x7	0.067	0.063	0.047	0.024	0.014	0.017
Interp. Vecino 3x3	0.206	0.219	0.369	0.251	0.175	0.323
Interp. Vecino 5x5	0.024	0.042	0.044	0.022	0.014	0.005
Interp. Vecino 7x7	0.024	0.034	-0.032	-0.013	-0.009	-0.026
Interp. Lineal 3x3	0.206	0.219	0.369	0.251	0.175	0.323
Interp. Lineal 5x5	0.024	0.042	0.044	0.022	0.014	0.005
Interp. Lineal 7x7	0.024	0.034	-0.032	-0.013	-0.009	-0.026
Interp. Bilineal 3x3	0.300	0.329	0.445	0.405	0.296	0.457
Interp. Bilineal 5x5	0.053	0.078	0.110	0.174	0.099	0.108
Interp. Bilineal 7x7	0.053	0.068	0.007	0.105	0.052	0.035
Interp. Bicúbica I	0.707	0.712	0.802	0.682	0.554	0.810
Interp. Bicúbica II	0.806	0.810	0.862	0.762	0.643	0.877
Interp. Bicúbica III	0.817	0.821	0.867	0.771	0.656	0.882

Tabla 3. 27 Resultados correspondientes al índice de similitud estructural en imágenes de tráfico vehicular a color.

NCD						
Método/Imagen	Trafico07	Trafico08	Trafico09	Trafico10	Trafico11	Trafico12
Replica de Pixel.	0.046	0.038	0.054	0.055	0.065	0.047
Vecino Ponderado 3x3	0.129	0.109	0.161	0.143	0.134	0.152
Vecino Ponderado 5x5	0.190	0.162	0.264	0.223	0.193	0.248
Vecino Ponderado 7x7	0.238	0.202	0.341	0.283	0.236	0.317
Interp. Vecino 3x3	0.128	0.107	0.158	0.143	0.130	0.147
Interp. Vecino 5x5	0.172	0.146	0.240	0.209	0.169	0.221
Interp. Vecino 7x7	0.195	0.169	0.285	0.248	0.191	0.260
Interp. Lineal 3x3	0.128	0.107	0.158	0.143	0.130	0.147
Interp. Lineal 5x5	0.172	0.146	0.240	0.209	0.169	0.221
Interp. Lineal 7x7	0.195	0.169	0.285	0.248	0.191	0.260
Interp. Bilineal 3x3	0.115	0.094	0.142	0.116	0.109	0.126
Interp. Bilineal 5x5	0.156	0.130	0.216	0.169	0.139	0.192
Interp. Bilineal 7x7	0.176	0.149	0.258	0.202	0.155	0.227
Ampliación c/Promedio	0.114	0.118	0.120	0.104	0.087	0.097
Interp. Bicúbica I	0.059	0.049	0.068	0.069	0.076	0.059
Interp. Bicúbica II	0.050	0.042	0.058	0.060	0.070	0.049
Interp. Bicúbica III	0.050	0.041	0.058	0.060	0.071	0.050

Tabla 3. 28 Resultados correspondientes a la diferencia de color normalizado en imágenes de tráfico vehicular a color.

En cuanto al índice de similitud estructural, el algoritmo de réplica de pixel tiene el mejor resultado al ofrecer los valores más aptos en las imágenes analizadas.

De igual modo la diferencia de color normalizado, en la Tabla 3.28 no sorprende ver que el método de réplica de pixel es nuevamente el que menor diferencia presenta, dado que como hemos dicho a lo largo de esta tesis, es debido a que el algoritmo no manipula matemáticamente los pixeles, de modo que no sucede ninguna modificación en la intensidad de los colores como si sucede en los otros métodos.

Para la comparación subjetiva se ha seleccionado la imagen “Trafico07” vista en la Figura 3.23 con un acercamiento para poder ver el desempeño de los métodos en los detalles como signos y gráficos en imágenes a color.



Figura 3. 23 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico07 a color.

Aunque la imagen original HR, no está muy detallada, se puede apreciar que la matrícula del vehículo se puede reconocer más fácilmente en los métodos de interpolación bicúbica II y III, por su parte el peor caso está presente en el método del vecino ponderado en donde la matrícula es ilegible debido al ensanchamiento del color blanco de la placa del coche, de igual forma los métodos de interpolación bilineal emborronan la imagen debido al desenfoque por el aumento de la rejilla, haciendo difícil la lectura de la matrícula en estos métodos, en cuanto a los métodos de interpolación del vecino más cercano e interpolación lineal el desempeño es bueno cuando la rejilla es de 3x3, aunque sin llegar a lograr la mejor imagen por el efecto del dentado en bordes.

Otro ejemplo que nos permite analizar de forma subjetiva es el mostrado en la Figura 3.24 correspondiente a la imagen “Trafico10” en el que al realizar un acercamiento igualmente se pueden apreciar de mejor manera los detalles que ofrece cada método.

Una vez más, los algoritmos de réplica de pixel, interpolación del vecino, interpolación lineal, interpolación bilineal y ampliación con promedio con rejillas de 3x3 obtienen una imagen uniforme con el correspondiente dentado en bordes de la imagen reducida a la que se le aplicó el algoritmo de súper resolución.

Conforme se aumenta el tamaño de la rejilla la calidad de la imagen decae en aquellos en donde se aplican rejillas mayores, correspondiéndose de esta forma con el SSIM de la Tabla 3.27 en especial en los de vecino ponderado y bilineal,

Por su parte los métodos de interpolación bicúbica ofrecen una imagen suavizada pero sin el defecto indeseado de bordes, haciendo más clara la interpretación de la persona que está sobre la calle caminando.

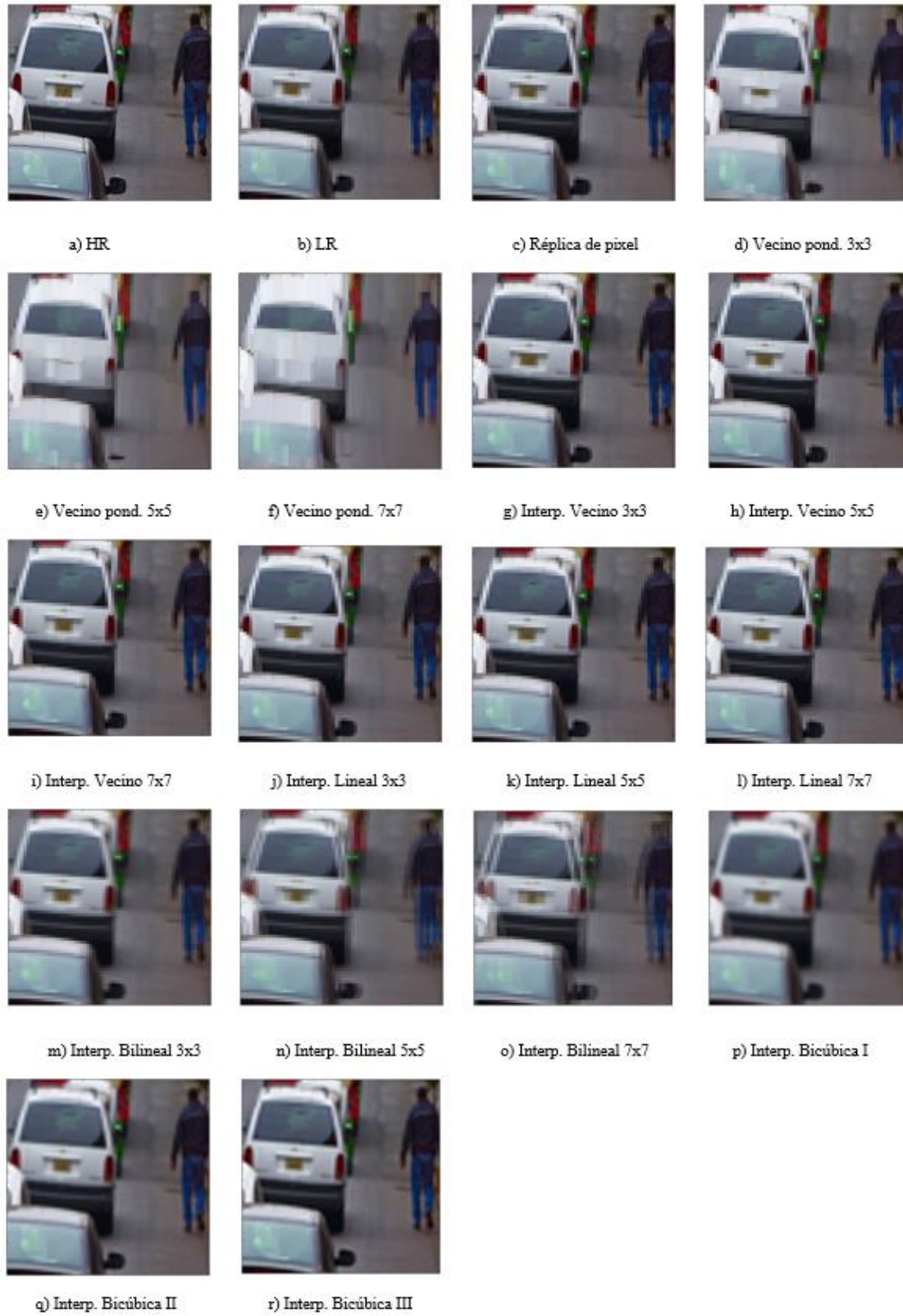


Figura 3. 24 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen Trafico10 a color.

## Capítulo 4

### Análisis y comparación de resultados

Hemos visto los resultados que ofrecen los distintos algoritmos presentados, se probaron con distintas imágenes que fuesen capaz de presentar diferentes escenarios para verificar la versatilidad de los métodos, como se pudo observar en las simulaciones los algoritmos arrojan un comportamiento esperado de acuerdo a lo que se describió en la parte teórica en el capítulo 2. Entonces tenemos que:

- Replica de pixel: Este método no requiere un consumo computacional muy alto, sin embargo dado que solo realiza un copiado de pixel, el resultado final es una imagen que conserva los mismos detalles de la original, si el objetivo fuese mejorar la información pictórica por medio de súper resolución, este método no sería el recomendado.
- Vecino ponderado: Este método pese a no requerir un nivel de computo elevado presenta un grave inconveniente en la imagen de SR (engrosado de colores claros) en detrimento de la disminución de colores oscuros, es decir, los colores más claros tienden a engrosar y los colores menos claros a disminuir dentro de la imagen resultante. Además, conforme se aumenta el tamaño de la rejilla de convolución el desperfecto es más notorio. Esto tiene sentido si se toma en cuenta que el valor tomado para generar el nuevo pixel de SR, es el de valor máximo dentro de la vecindad de la rejilla, siendo los colores claros aquellos con mayor valor de intensidad en una imagen digital.
- Interpolación del vecino: Este método no requiere de mucho poder computacional, sin embargo presenta un efecto no deseado al que se le conoce como; aliasing<sup>8</sup>, el cual muestra un efecto de dentado en los bordes y líneas de los objetos presentes en la imagen.

---

<sup>8</sup> Aliasing: aplicado al campo de la imagen digital refiere al efecto indeseado resultante de la degradación de la imagen.

- Interpolación Lineal: Su consumo computacional es ligeramente mayor que en los métodos anteriores aunque el SSIM es similar al método de interpolación del vecino y de igual forma presenta dentado en los bordes.
- Interpolación Bilineal: Este método aunque posee un mejor desempeño (mayor SSIM) que los métodos de interpolación del vecino e interpolación lineal, presenta un ligero dentado en los bordes igualmente que los anteriores, además el emplear ventanas de mayor tamaño tiene el inconveniente de generar desenfoque en las imágenes resultantes.
- Interpolación Bicúbica I: Este método pese a presentar un suavizado de imagen y requerir un mayor consumo computacional, presenta mejores resultados ya que no produce efectos de dentado en líneas y bordes de los elementos de la imagen resultante, lo que permite una mejor apreciación para imágenes en donde sea necesario por ejemplo, la buena identificación de signos gráficos.
- Interpolación Bicúbica II: Este método supone una mejora considerable respecto al primer polinomio de interpolación bicúbica, ya que el efecto de suavizado es menor siendo con ello todavía mejor el reconocimiento de los detalles, de igual modo su consumo computacional se reduce significativamente.
- Interpolación Bicúbica III: El método es el mejor en cuanto a la relación; calidad de imagen resultante-consumo computacional, ya que presenta un ligero suavizado de imagen, siendo el mejor entre los tres algoritmos de interpolación bicúbica al ser el menos notorio, así mismo su consumo computacional es menor que el de Bicúbica I y no produce dentado en los bordes de la imagen.

En los algoritmos en donde se implementó mayor tamaño de rejilla (5x5 y 7x7), se observó que la calidad de la imagen resultante disminuía de forma proporcional, siendo lógico dado que al tomar pixeles cada vez más alejados del pixel de referencia la información pictórica se va diferenciando notablemente de este.

Tomando como referencia las tablas de SSIM de todas las simulaciones observamos que los algoritmos de interpolación del vecino, lineal y bilineal para rejillas de 3x3 y los métodos de réplica de pixel en general logran una imagen con una similitud entre el 70% y el 85% según el tipo de imagen evaluada, siendo en las imágenes médicas las que mejor resultados

mostraron los algoritmos, esto porque si tomamos en cuenta que al reducir la imagen a la mitad para obtener la imagen LR se pierde un 50% de información, entonces se deduce que los algoritmos recuperan entre un 30% o 40% del 50% de la información perdida al reducirse la imagen, en general este comportamiento se observó en la mayoría de las pruebas realizadas demostrando que los algoritmos ofrecen un desempeño constante en cualquier tipo de imagen, no obstante el formato de imagen influye puesto que los algoritmos ofrecen mejores resultados en los casos de imágenes JPG y PNG.

Por último el método de súper resolución más conveniente de usar en alguna implementación, irá en función de lo que se desee, si por un lado no buscamos más que aumentar el tamaño de la imagen el método de réplica cumple sobradamente su objetivo, además de que a nivel computacional su consumo sería muy bajo, pero si buscásemos mejorar detalles pictóricos que nos facilitasen por ejemplo la lectura de una matrícula vehicular pese a que no obtuvo el mejor desempeño de acuerdo a las pruebas de los criterios objetivos de evaluación, el algoritmo ideal para esta tarea sería el de la interpolación bicúbica III, puesto que la mejora que supone tener una imagen sin efecto de dentado de bordes, es muy útil para esta tarea.

Debido a todo lo anterior, se optó por el método de interpolación bicúbica III para ser implementado en un algoritmo de súper resolución en video a color, en donde se utilizó un video de una cámara de tráfico vehicular.

#### 4.1 Algoritmo propuesto para SR de video a color

Como parte final de esta tesis, se realizará la implementación de un algoritmo de súper resolución de video a color empleando aquel algoritmo de acuerdo al que mejor desempeño que se haya observado en las simulaciones de imágenes.

Como se ha observado, no hay un método que se mostrase como el mejor de todos, ya que de acuerdo a los criterios objetivos de evaluación, por un lado el algoritmo de réplica de pixel ofrece mejores resultados en la mayoría de las pruebas realizadas, esto al no manipular matemáticamente la información pictórica del color y conservar los mismos valores de la imagen original, por su parte los algoritmos con mejores resultados objetivos después del de réplica, fueron los de polinomios de interpolación bicúbica, estos presentan un buen desempeño subjetivo en el alisado de bordes aunque a la vez generan suavizado de imagen.

Entonces, considerando estas observaciones el algoritmo que se eligió para la simulación fue el método de interpolación Bicúbica III al ser el mejor con respecto al Bicúbica I y II según criterios objetivos, además de ser el que menor suavizado presenta de los tres, este algoritmo permite identificar de mejor manera detalles, bordes y signos que en el resto de métodos y que para la simulación que se realizó fue el ideal.

Para la simulación se ha tomó un archivo de video titulado “Traffic\_IP\_camLR” obtenido de la web [44] en la que la escena muestra una calle en la que circula el tráfico vehicular. EL video está en formato MPEG-4 (mp4) siendo uno de los formatos de video digital más comunes y que además está soportado por el software científico elegido, el video cuenta con una duración de 31.0833 segundos y en total posee 746 cuadros corriendo a una tasa de 24 cuadros por segundo a una resolución de 640x360.

La idea es duplicar la resolución del video por medio del algoritmo de interpolación bicúbica III, para lograr una resolución al doble, es decir de 1280x720 correspondiendo con la resolución estándar de un video HD<sup>9</sup>. El esquema que explica este funcionamiento está dado por la Figura 4.1, en donde se muestra el proceso del algoritmo de video, por medio de bloques.

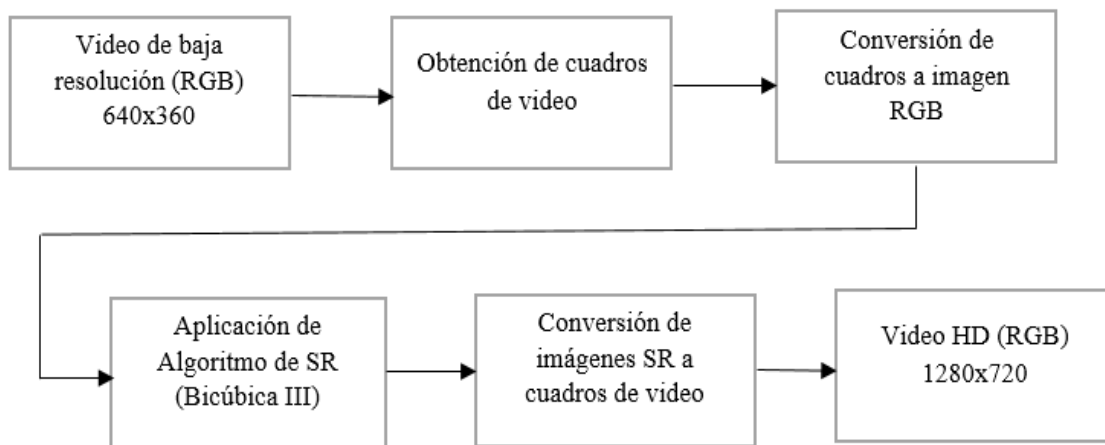


Figura 4. 25 Proceso de creación de video utilizando método de SR en imágenes.

<sup>9</sup> HD: de las siglas en ingles High Definition es un sistema de imagen video y/o sonido para el uso en televisores u otros dispositivos que soporten una resolución de 1280x720 pixeles.

Como se puede apreciar en la Figura 4.1, primero se realizará la lectura del video original el cual está a color, del mismo se extraerán los cuadros y estos se procesarán como una imagen digital por medio del algoritmo de súper resolución, una vez obtenidas las imágenes al doble de resolución de acuerdo al algoritmo, estas serán ordenadas para nuevamente ser almacenadas como una secuencia de cuadros de video, finalmente los cuadros se ordenan para generar el video de SR (en este caso HD) en el mismo formato MPEG-4 que el video original, para que pueda ser reproducido por cualquier dispositivo que soporte la reproducción de este formato de video.

## 4.2 Resultados de SR de video.

Por ultimo de forma subjetiva se muestran las Figuras 4.2 y 4.3 que muestran el cuadro número 300 de los videos “Traffic\_IP\_camLR” y “Traffic\_IP\_camSR” respectivamente, vemos que se realizó un acercamiento para verificar el desempeño del algoritmo en imágenes de video.



Figura 4. 26 Secuencia de cuadro No. 300 de video “Traffic\_IP\_camLR” en baja resolución (SD).



Figura 4. 27 Secuencia de cuadro No. 300 de video “Traffic\_IP\_camSR” en alta resolución (HD).

Como se observa hay una notable mejora en la apreciación de la matrícula del coche en la secuencia del video en HD, siendo más fácilmente el poder leer: A8254S. Además de que la imagen minimiza el efecto de dentado del video original, siendo más apreciable en los faros del vehículo,

Otro cuadro que se seleccionó fue el número 620, de las Figuras 4.4 y 4.5 para los videos en baja resolución y en alta resolución respectivamente, en donde nuevamente al hacer un acercamiento se buscó mejorar la lectura de la matrícula de otro vehículo.



Figura 4. 28 Secuencia de cuadro No. 620 de video Traffic\_IP\_camLR en alta baja resolución (SD).

Como se observa en la figura anterior no es del todo claro la lectura de la matrícula del vehículo plateado, debido al efecto dentado proveniente del video original.



Figura 4. 29 Secuencia de cuadro No. 620 de video Traffic\_IP\_camLR en alta baja resolución (SD).

Sin embargo la secuencia de imagen del video en alta resolución de la Figura 4.5 si permite leer más fácilmente la matrícula del vehículo gracias a la supresión del dentado de los bordes, siendo esta A3K961.

## Capítulo 5

### Conclusiones generales y trabajo a futuro

- Se revisó el estado del arte para conocer que es una imagen digital, los dos tipos de imágenes digitales que existen así como su formato y cómo influye este en las pérdidas de calidad e información al comprimirse, se presentó una breve explicación del procesamiento digital de imágenes, con algunos ejemplos en los que ha favorecido este en el mejoramiento de imágenes digitales.
- Se investigaron los métodos más comunes de súper resolución para entender cómo operan sobre la imagen y con ello identificar sus discrepancias en la manipulación de los píxeles de la imagen.
- Se realizaron las simulaciones correspondientes a cada uno de los métodos previamente seleccionados, tanto para imágenes en escala de grises como a color, y se utilizaron los criterios objetivos de evaluación MAE, PSNR, SSIM y NCD para medir la calidad de los mismos y con ello identificar el mejor desempeño en cada caso.
- Se realizó un análisis comparativo en donde se observó que, algunos métodos ofrecen ventajas de tiempo, otros de rendimiento y otros más de reconocimiento, permitiendo con ello poder identificar con mayor facilidad cual aplicar con base a la necesidad que se tenga.
- Con lo anterior se implementó el método de interpolación Bicúbica III en un algoritmo de video, al resultar el más adecuado para la identificación de detalles finos, en una secuencia de video que nos permitiera una mejor identificación de matrículas vehiculares.

## 5.1 Trabajo a futuro

Realizar la simulación del algoritmo en tiempo real con cámara web y con ello evaluar la posibilidad de realizar la implementación del algoritmo de video en hardware específico DSP.

Implementar los algoritmos en otros lenguajes de programación de manera que puedan utilizarse en otros entornos de programación o bien como aplicación en dispositivos móviles.

## Bibliografía.

- [ 1 ] Diamani, E.; Dipanda, A.; Kokou, Y., et al. (2008). *Signal Processing for Image Enhancement and Multimedia Processing*. New York, USA: Springer.
- [ 2 ] Bovik, A. (2000). *Handbook of Image and Video Processing*. Austin Texas, USA: Academic Press.
- [ 3 ] Milanfar, P. (2011). *Super-Resolution Imaging*. Florida, USA: CRC Press.
- [ 4 ] Lopez, R.; Marzal, J.; Gómez, F. (2005). *El análisis de la imagen fotográfica*. Castelló de la Plana: Universitat Jaume I.
- [ 5 ] Alcalá, J. R.; Navarro, G. (2008). *Una introducción a la imagen digital y su tratamiento*. Cuenca: MIDECIANT.
- [ 6 ] Gonzales, R. C.; Woods, R. E. (2007). *Digital Image Processing*. (2ª ed.). (s.e): Prentice Hall.
- [ 7 ] Schulte, S. (2007). *Fuzzy and Nonlinear Restoration and Analysis Techniques for Digital Images*. Universiteit Gent.
- [ 8 ] Vollnhals, O. (1996). *Multilingual dictionary of electronic publishing*. Italy: Saur.
- [ 9 ] Publicaciones Vertice. (2008). *Tratamiento de la fotografía digital*. Malaga, España: Vertice.
- [ 10 ] Gatter, M. (2005). *Listo para imprenta, como llevar los proyectos de la pantalla al papel*. (2ª ed.). Barcelona, España: Index Book.
- [ 11 ] McAndrew, A. (2004). *An Introduction to Digital Image with MATLAB*. Melbourne, Australia: Victoria University of Technology.
- [ 12 ] Lubian, Y. (2014). *Digitalización y Captura de Imágenes fotográficas ARPG0110*. Malaga, España: IC Editorial.
- [ 13 ] Subhasis, C. (2000). *Super Resolution Imaging*. Bombay, India: Kluwer Academic Publishers.
- [ 14 ] Nixon, M. S.; Aguado, A. S. (2002). *Feature Extraction and Image Processing*. Great, Britain: Newnes.

- [ 15 ] Moler, C. B. (2004). *Numerical Computing with MATLAB*. USA: s.i.a.m.
- [ 16 ] Esqueda, J. J.; Palafox, L. E. (2005). *Fundamentos de Procesamiento de Imágenes*. B. C., México: UABC.
- [ 17 ] Bakker, E. M.; Huang, T. S.; Lew, M. S., et al. (2003). *Image and Video Retrieval*. USA: Springer.
- [ 18 ] Lira, J. (2010). *Tratamiento Digital de Imágenes Multiespectrales*. (2<sup>a</sup> ed.). Mexico DF. México: UNAM.
- [ 19 ] Chaudhuri, S. (2001). *Super resolution Imaging Hingham*. USA: Kluwer Academic Publishers.
- [ 20 ] Russ, J. C. (2011). *The Image Processing Handbook*. (6<sup>a</sup> ed.). University North Carolina State, USA: CRC Press.
- [ 21 ] The Math Works Inc. (1997). *Image Processing Toolbox for use with MATLAB*. USA: Mathworks Inc.
- [ 22 ] Hahn, B.; Valentine, D. T. (2007). *Essential MATLAB for Engineers and Scientists*. (3<sup>a</sup> ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [ 23 ] Gonzales, R.; Woods, R.; Eddins, S. (2004). *Digital Image Processing using MATLAB*. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
- [ 24 ] Bovik, A. (2000). *Handbook of Image and Video Processing*. San Diego CA: Academic Press
- [ 25 ] Astola, J.; Kousmanen, P. (1997). *fundamentals of Nonlinear Digital filtering*. Boca Ratón NY: CRC Press.
- [ 26 ] Hore, A.; Ziou, D. (2010) Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM, Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on , vol., no., pp.2366,2369, 23-26.
- [ 27 ] Manuel, K.; Lopez, J. A. (2003). *Ampliación mejorada de imágenes digitales por computadora*. Tesis de licenciatura. Facultad de ingeniería, Universidad Don Bosco.

- [ 28 ] Gomeztagle, F. (2010). *Algoritmos para súper resolución en imágenes y video*. Tesis de Doctorado. IPN
- [ 29 ] Brown, A.; Malden, E.; Kugelmas, M.; Kortz, E. (2014). Diagnosis of pancreatic duct-portal vein fistula; a case report and review of the literature. *Intervetional Radiology*, 8, pp 31-38.
- [ 30 ] Keys, R. (1981) Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-29, No.6, December 1981, p. 1155.
- [ 31 ] Wang, Z.; Conrad B. A.; H. Rahim.; Simoncelli, E. /2004) Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity *IEEE Transaction On Image Processing*, vol. 13, no. 4.
- [ 32 ] Barreto, S. (s. f). “Transformaciones Geométricas Sobre Imágenes Digitales”. Consultado el 15 de Octubre de 2015. Disponible en <http://www.alammi.info/2congreso/memorias/Documentos/martes/TRANSFORMGEOMETRICAS.pdf>
- [ 33 ] NASA. (2015). “New Horizons”. En *Nasa*. Consultado el 12 de Noviembre de 2015. Disponible en [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/newhorizons/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html)
- [ 34 ] Contenido. (2011). “Programa Bicentenario Ciudad segura”. En *Contenido*. Consultado 12 de Noviembre de 2015. Disponible en <http://contenido.com.mx/2011/09/gdf-opera-programa-bicentenario-ciudad-segura/>
- [ 35 ] Fotonostra. (2015). “Archivos de imagen digital”. En *FotoNostra*. Consultado 13 de Mayo de 2015. Disponible en <http://www.fotonostra.com/digital/archivodigital.htm>
- [ 36 ] Images Database. (s, f) “Set de imágenes estándar 1”. En *University of Texas*. Consultado 6 de Junio de 2015. Disponible en <http://www.cs.utexas.edu/~grauman/courses/spring2008/datasets.htm>
- [ 37 ] Images Database. (s, f) “Set de imágenes estándar 2”. En *CVonline*. Consultado 6 de Junio de 2015. Disponible en <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/Imagedbase.htm>

- [ 38 ] Images Database. (s, f) “Set de imágenes estándar 3”. En chenlab. Consultado 6 de Junio de 2015. Disponible en <http://chenlab.ece.cornell.edu/people/Andy/ImagesOfGroups.html>
- [ 39 ] Imágenes Médicas. (s, f). “Set de Imágenes Médicas 1” en Cornell. Consultado 7 de Junio de 2015. Disponible en <http://www.via.cornell.edu/databases/>
- [ 40 ] Imágenes Médicas. (s, f). “Set de Imágenes Médicas 2” en ece. Consultado el 7 de Junio de 2015. Disponible en <http://www.ece.ncsu.edu/imaging/Archives/ImageDataBase/Medical/>
- [ 41 ] Imágenes Médicas. (s, f). “Set de Imágenes Médicas 3” en Google Consultado el 7 de Junio de 2015. Disponible en [www.google.com](http://www.google.com).
- [ 42 ] Imágenes Médicas. (s, f). “Set de Imágenes Médicas 4” en Google Consultado el 7 de Junio de 2015. Disponible en <http://www.gastrointestinalatlas.com/>
- [ 43 ] Imágenes Varias. (s,f) “set de imágenes estándar, satelitales, biológicas, tráfico”. En Imagen Processing Place. Consultado 12 de Junio de 2015. Disponible en [http://www.imageprocessingplace.com/root\\_files\\_V3/image\\_databases.htm](http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm)
- [ 44 ] Video de Trafico vial. (s,f) ”Archivo de video para la simulación” Consultado el 24 de Octubre de 2015. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=Gr0HpDM8Ki8>

## Apéndice

Sección en la que se presentan los resultados de los métodos de súper resolución de imágenes en escala de grises y a color de los grupos:

- Imágenes Estándar.
- Imágenes Satelitales.
- Imágenes Médicas.
- Imágenes de Tráfico.

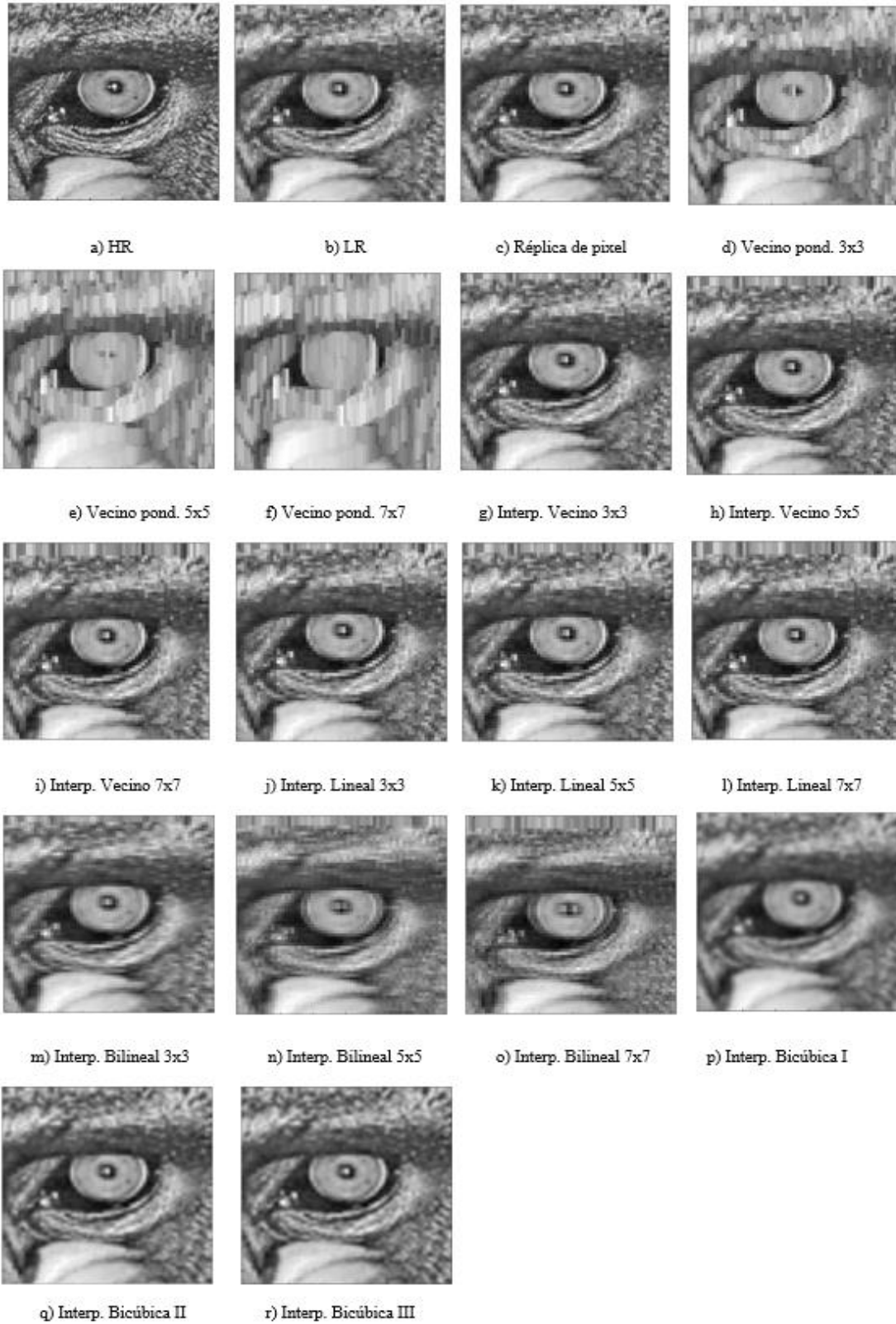


Figura A 1 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Baboon” en escala de grises.

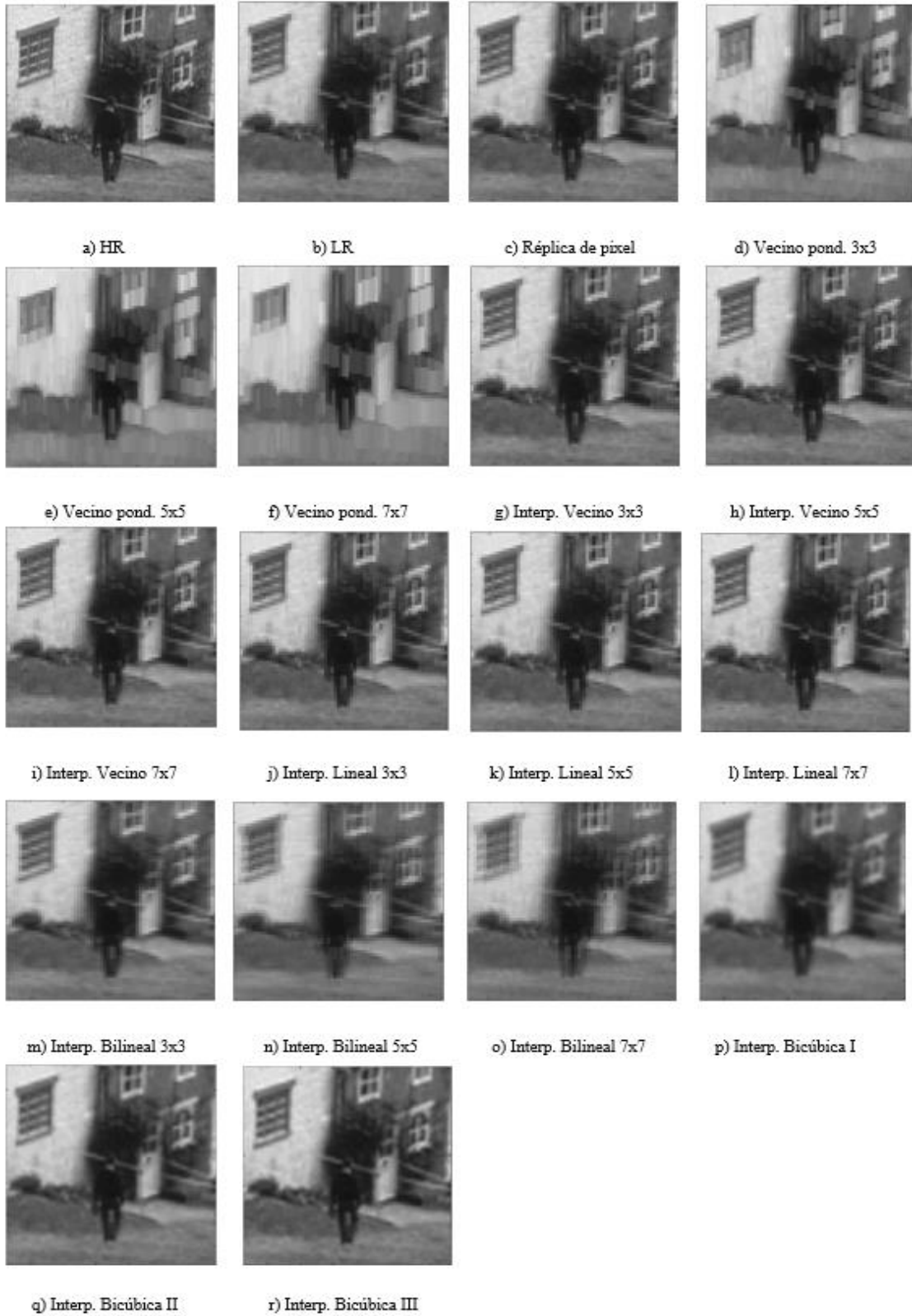


Figura A 2 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Goldhill” en escala de grises.



Figura A 3 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Barbara” en escala de grises.

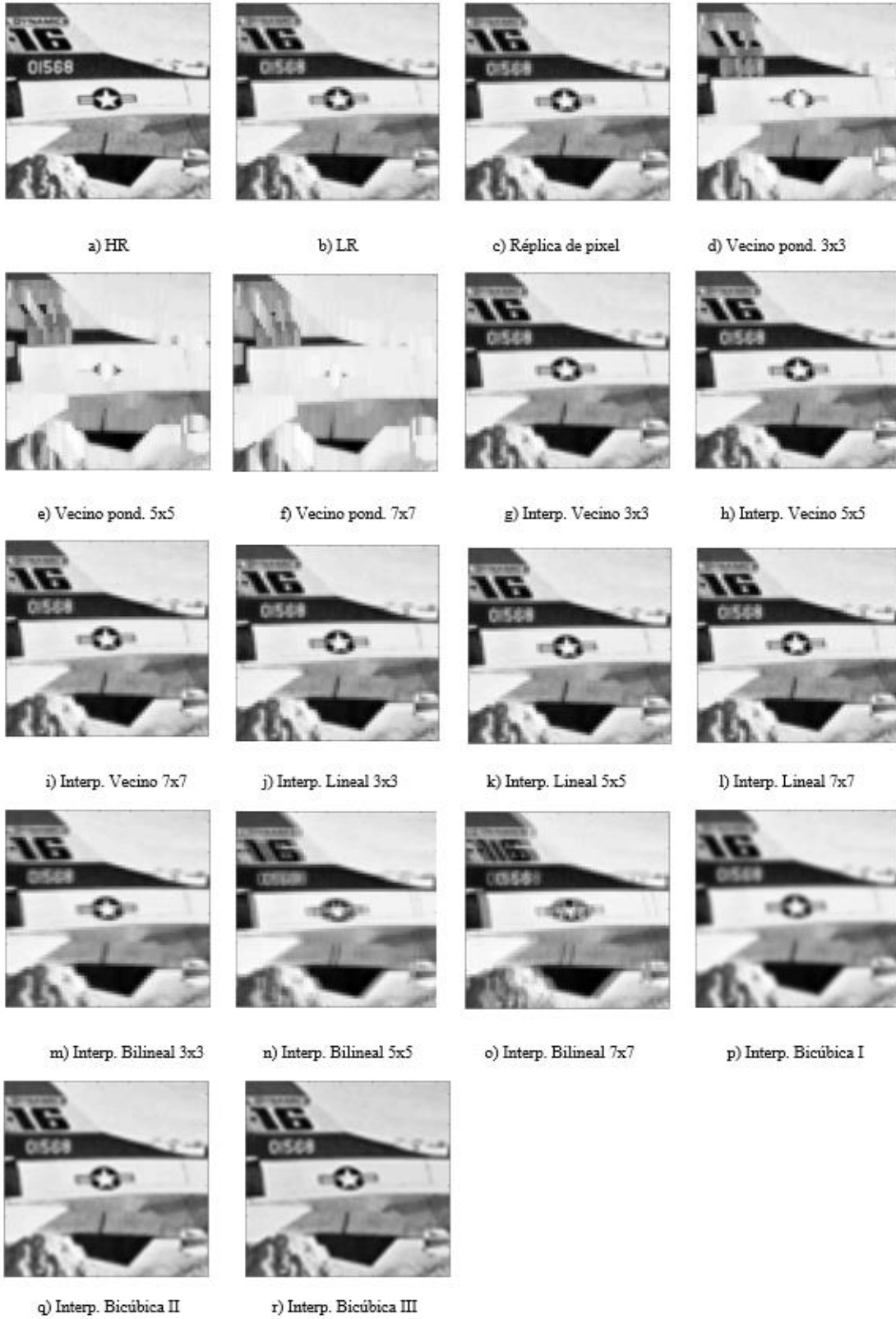


Figura A 4 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “JetPlane” en escala de grises.

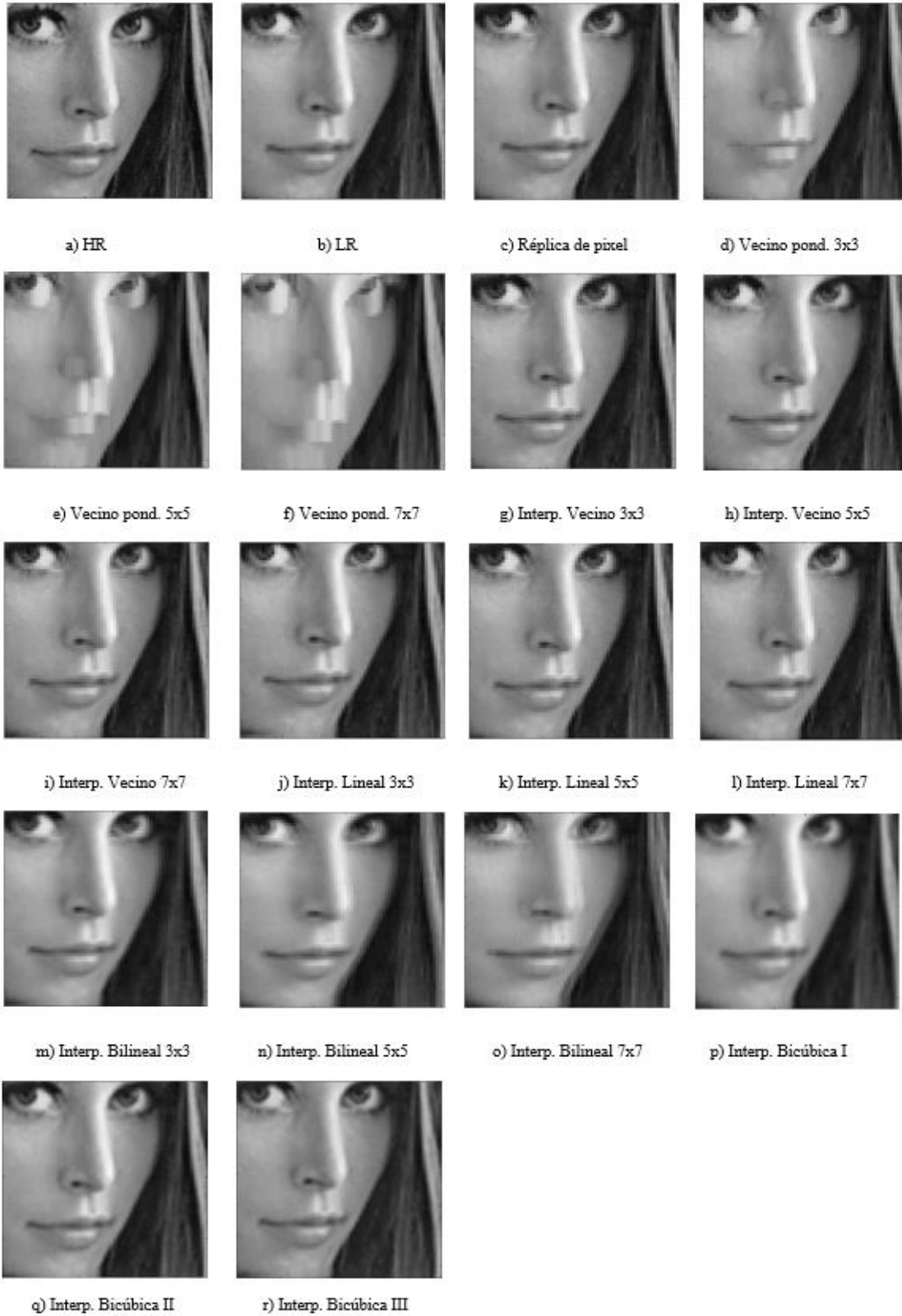


Figura A 5 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Lena” en escala de grises.

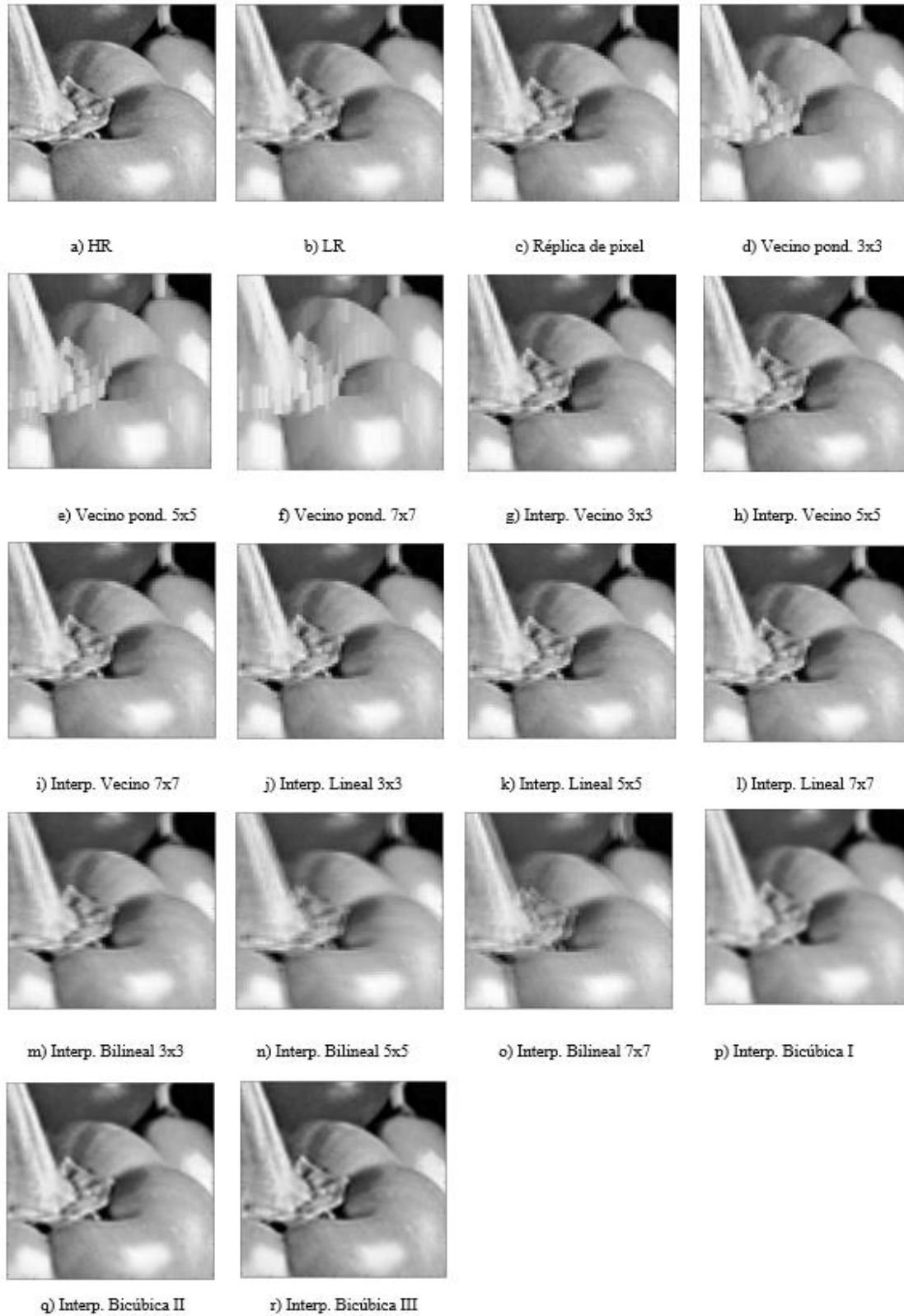


Figura A 6 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Peppers” en escala de grises.

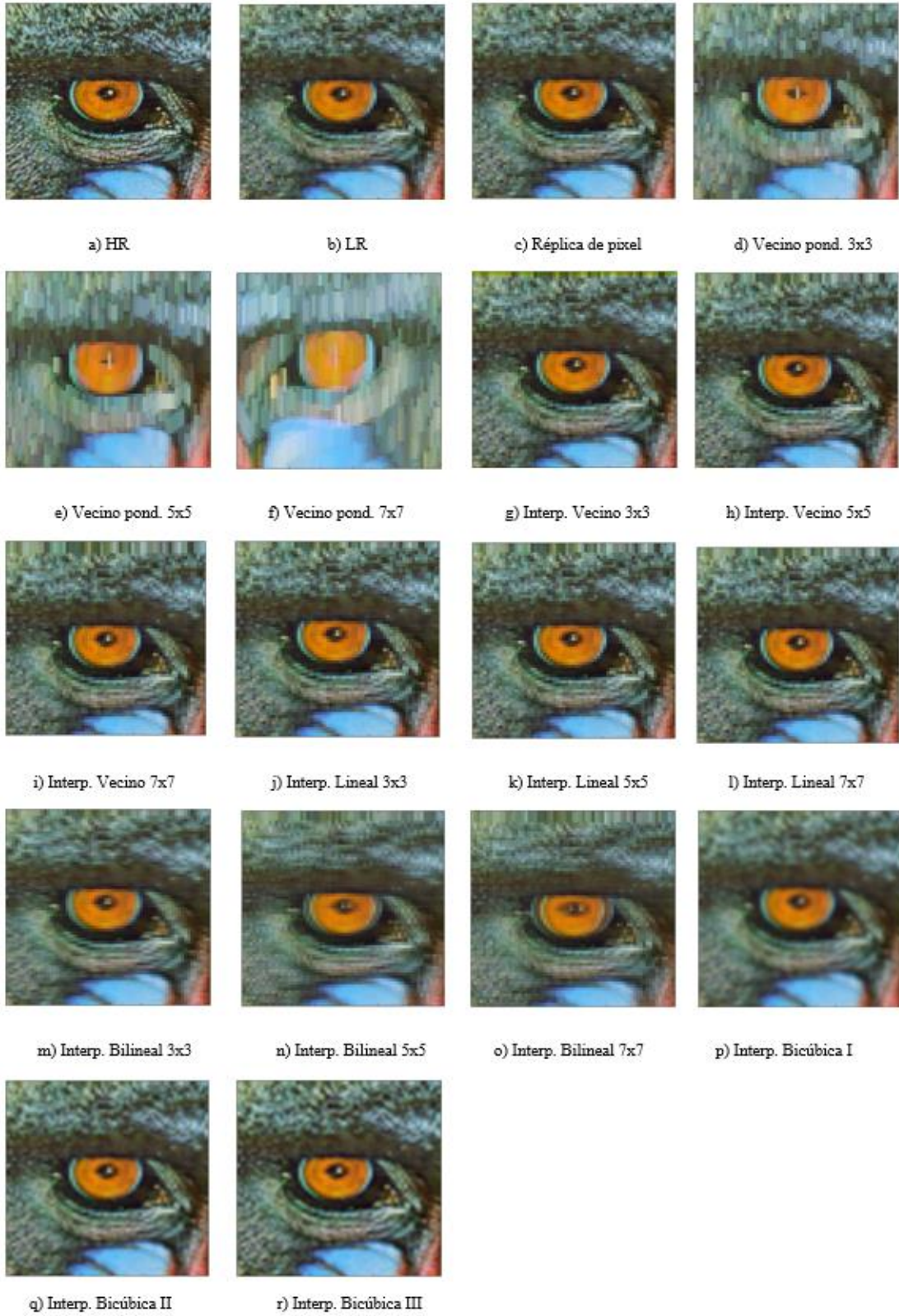


Figura A 7 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Baboon” a color.

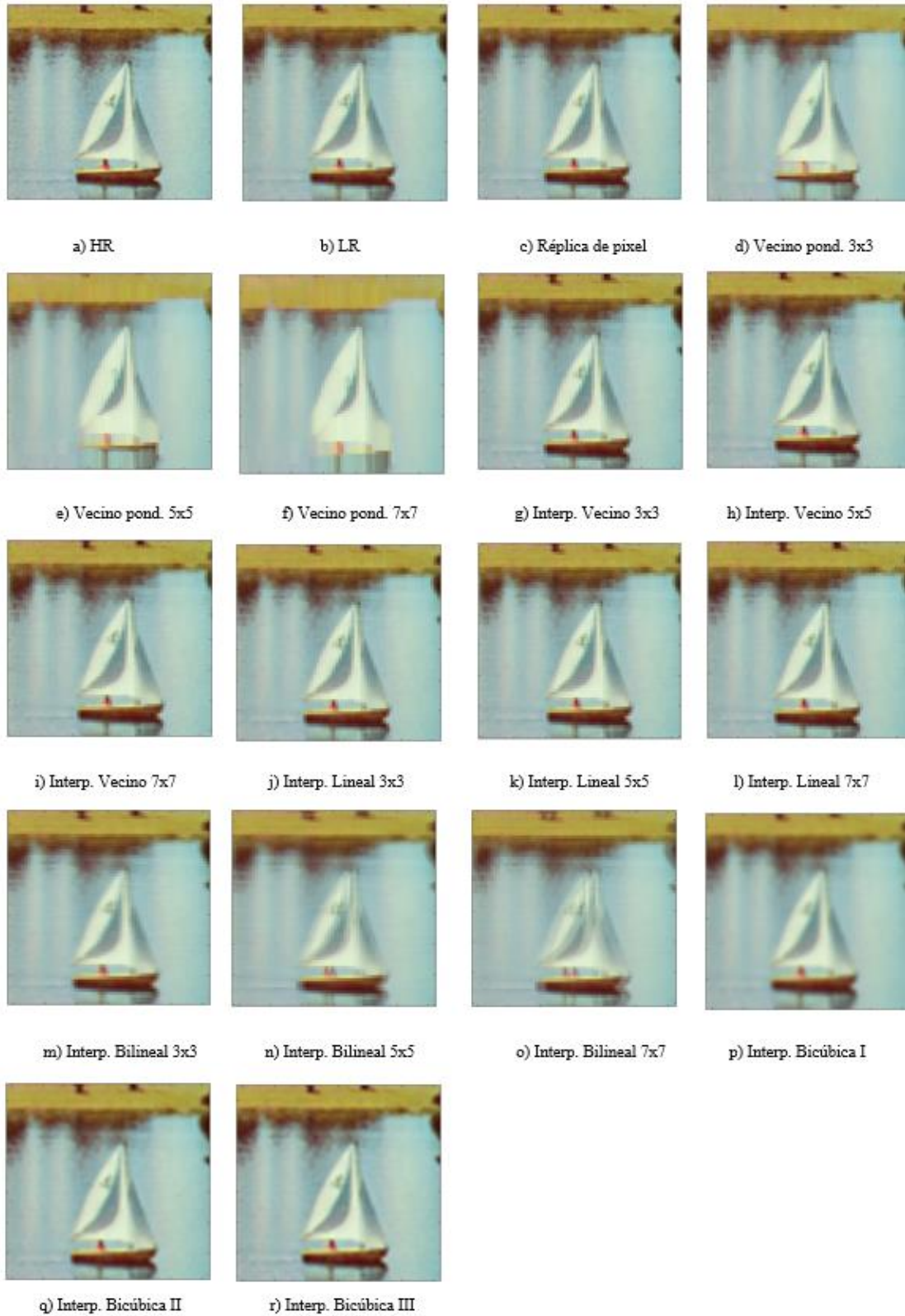


Figura A 8 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Sailboat” a color.

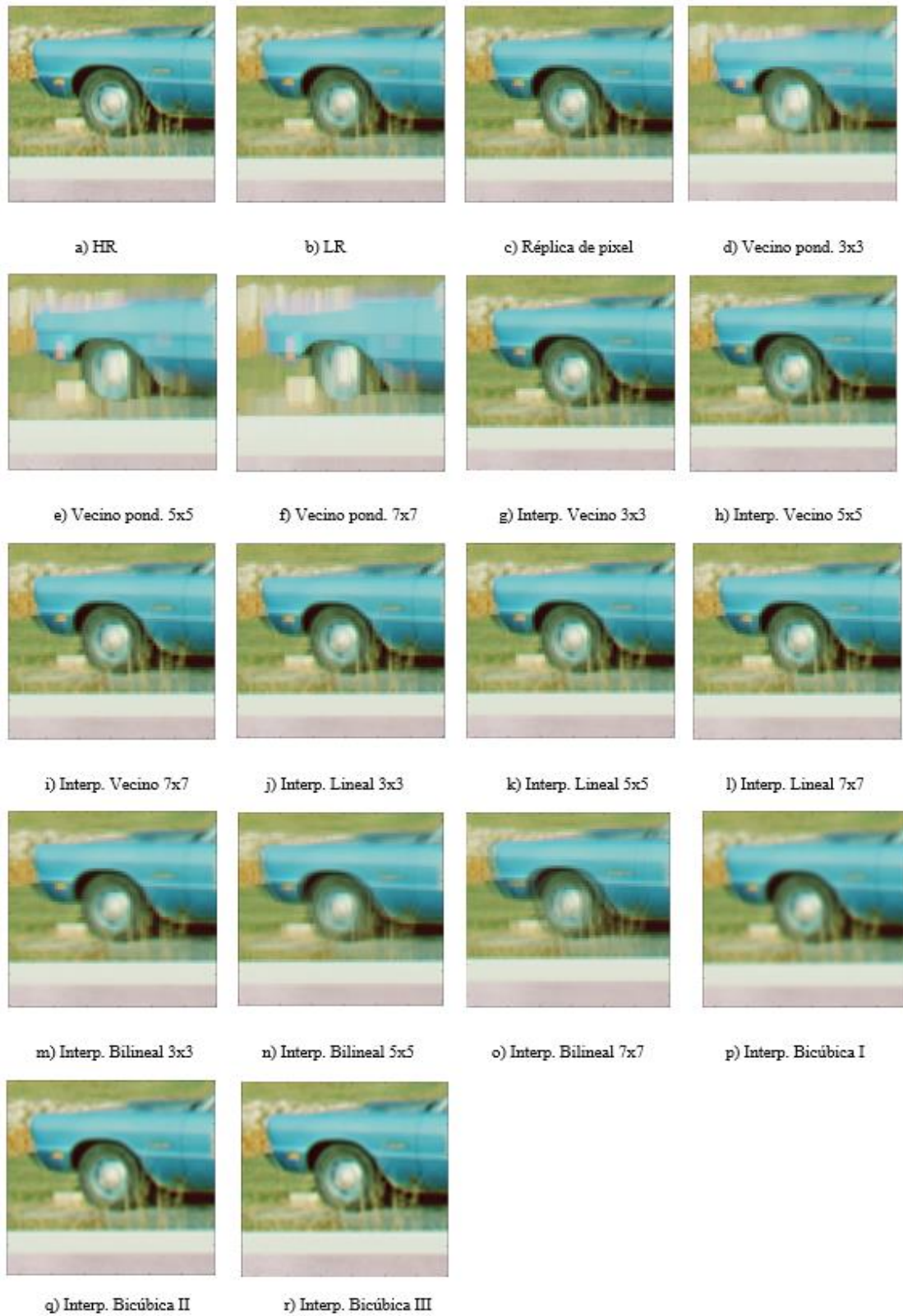


Figura A 9 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “House” a color.

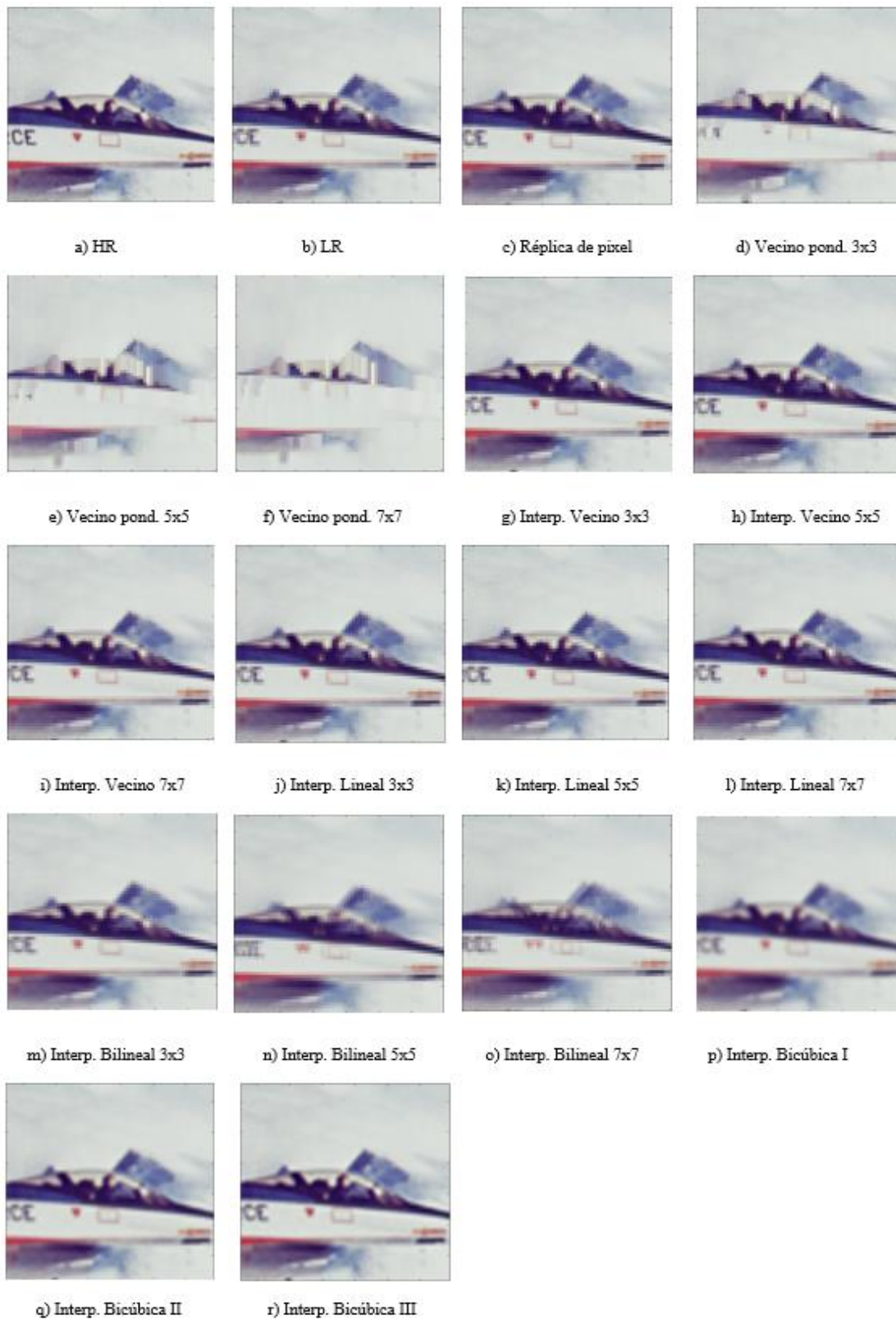


Figura A 10 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “JetPlane” a color.

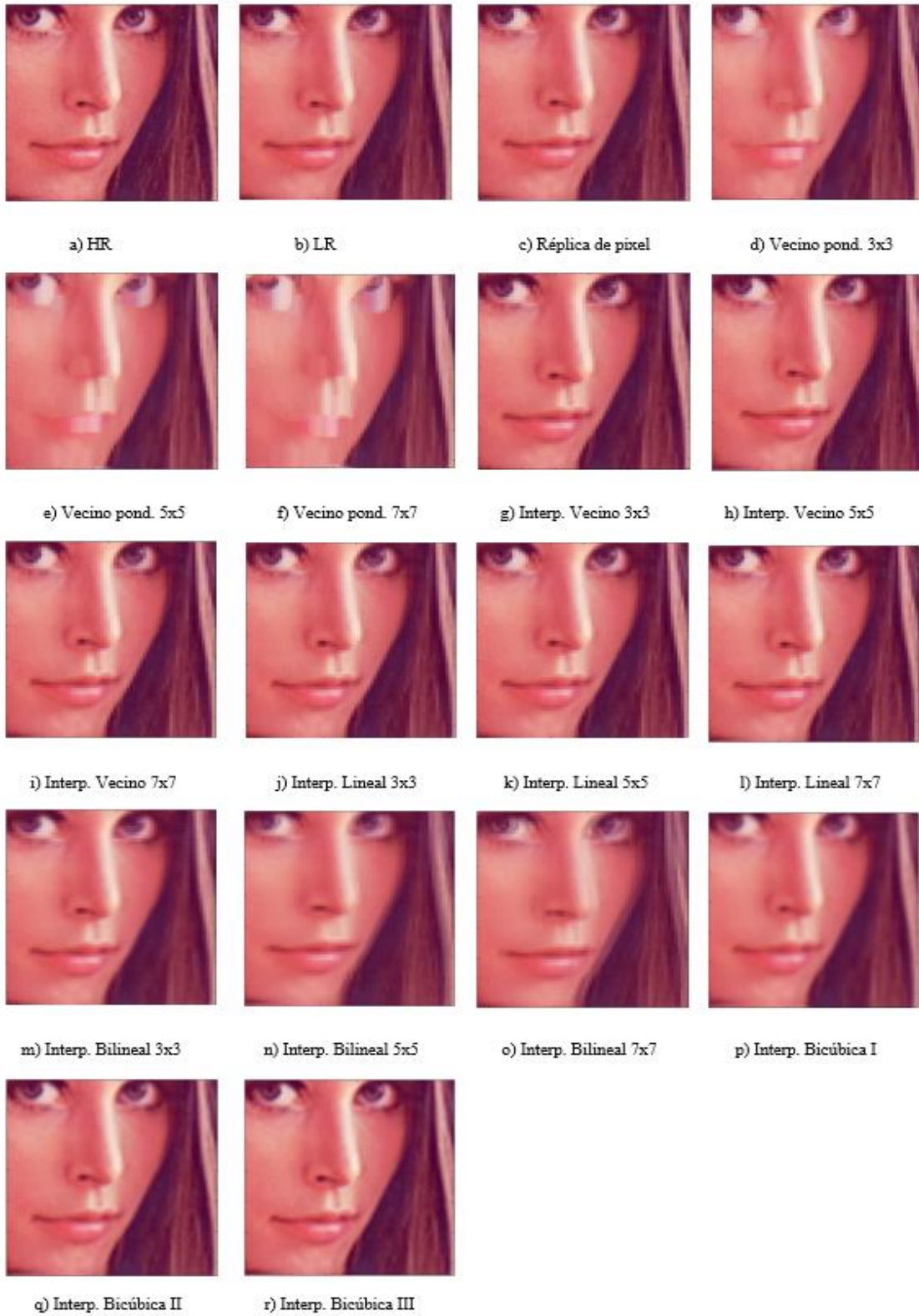


Figura A 11 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Lena” a color.

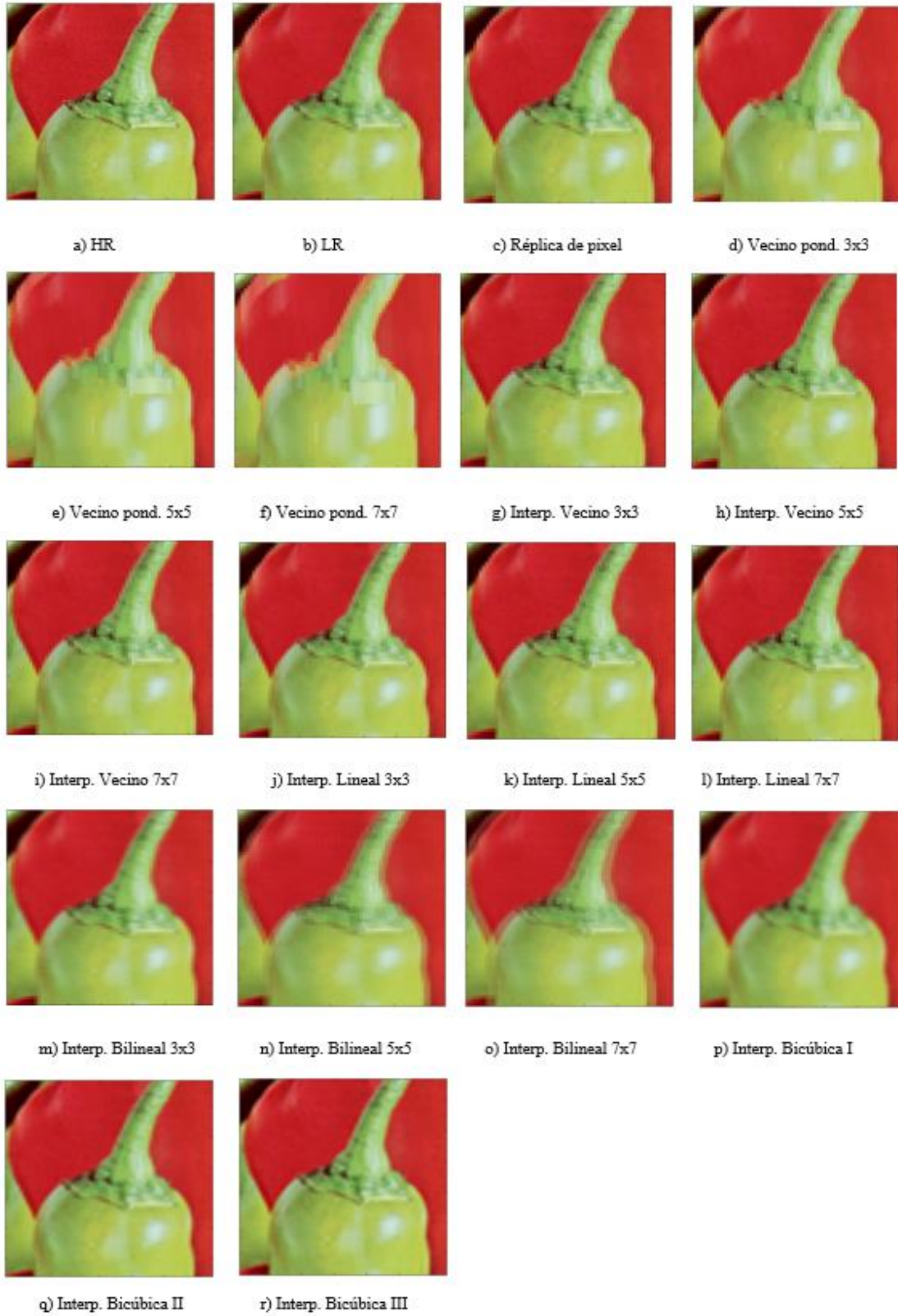


Figura A 12 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Peppers” a color.

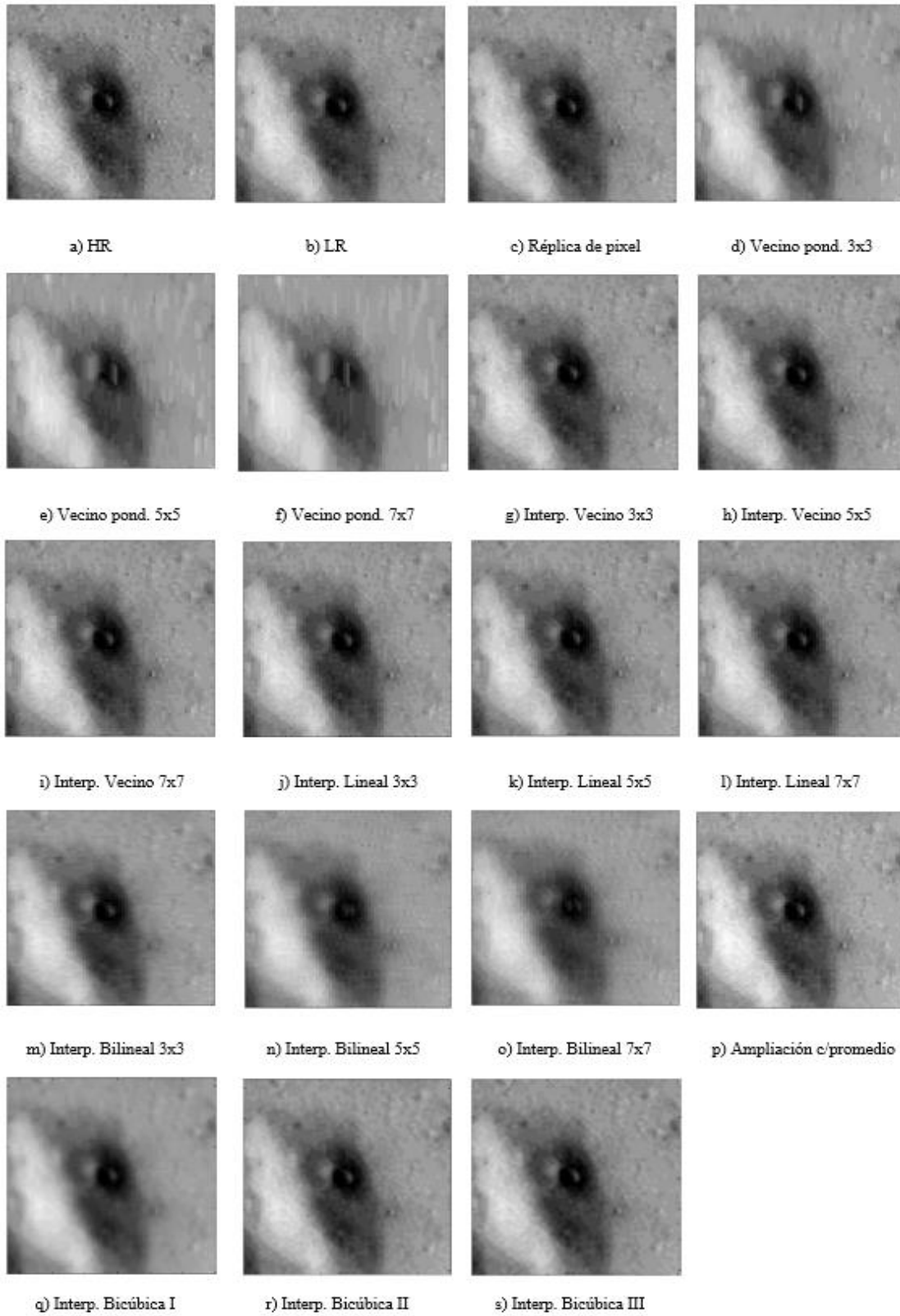


Figura A 13 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite01” en escala de grises.

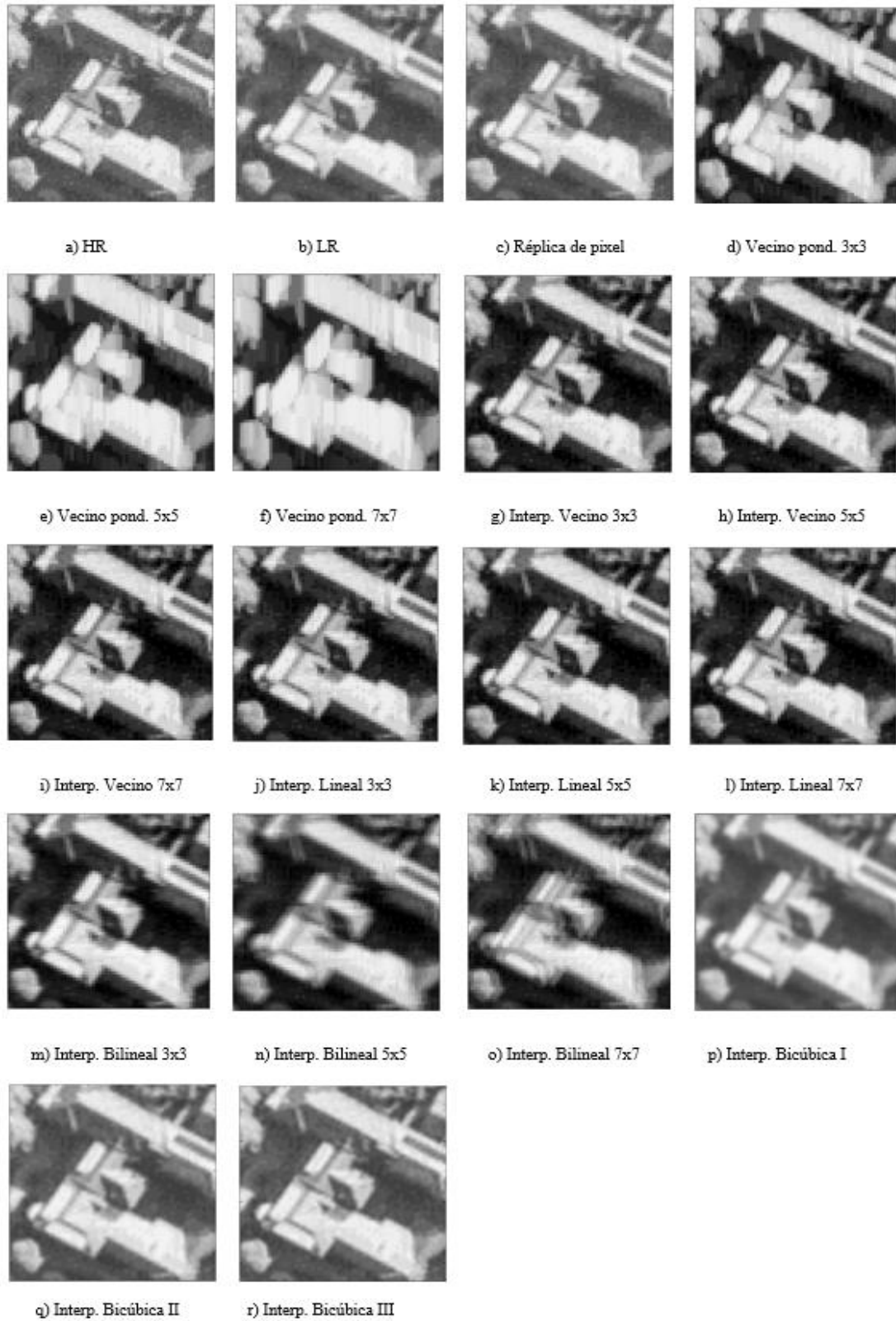


Figura A 14 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite02” en escala de grises.

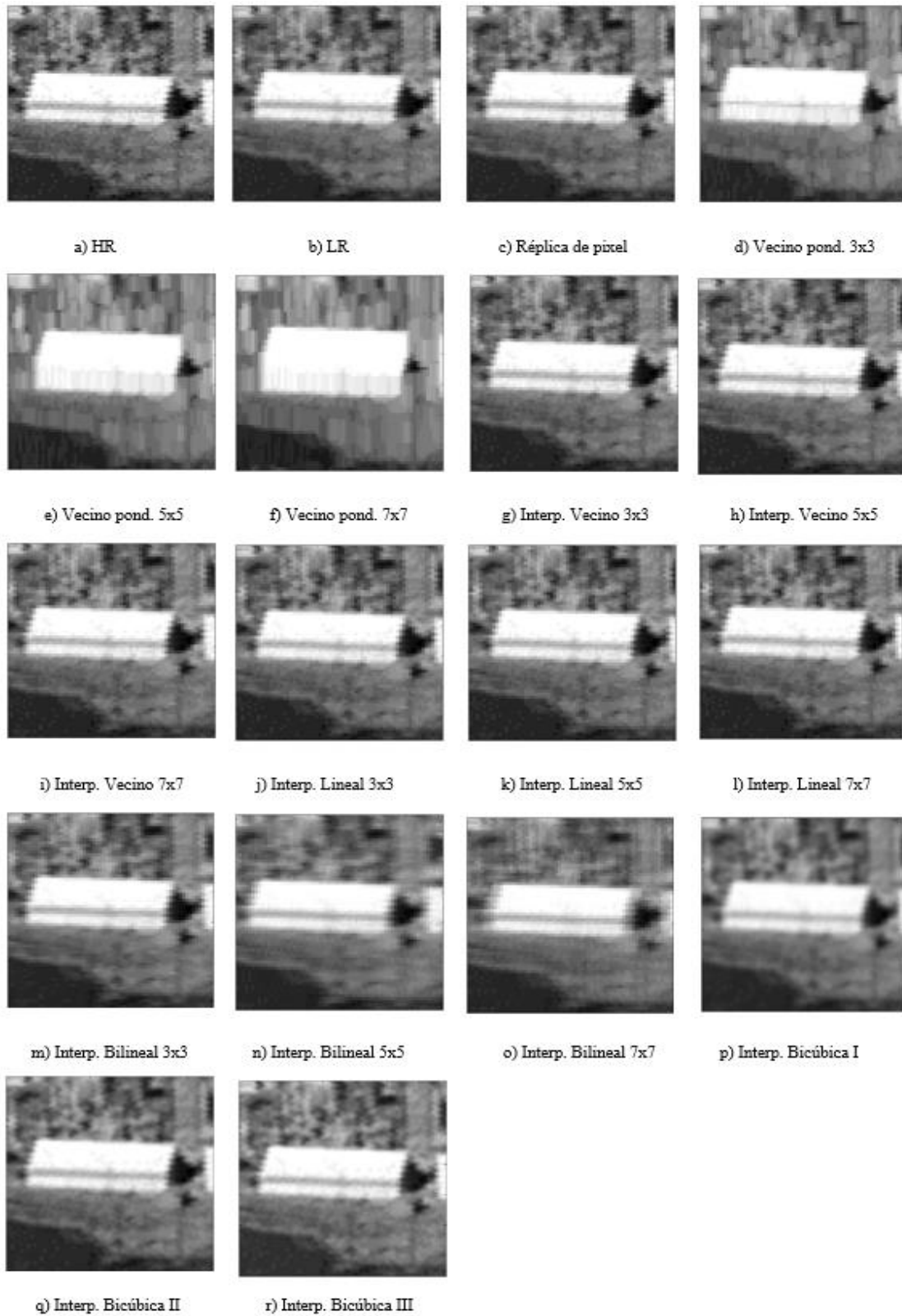


Figura A 15 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite03” en escala de grises.

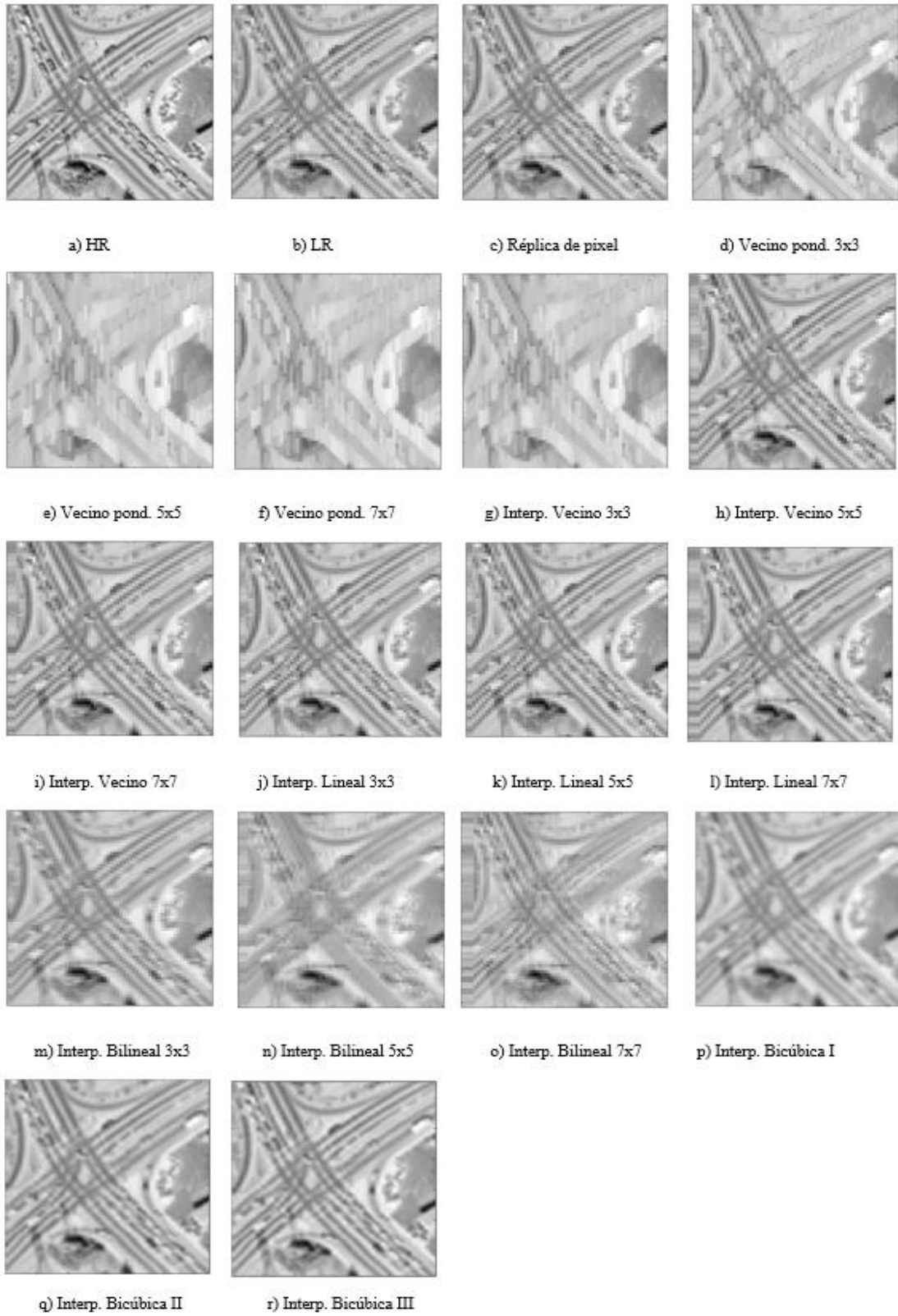


Figura A 16 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite04” en escala de grises.

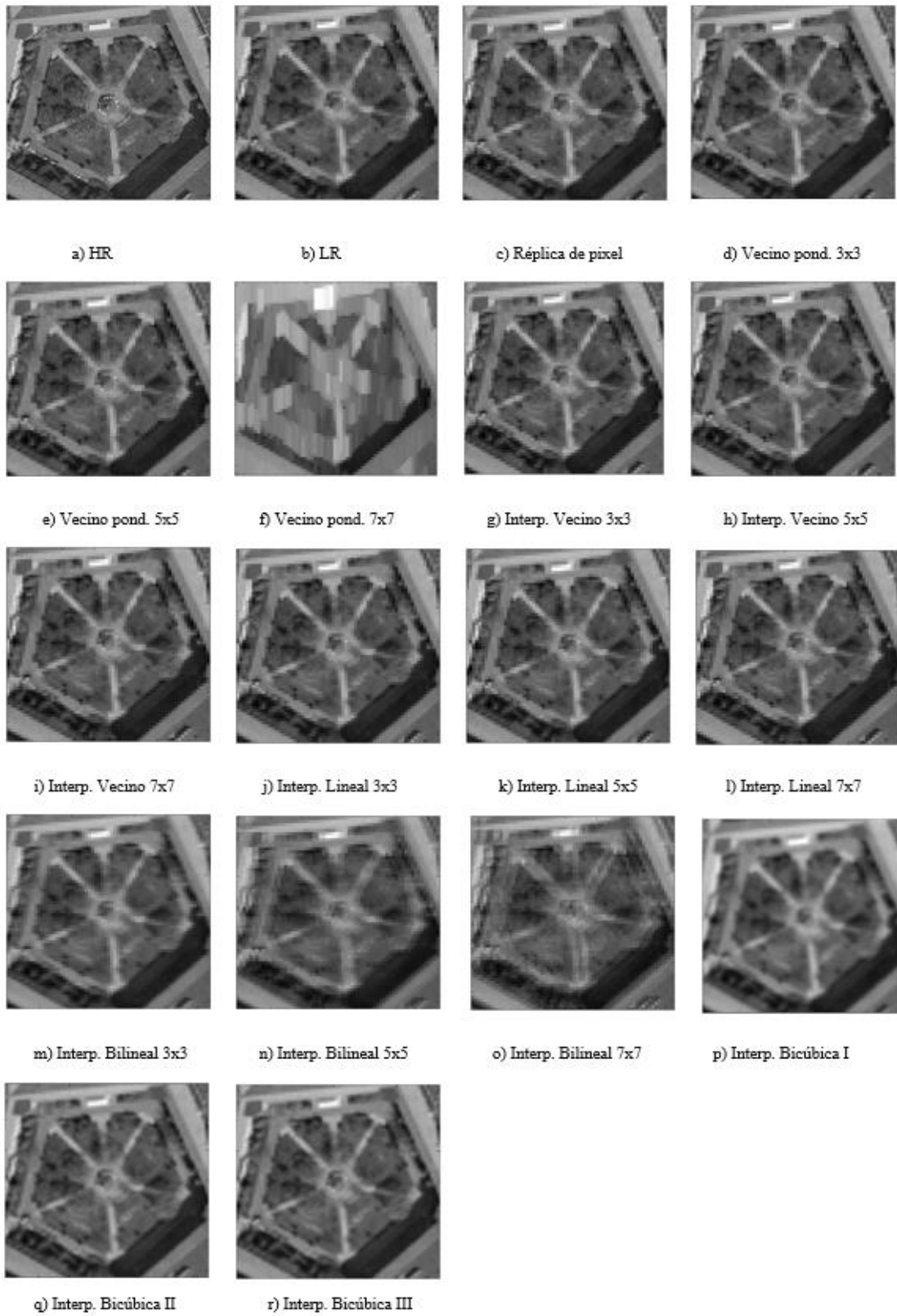


Figura A 17 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite05” en escala de grises.

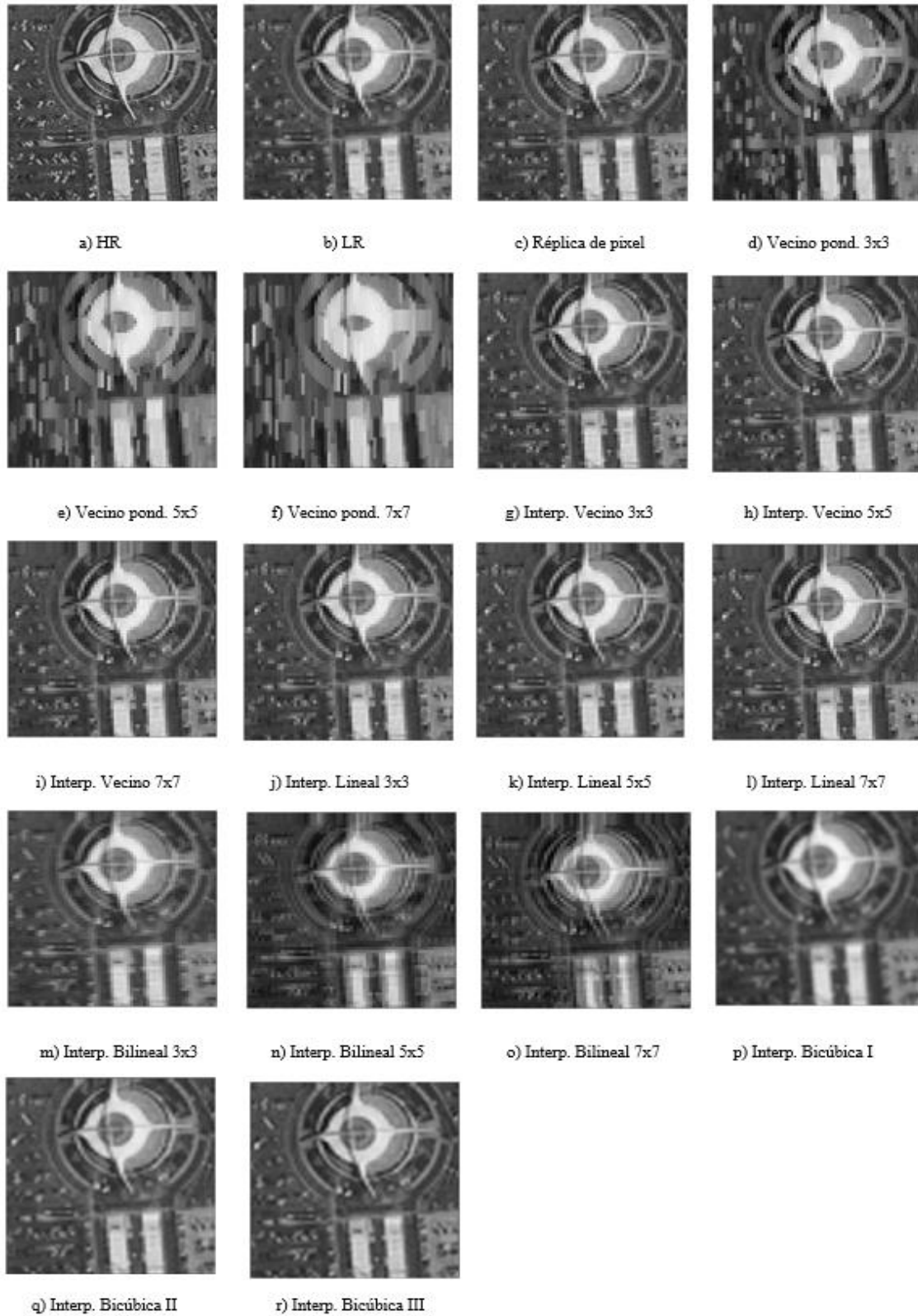


Figura A 18 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite06” en escala de grises.

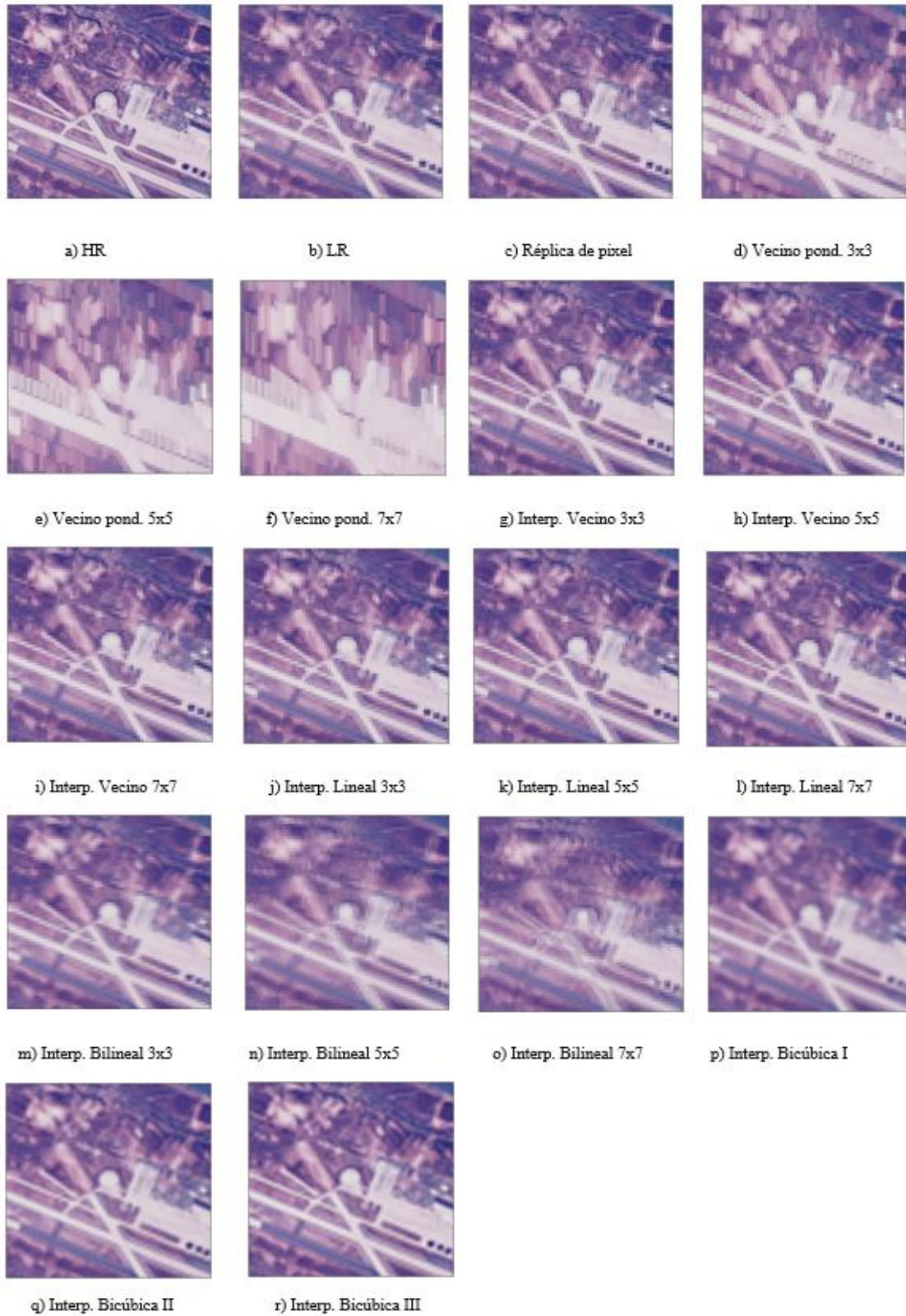


Figura A 19 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite07” a color.

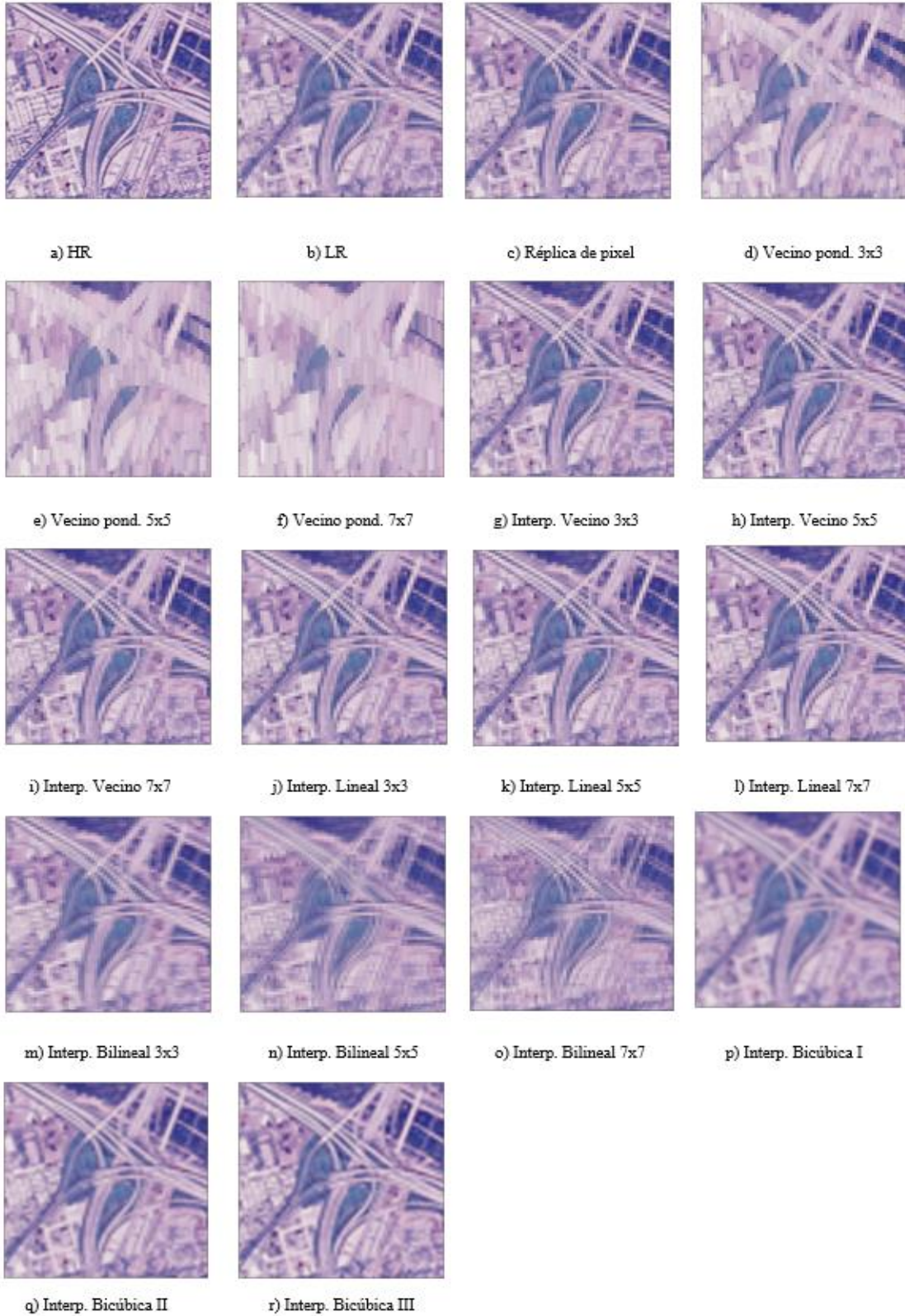


Figura A 20 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite08” a color.

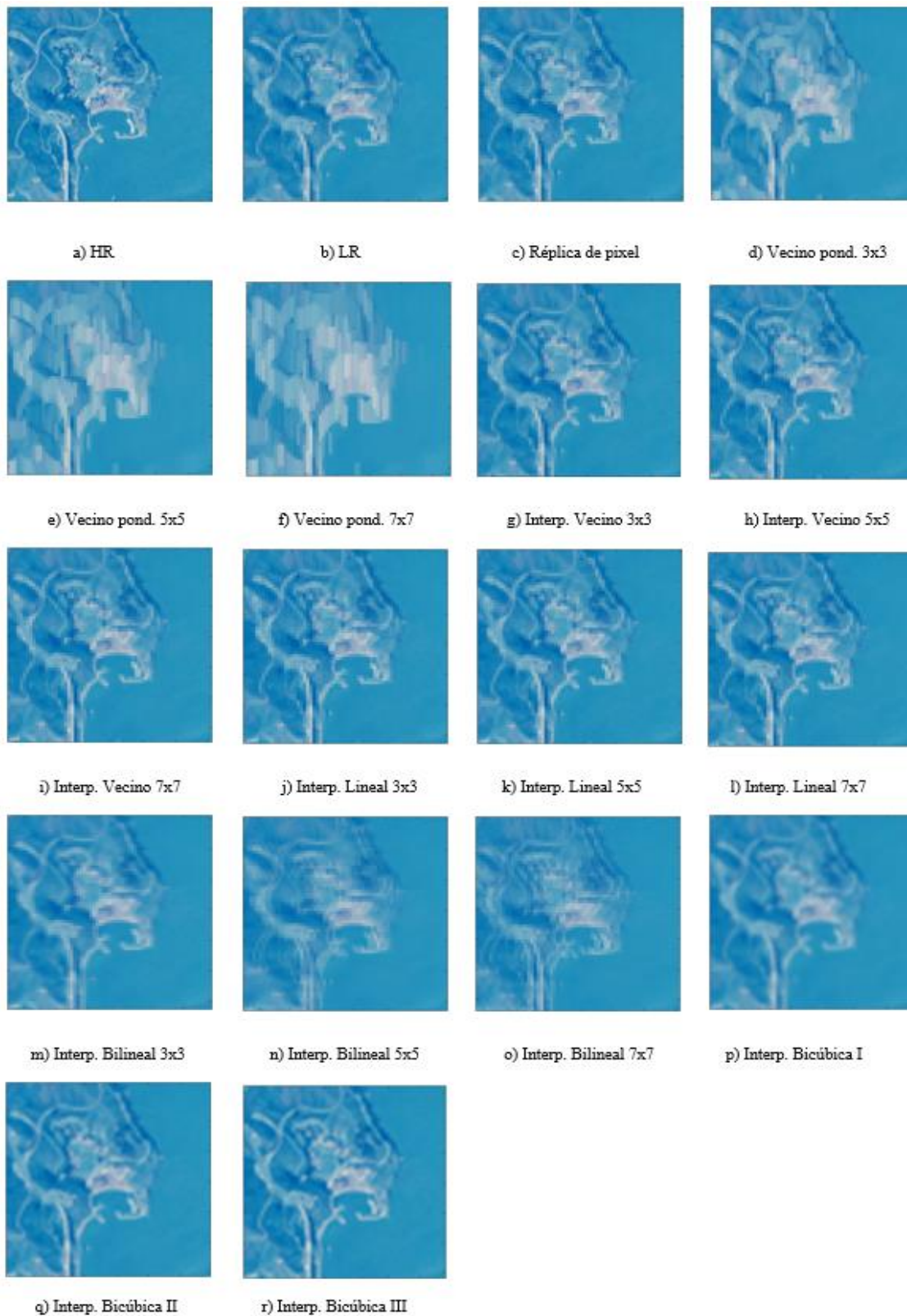


Figura A 21 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite09” a color.

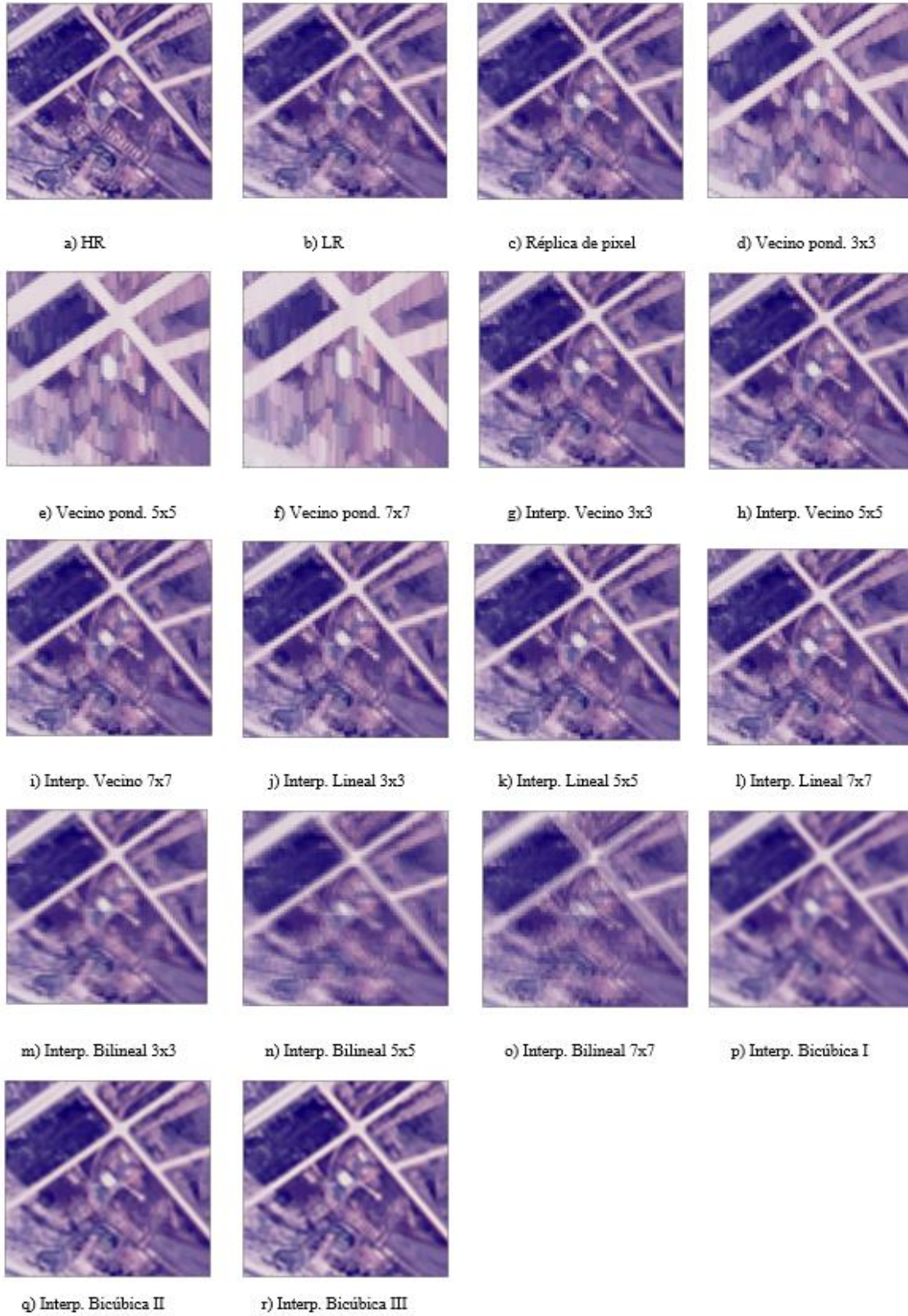


Figura A 22 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite10” a color.

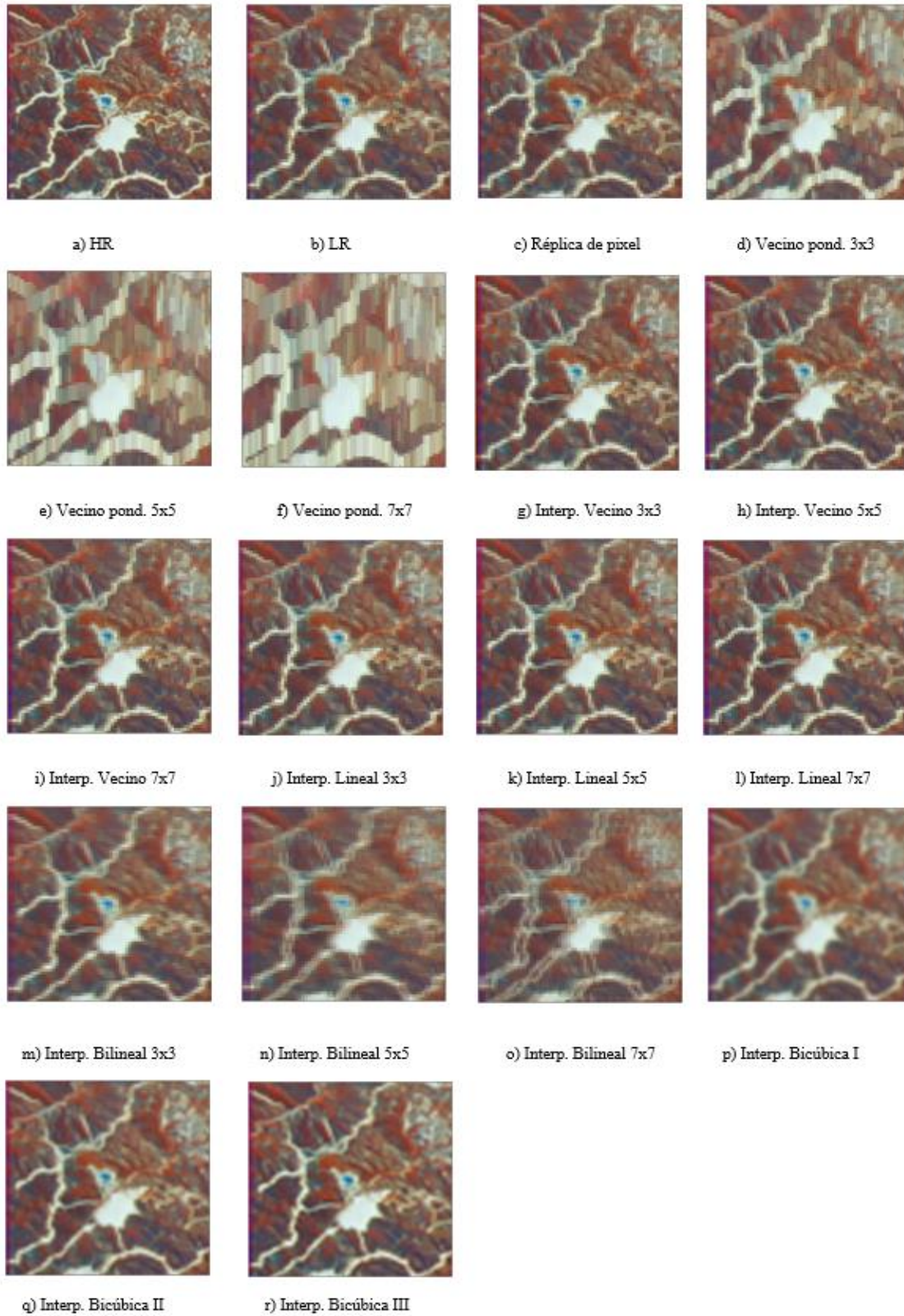


Figura A 23 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite11” a color.

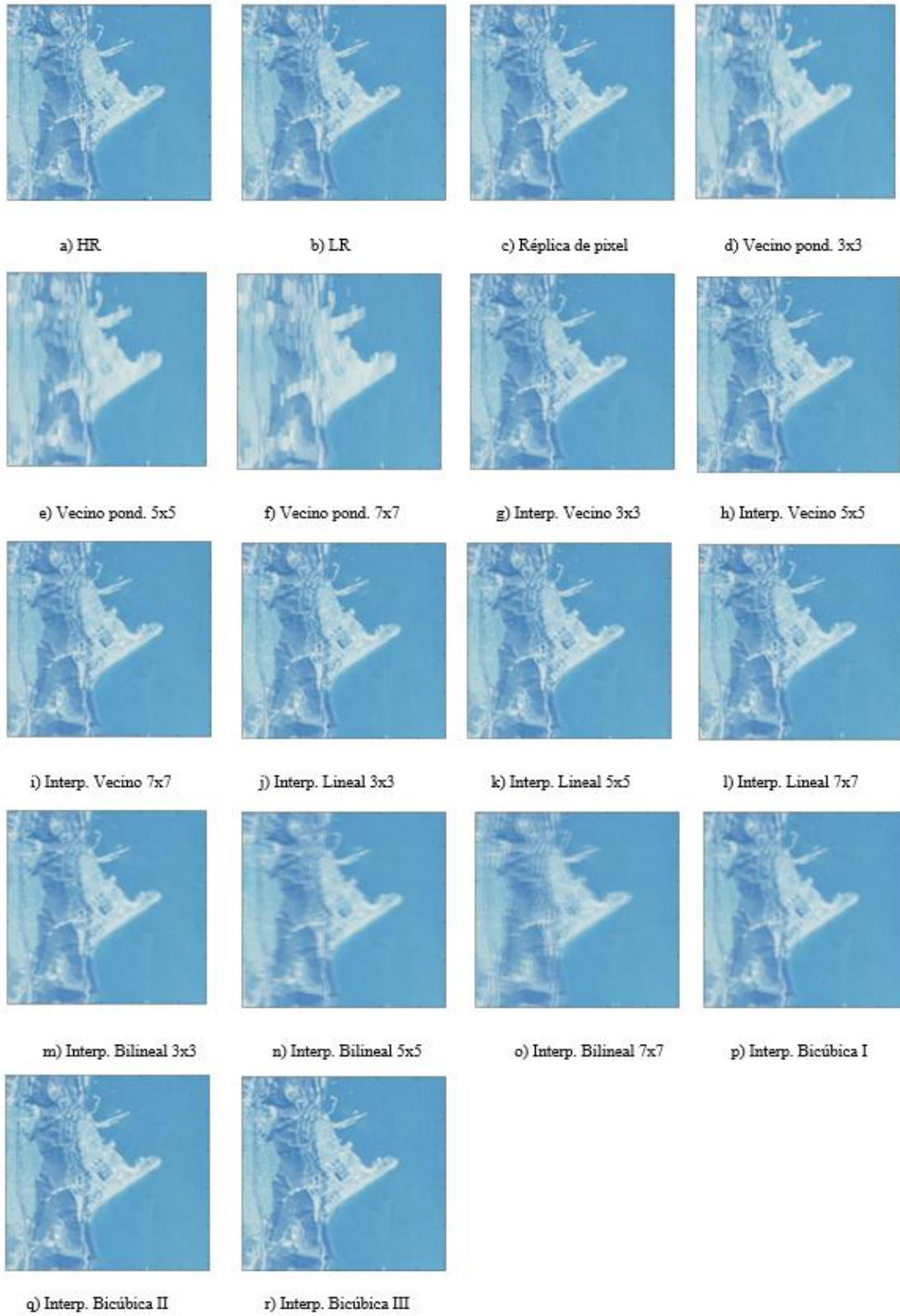


Figura A 24 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Satelite12” a color.

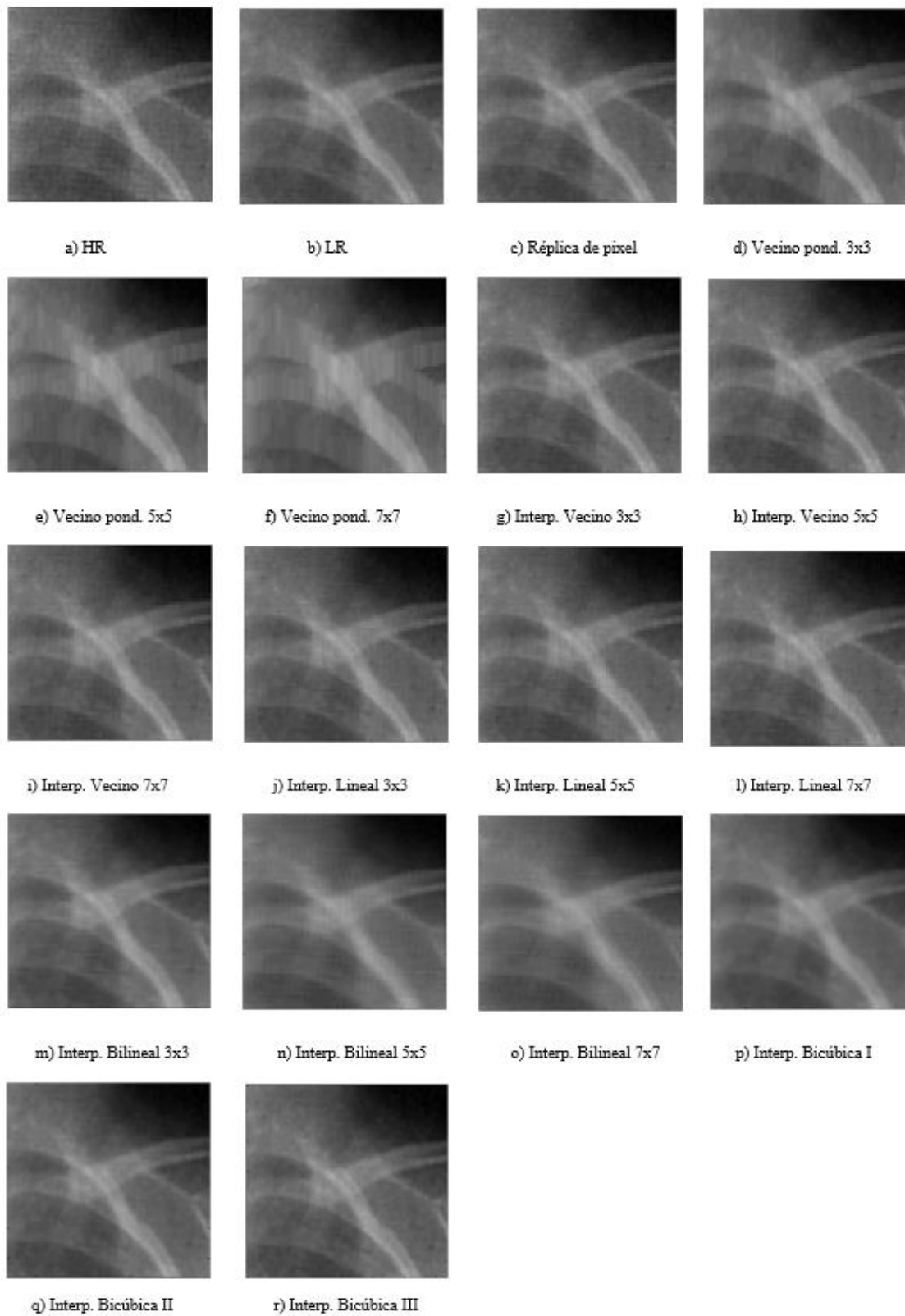


Figura A 25 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica01” en escala de grises.

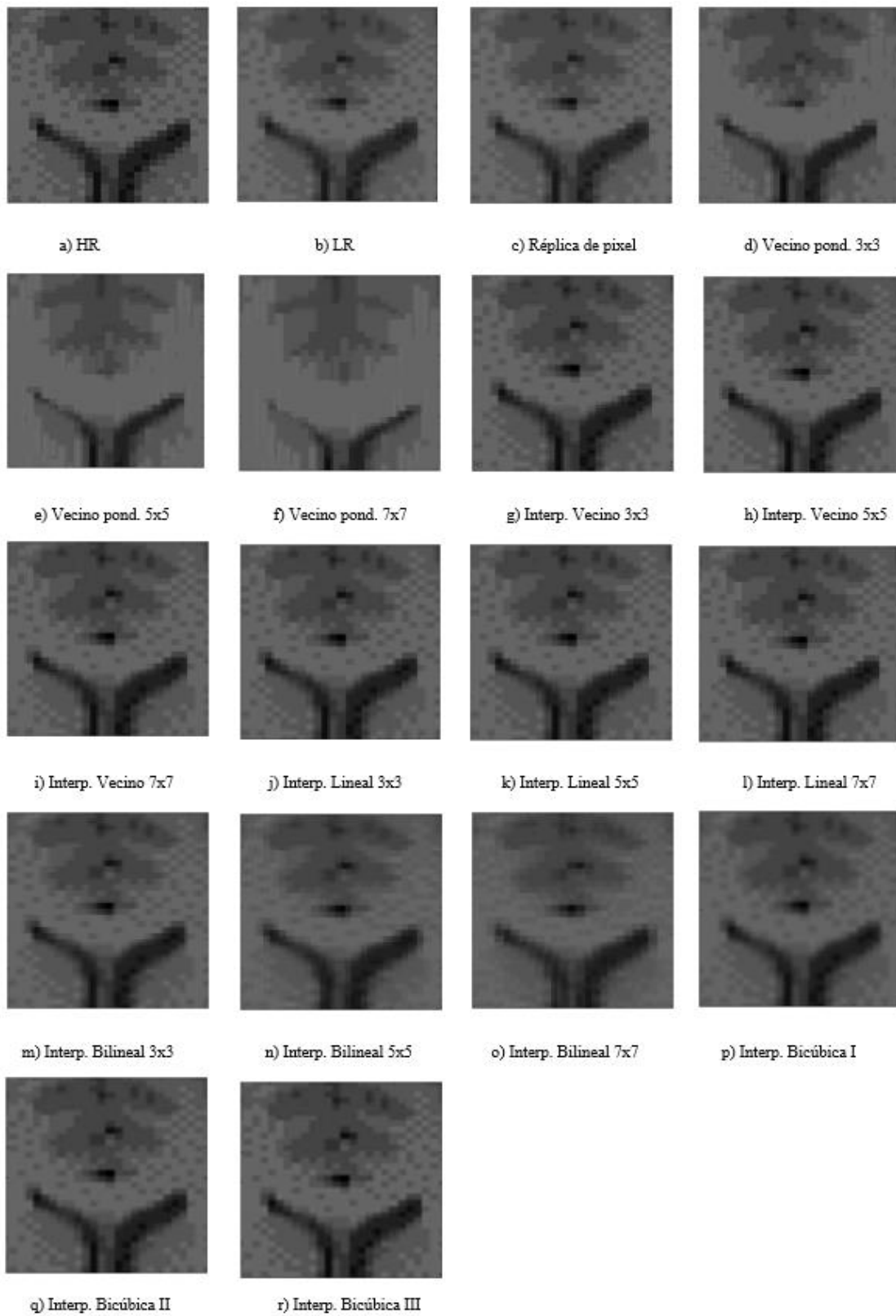


Figura A 26 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica02” en escala de grises.

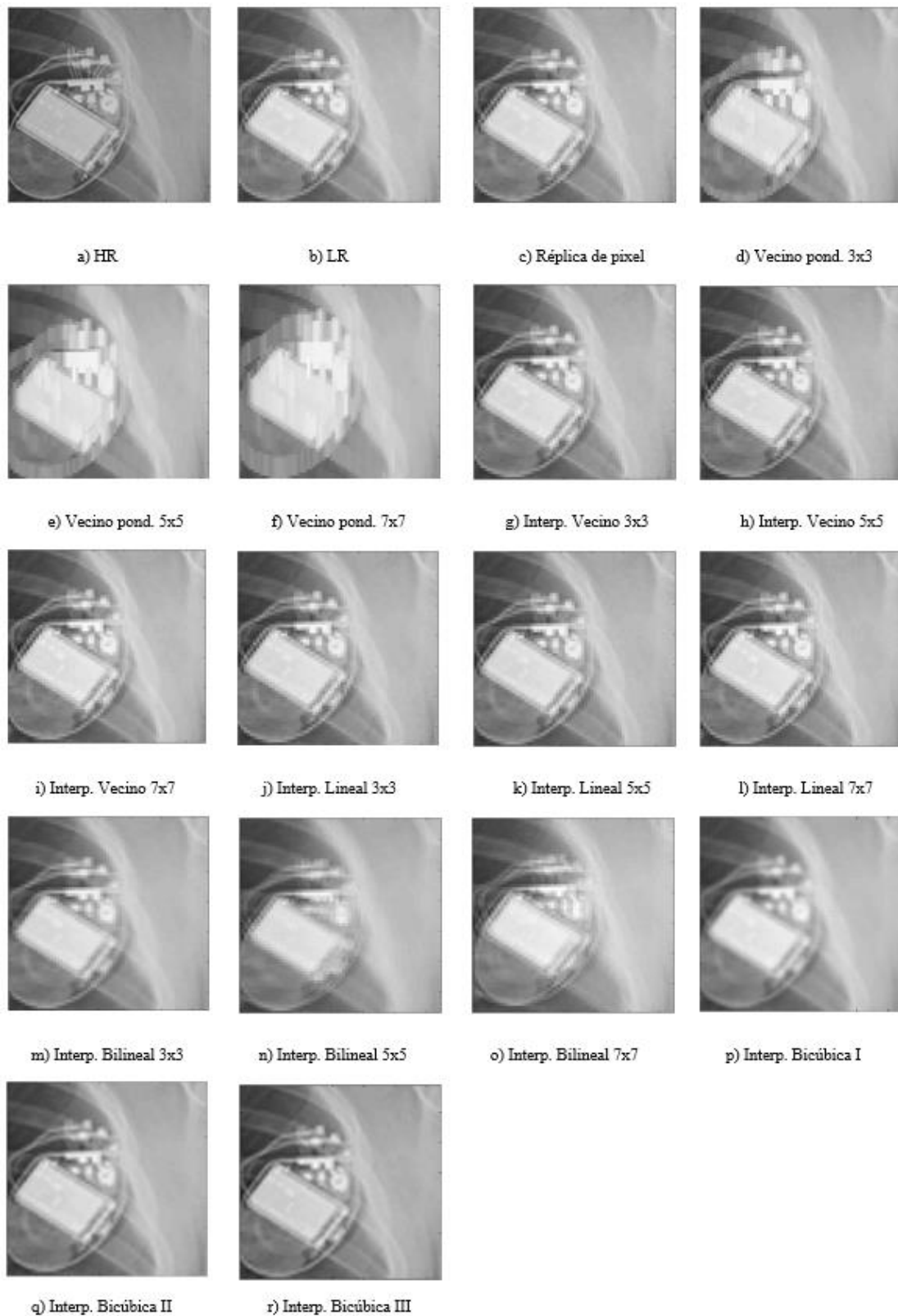


Figura A 27 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica03” en escala de grises.

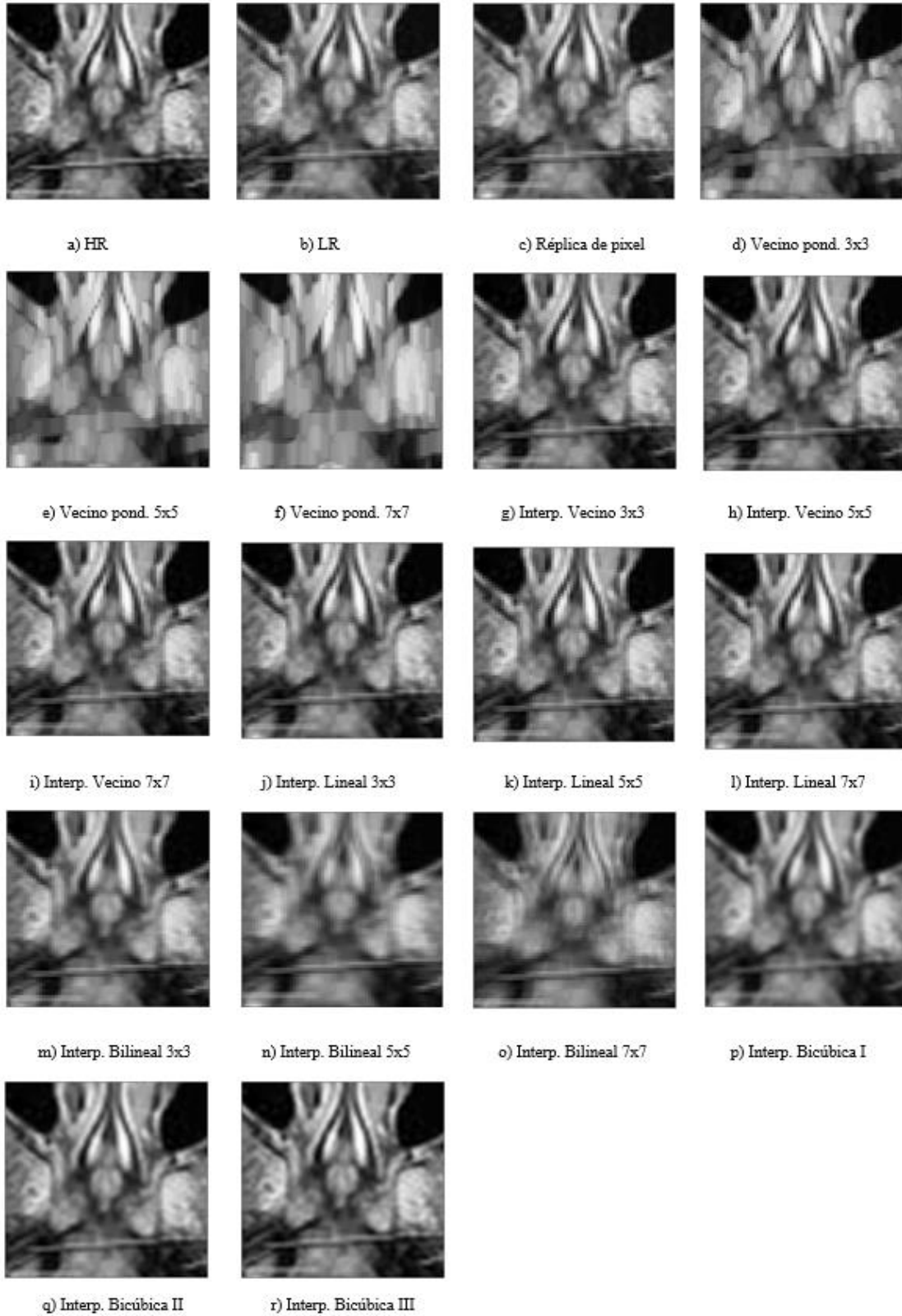


Figura A 28 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica04” en escala de grises.

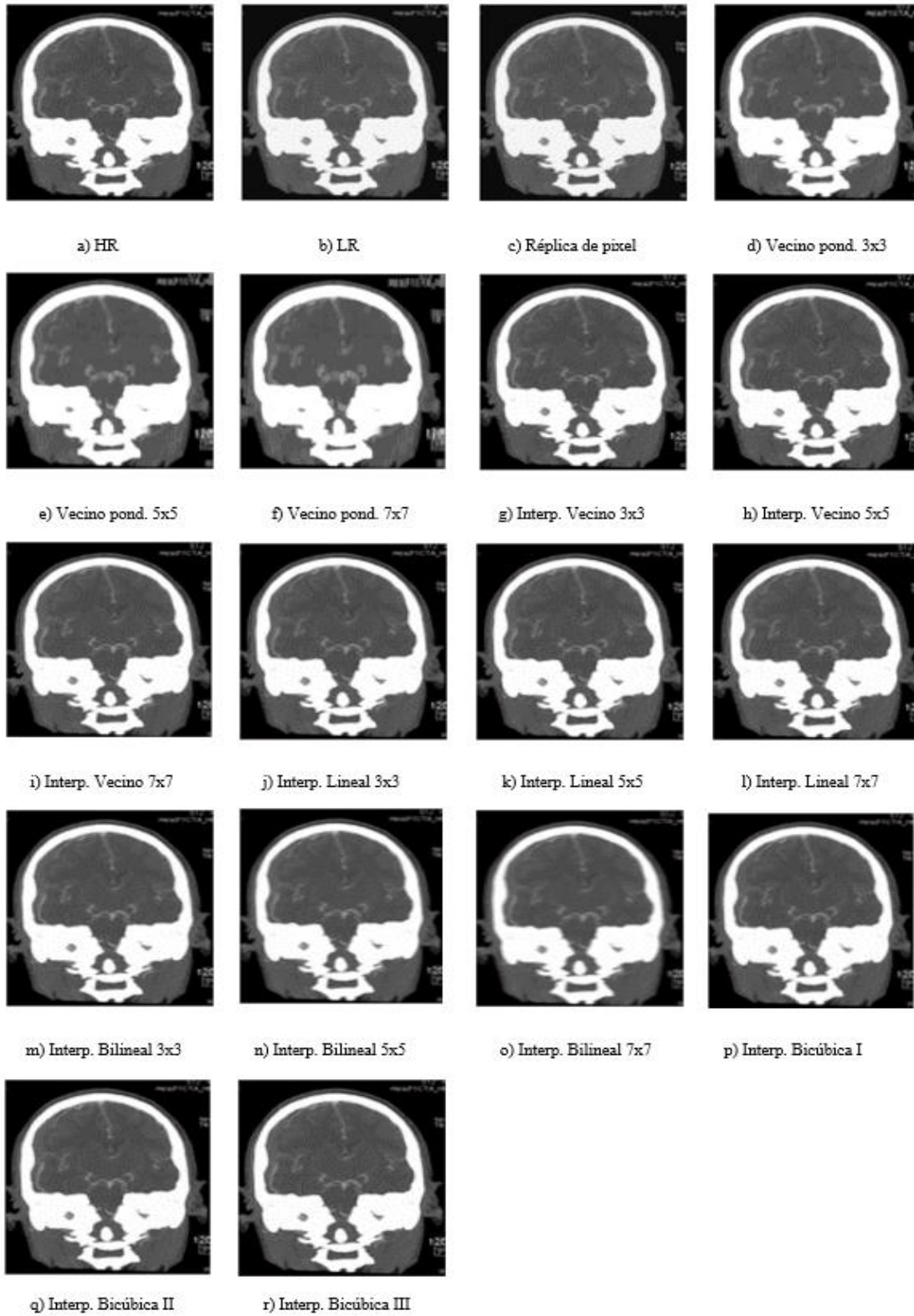


Figura A 29 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica05” en escala de grises.

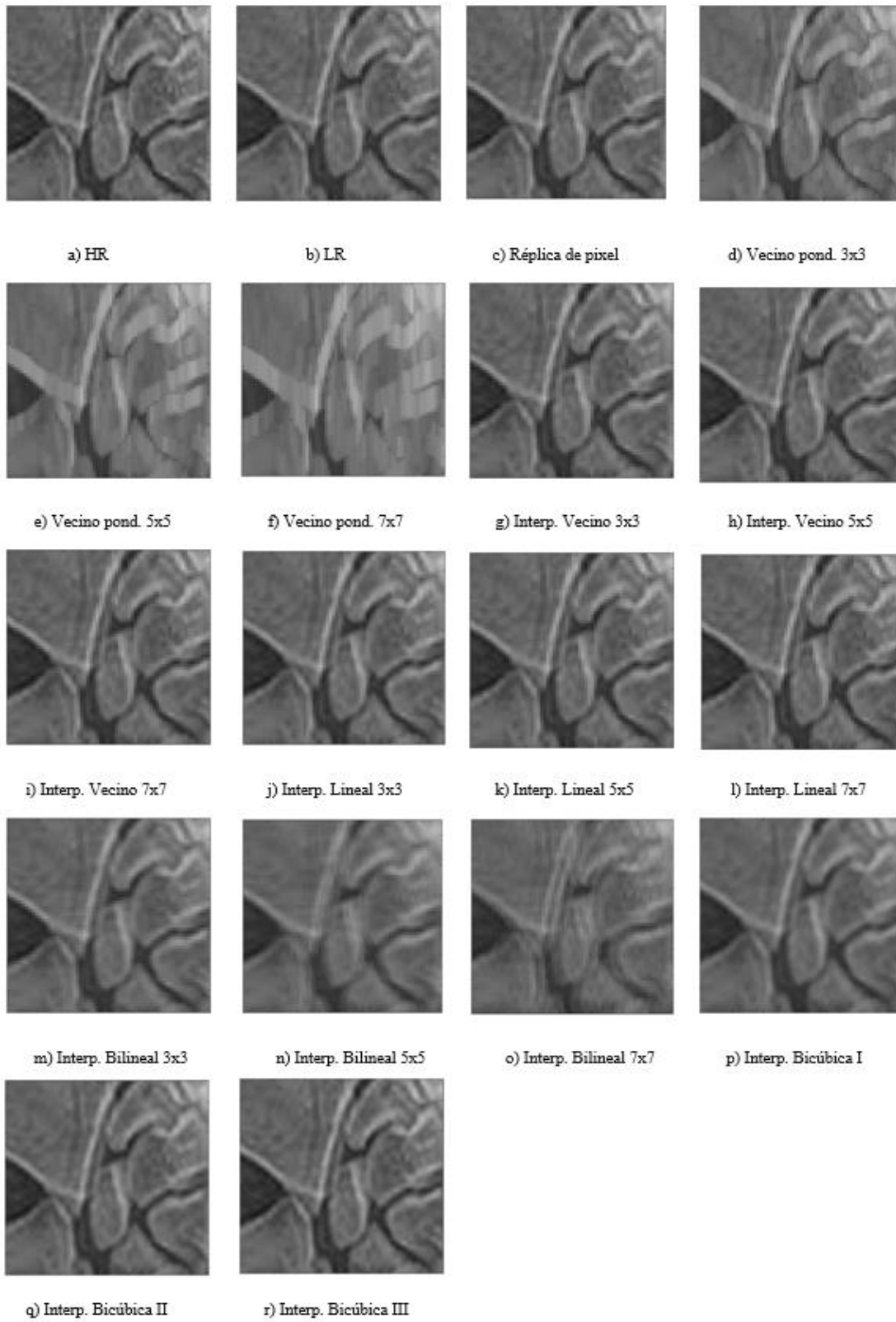


Figura A 30 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica06” en escala de grises.

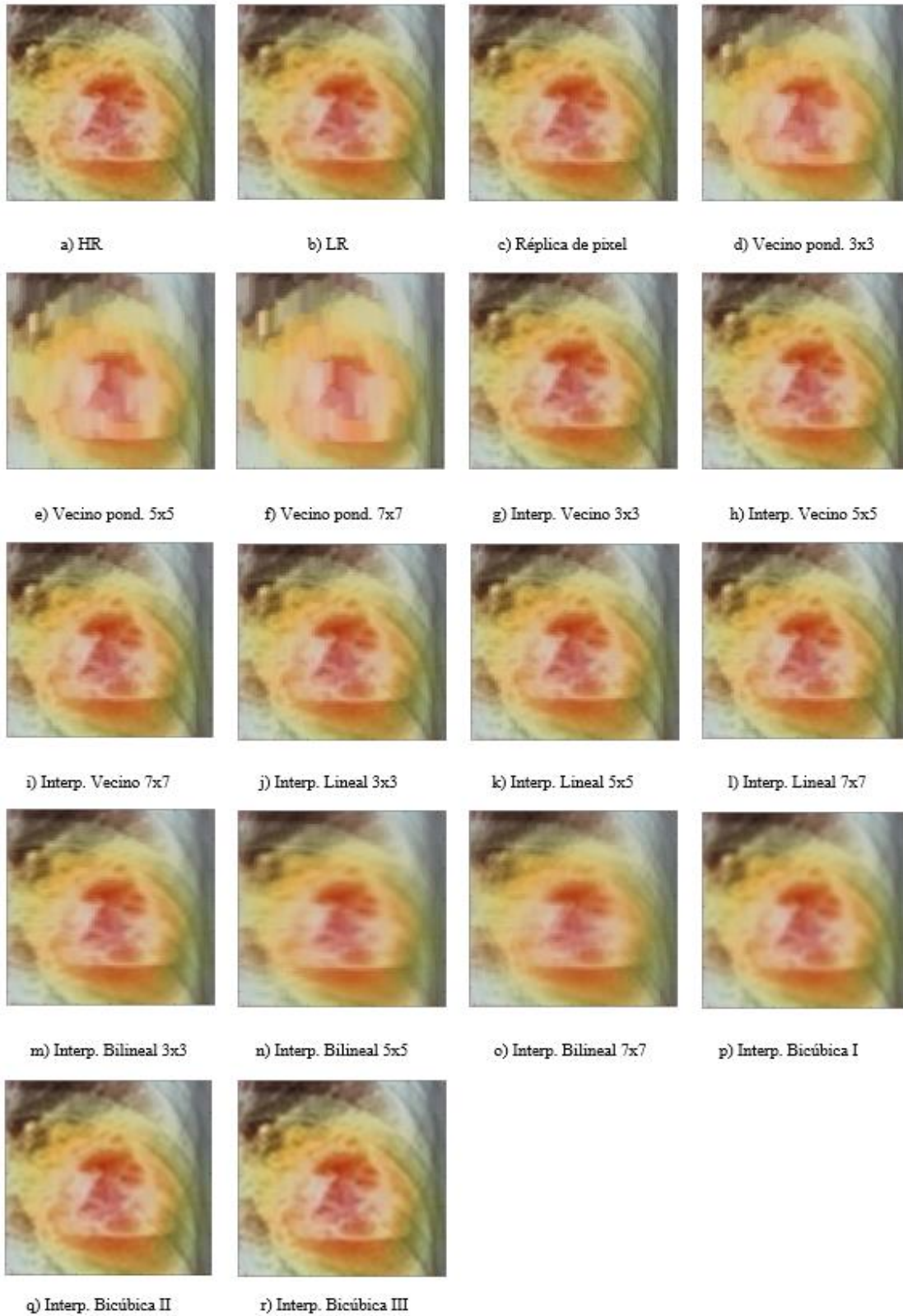


Figura A 31 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica07” a color.

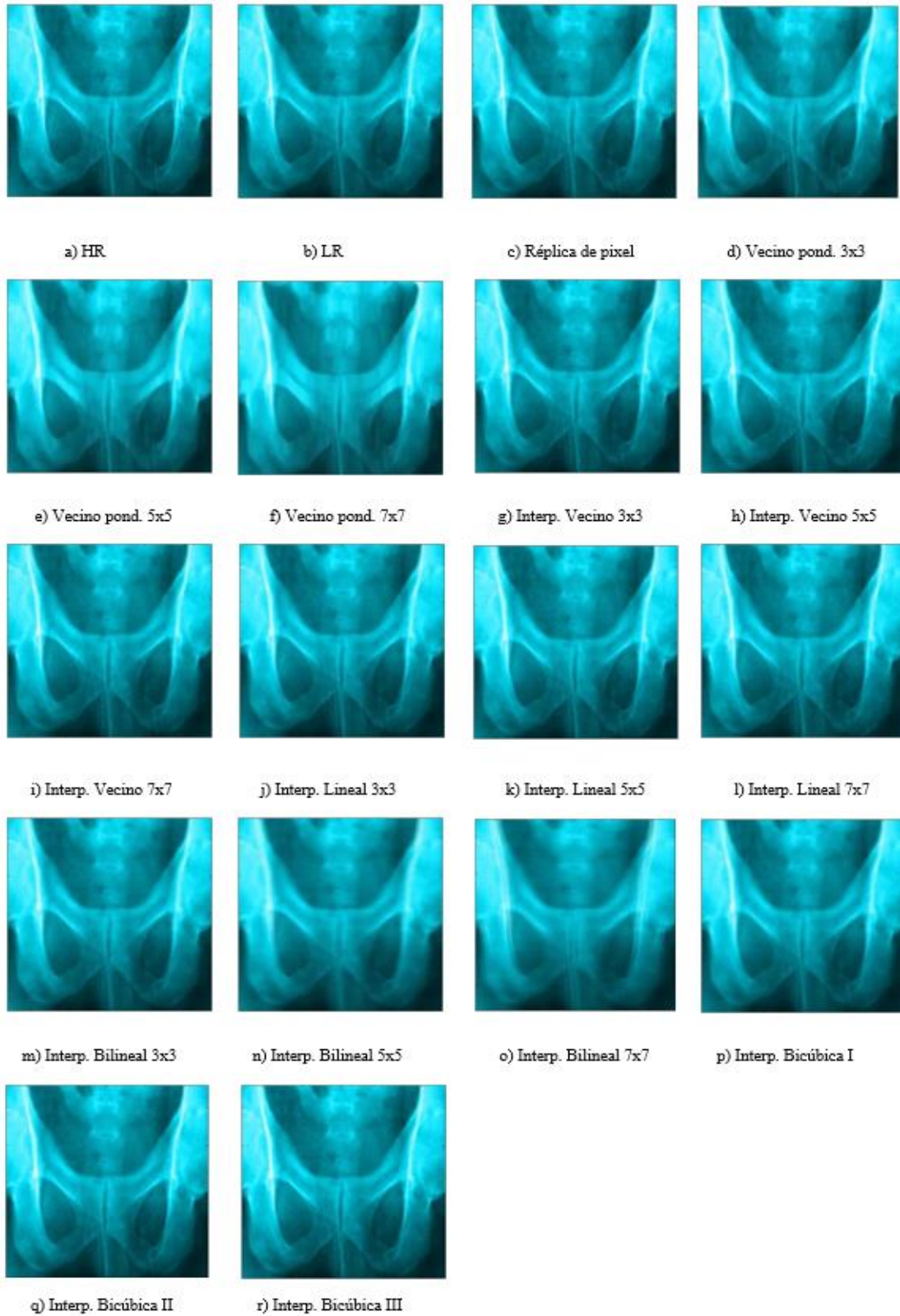


Figura A 32 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica08” a color.

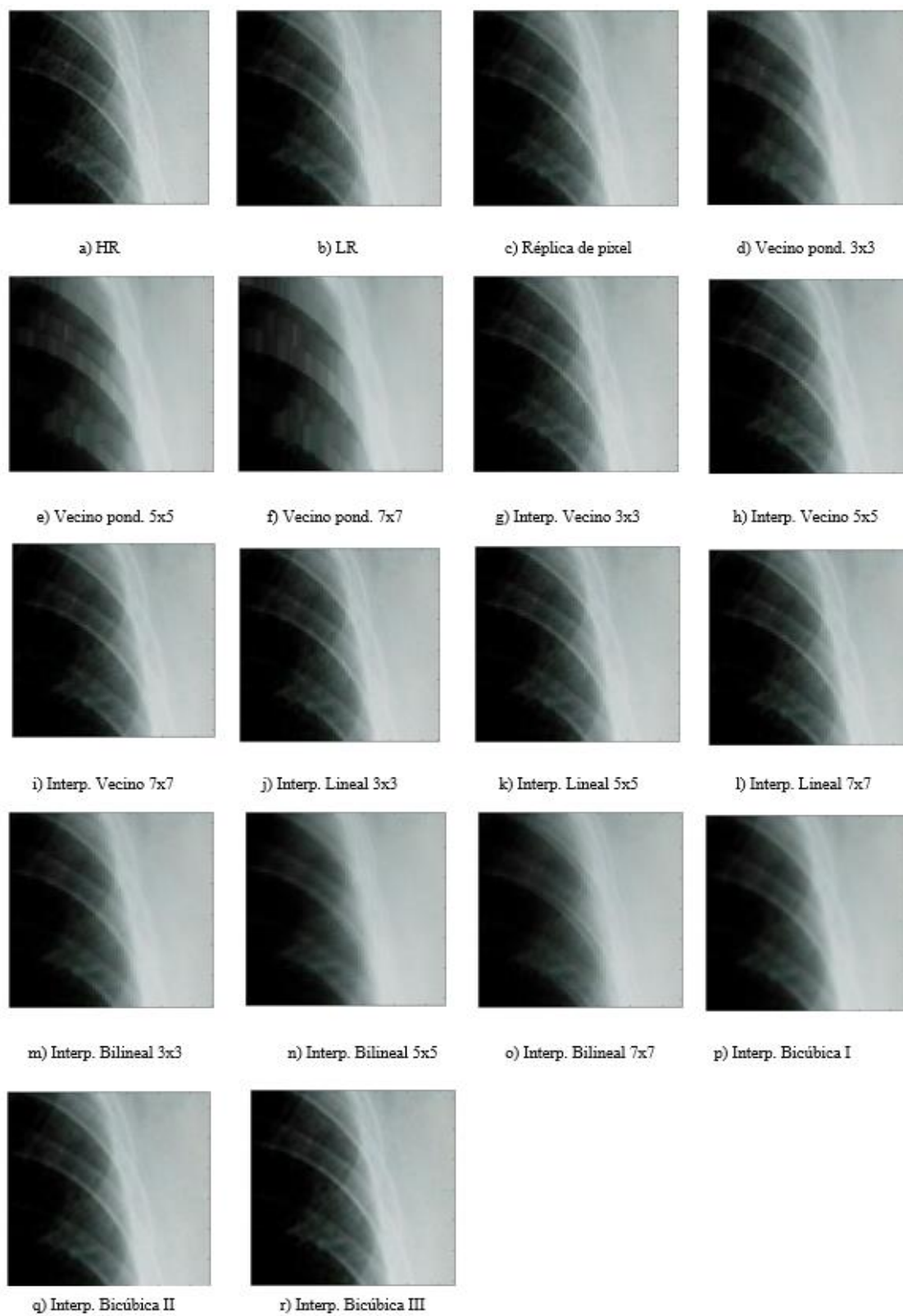


Figura A 33 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica09” a color.

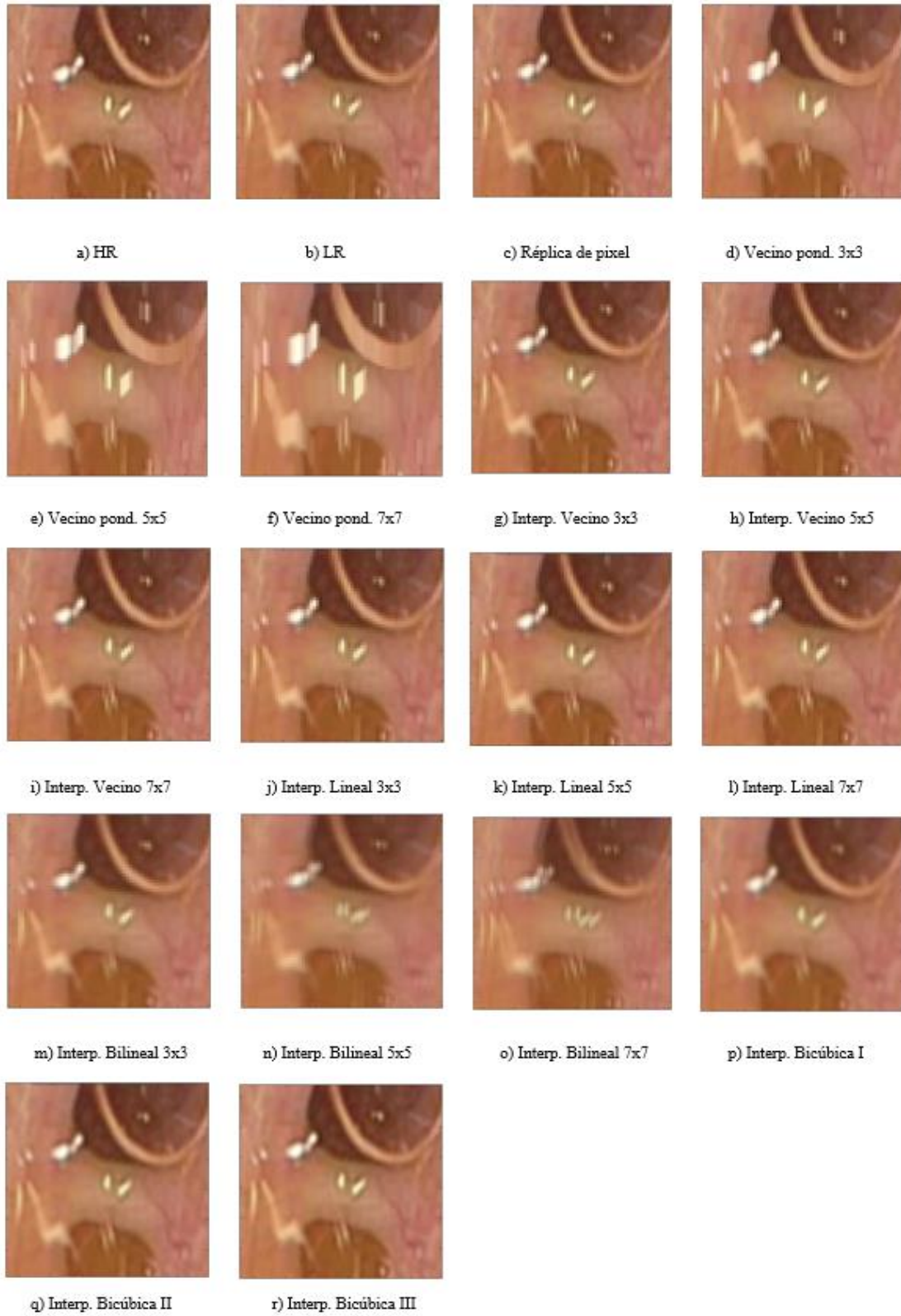


Figura A 34 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica10” a color.

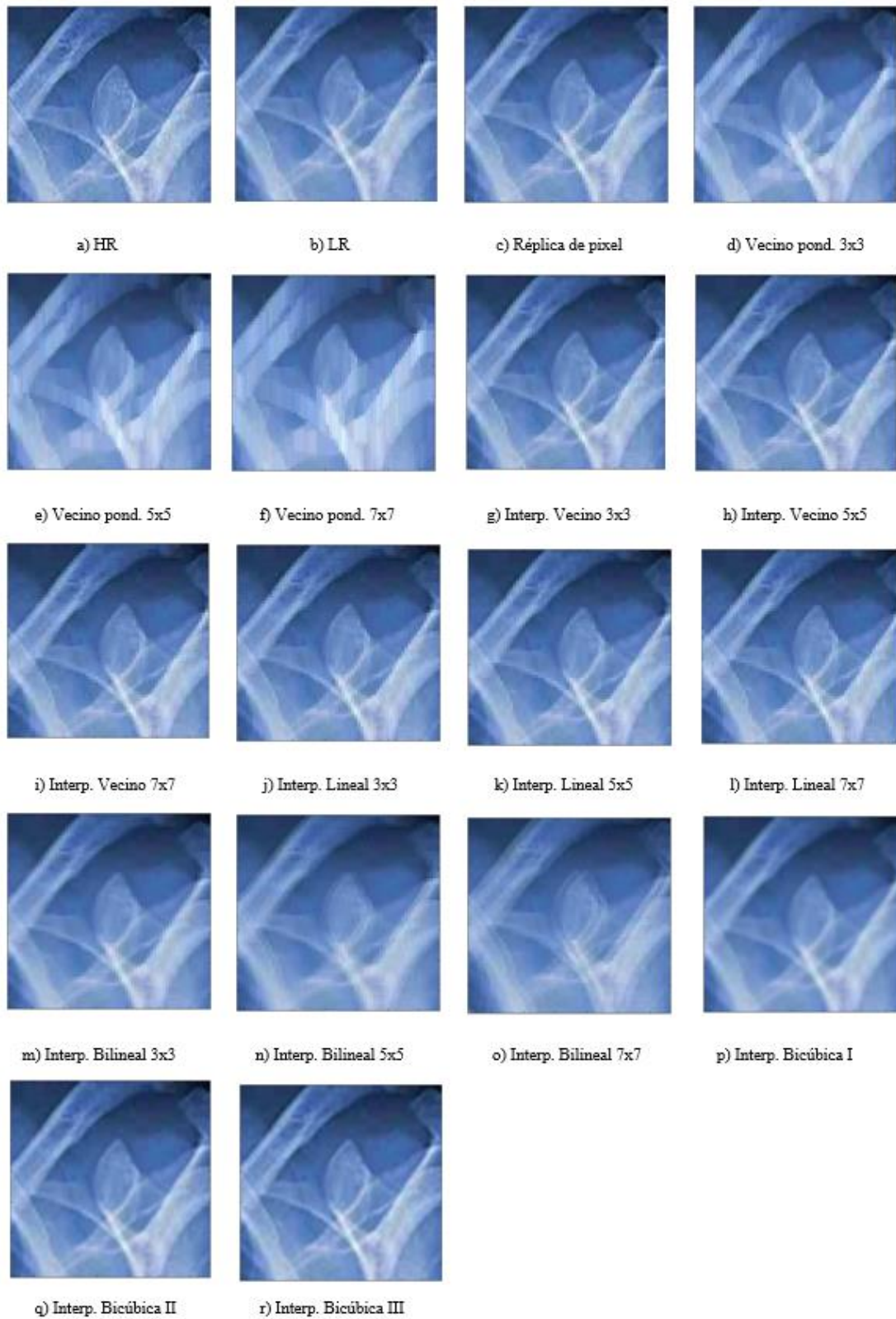


Figura A 35 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica11” a color.

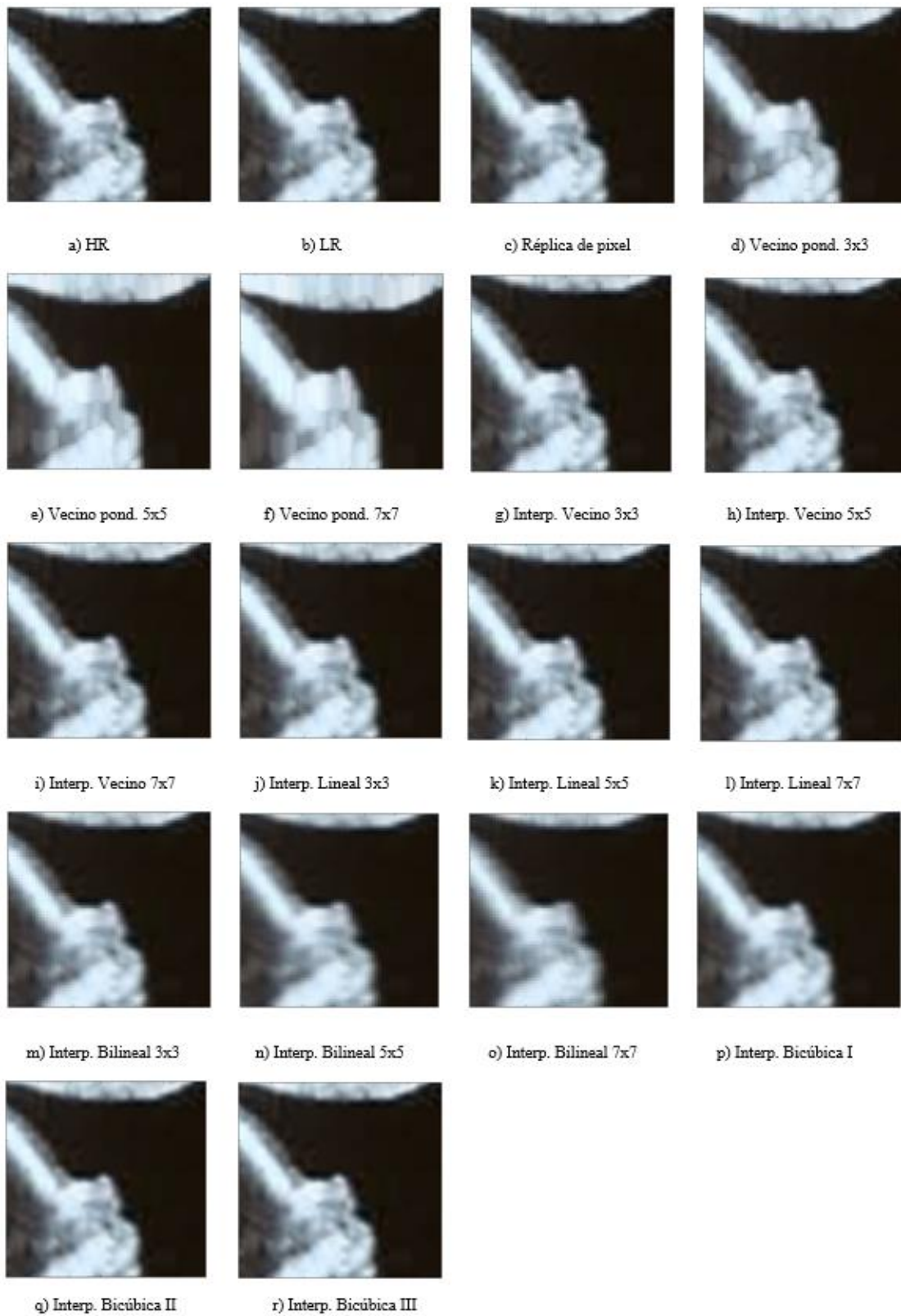


Figura A 36 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Medica12” a color.

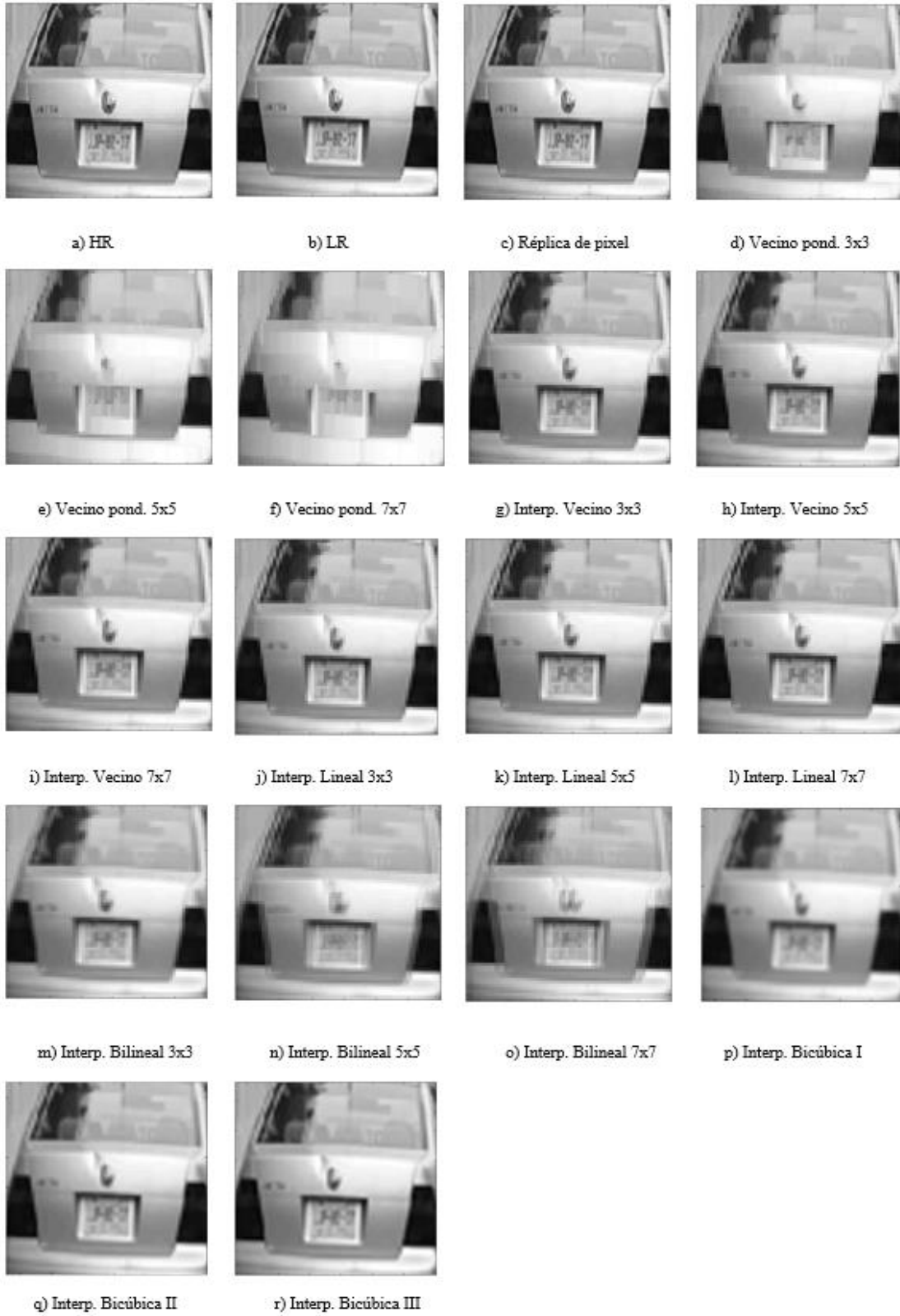


Figura A 37 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico01” en escala de grises.

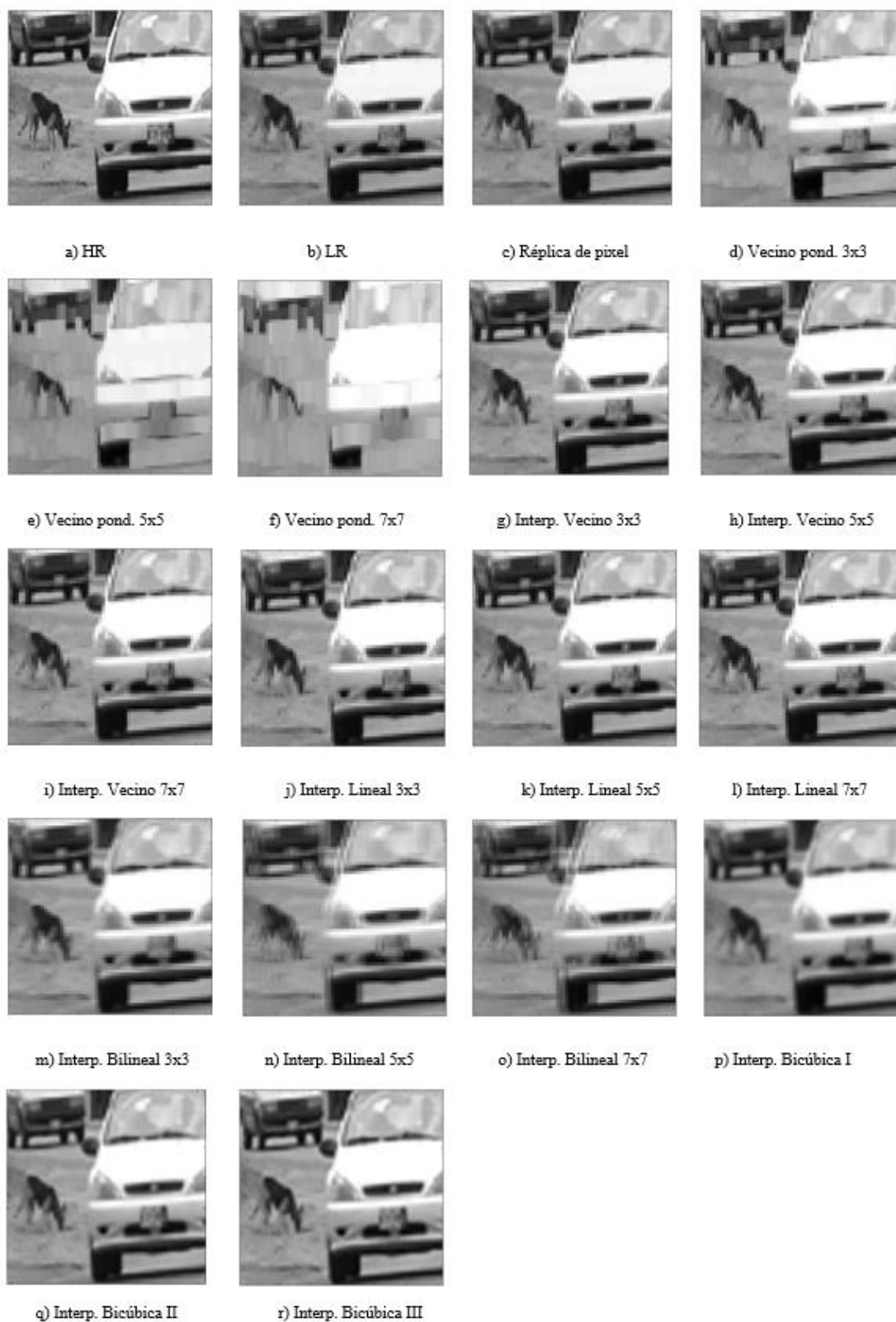


Figura A 38 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico02” en escala de grises.

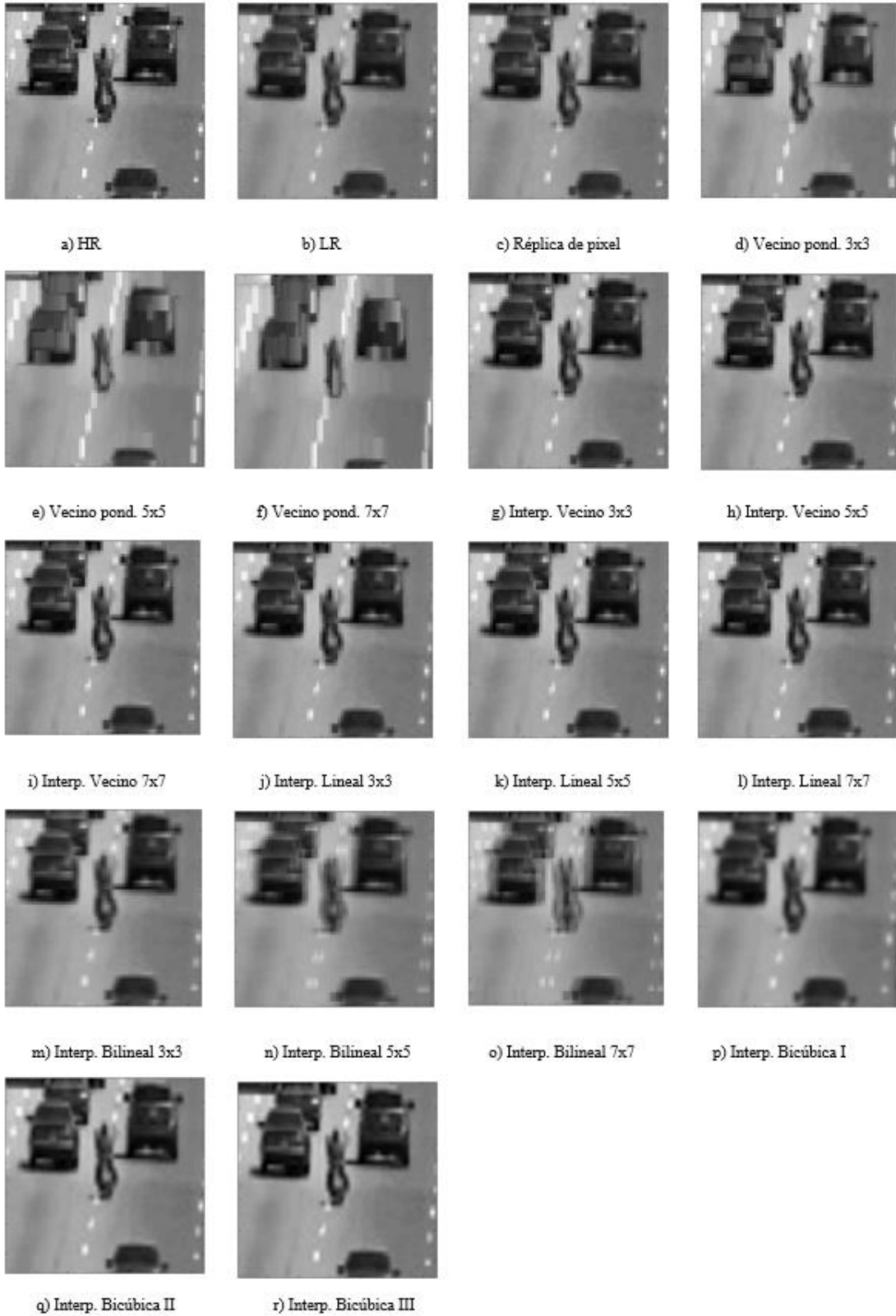


Figura A 39 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico03” en escala de grises.

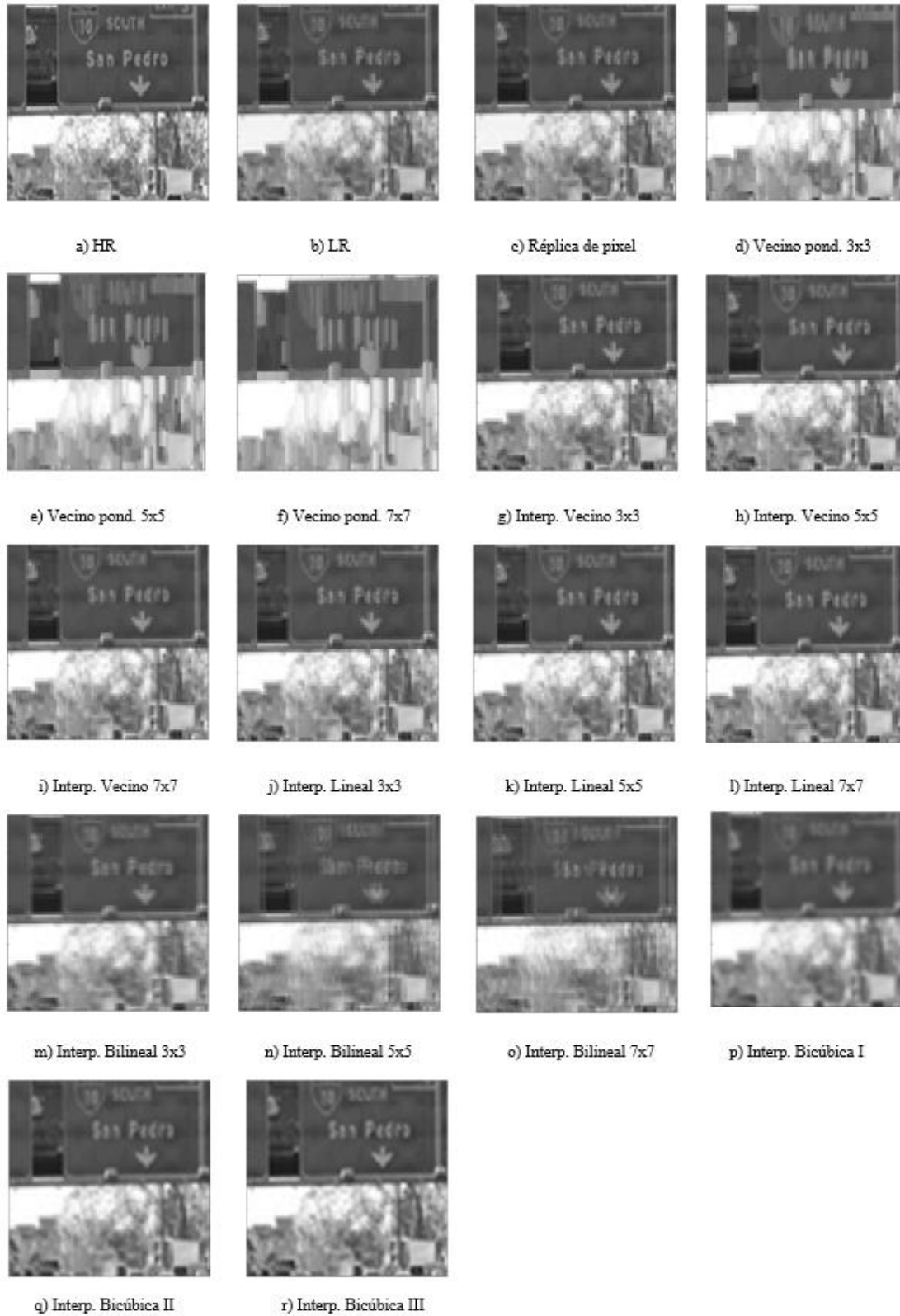


Figura A 40 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico04” en escala de grises.

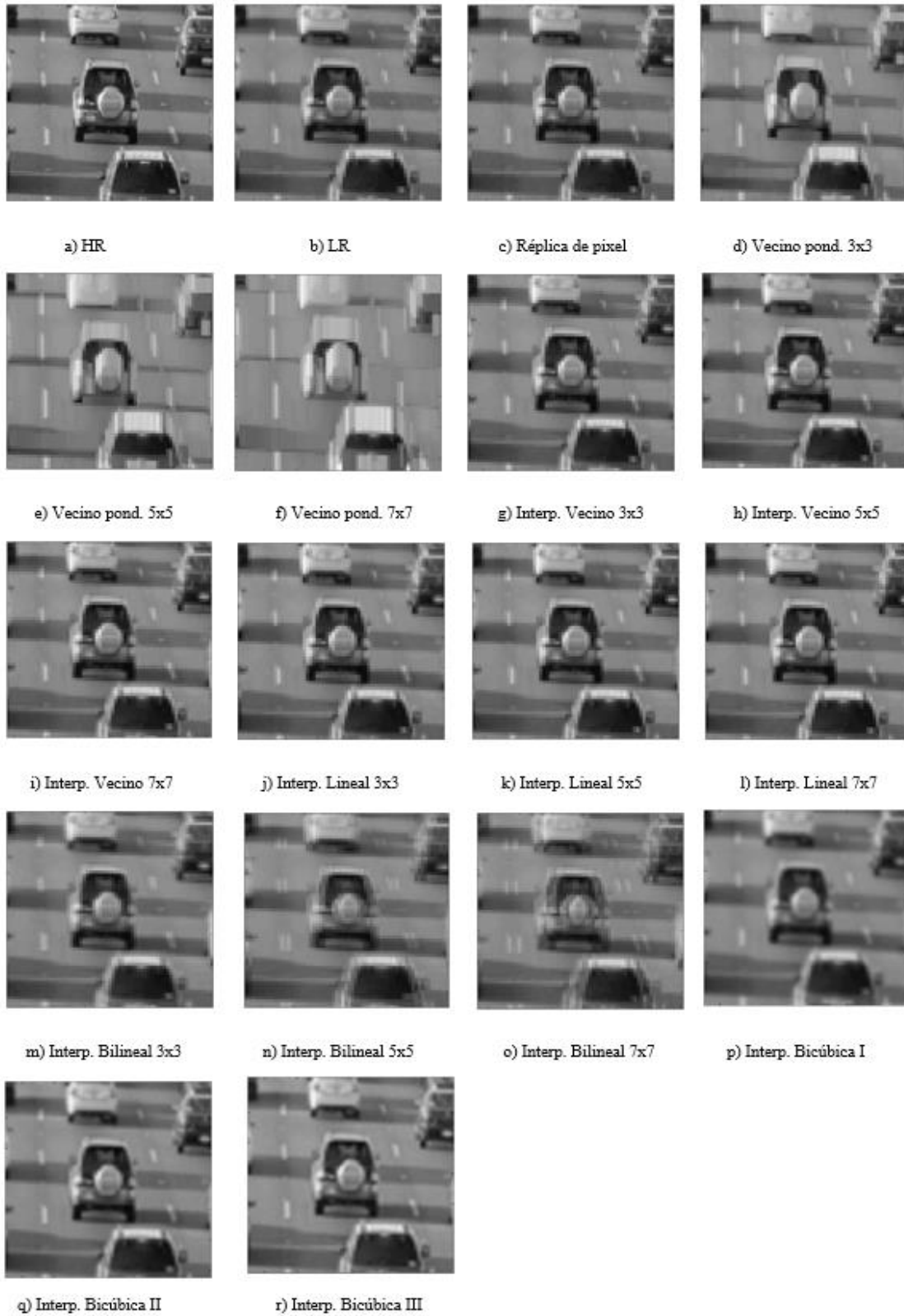


Figura A 41 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico05” en escala de grises.

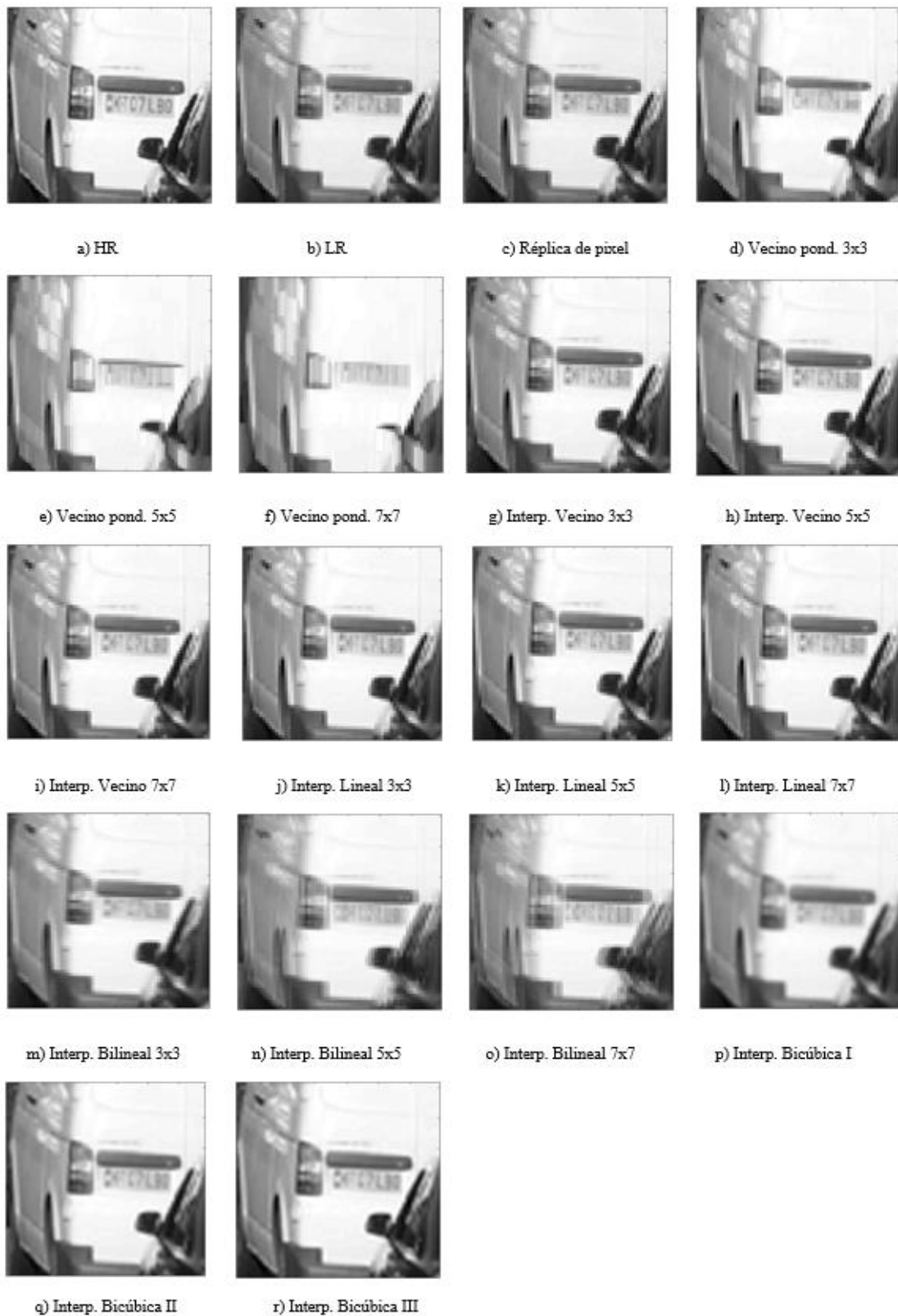


Figura A 42 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico06” en escala de grises.

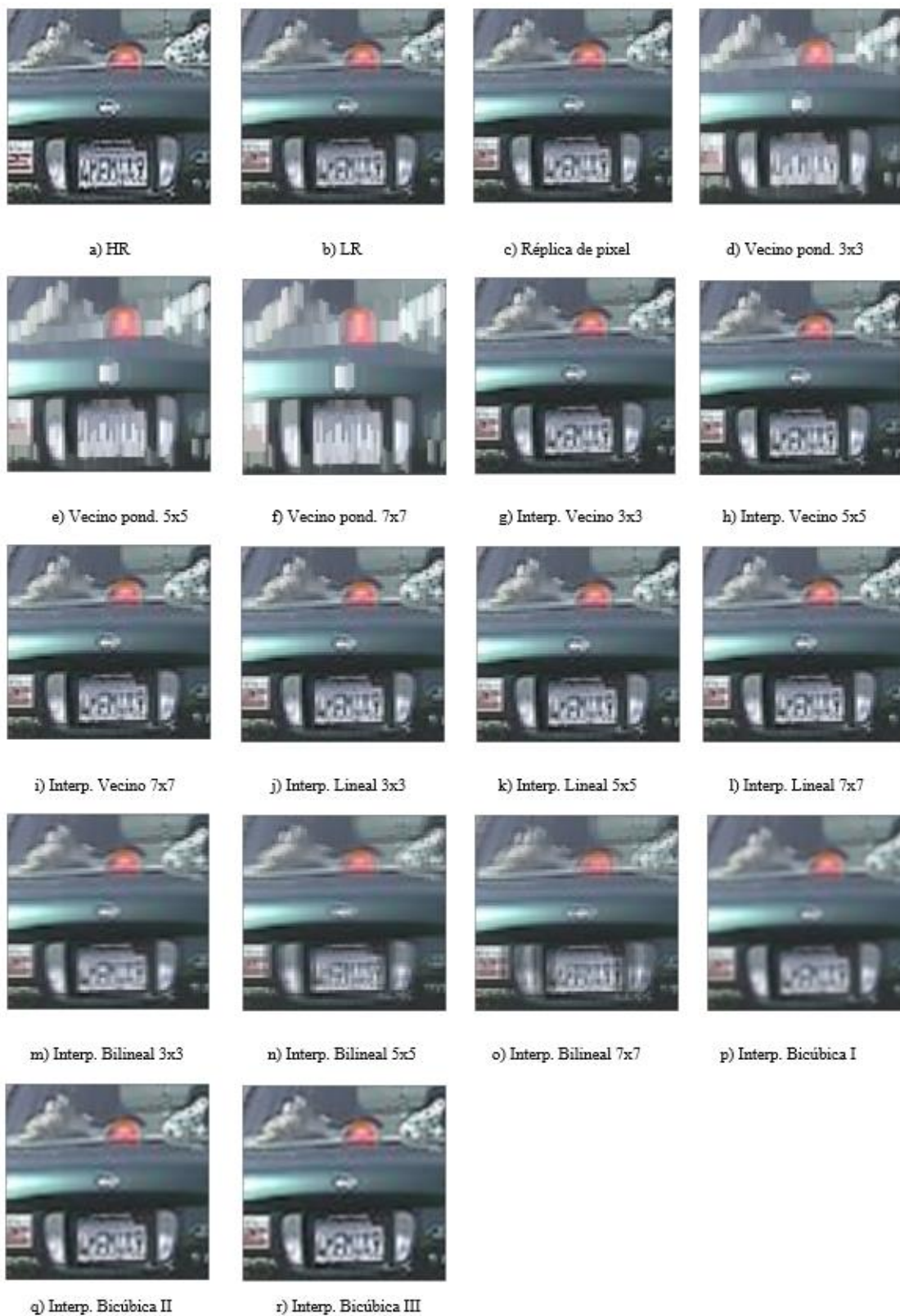


Figura A 43 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico07” a color.



Figura A 44 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico08” a color.

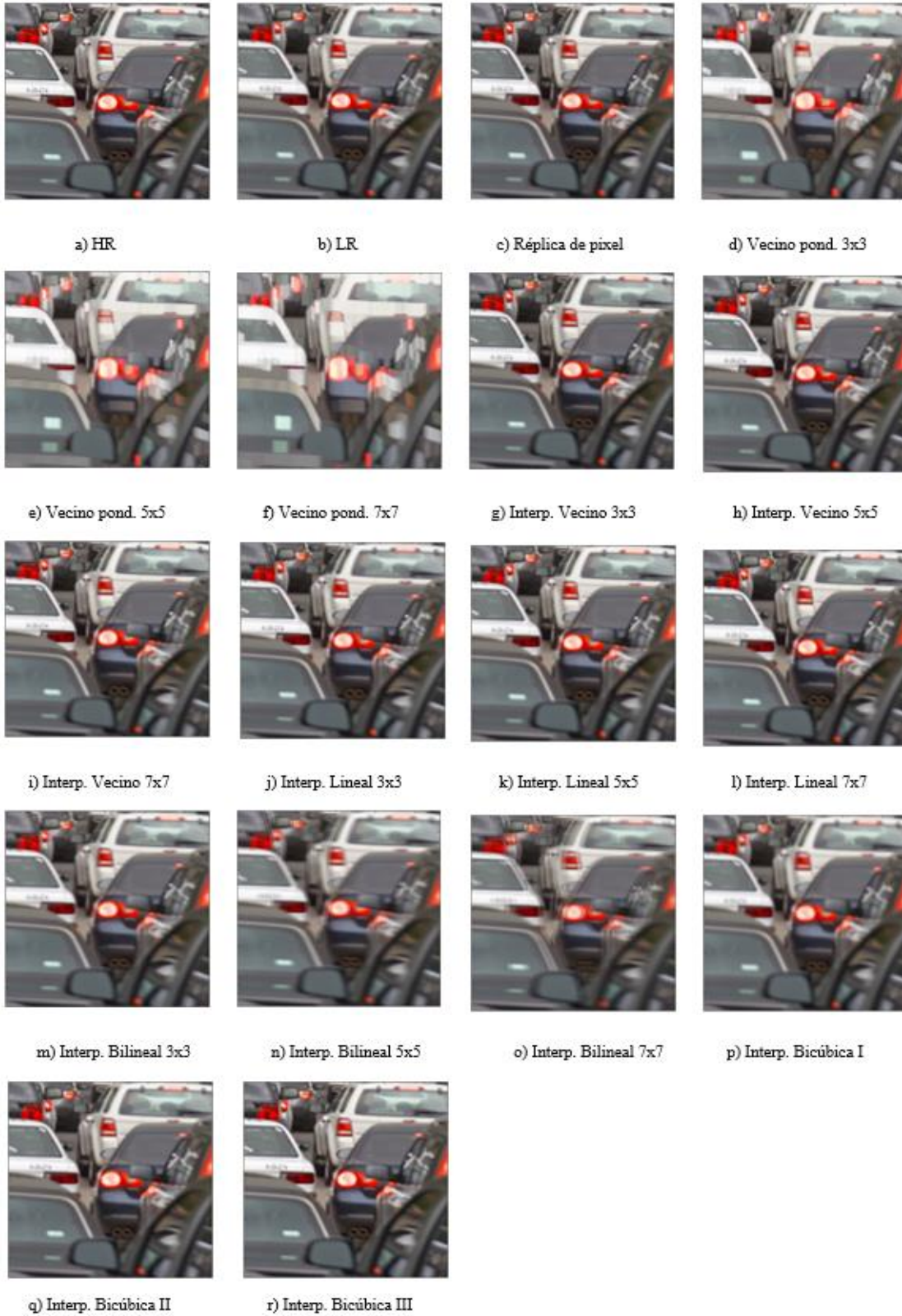


Figura A 45 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico09” a color.

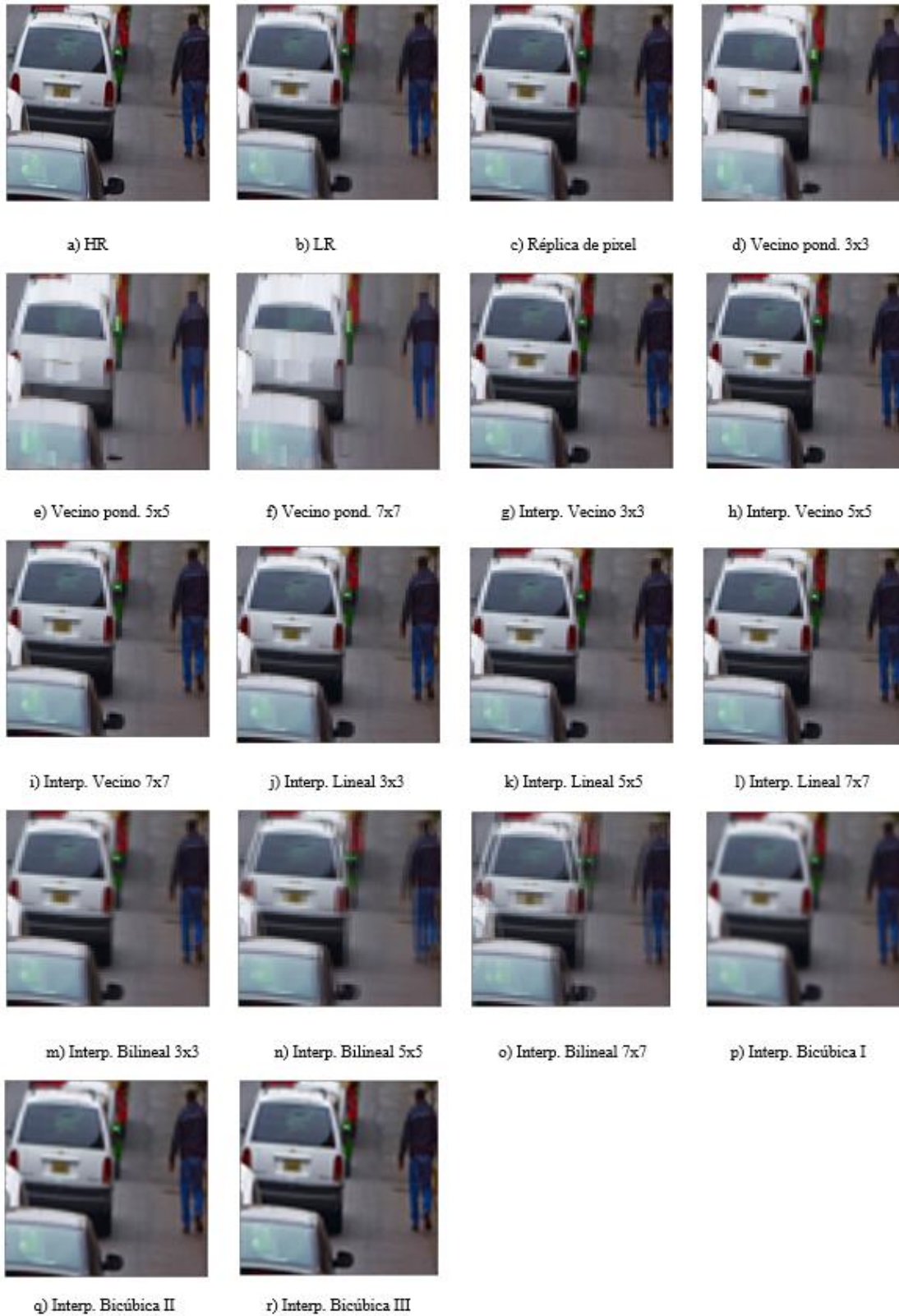


Figura A 46 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico10” a color.

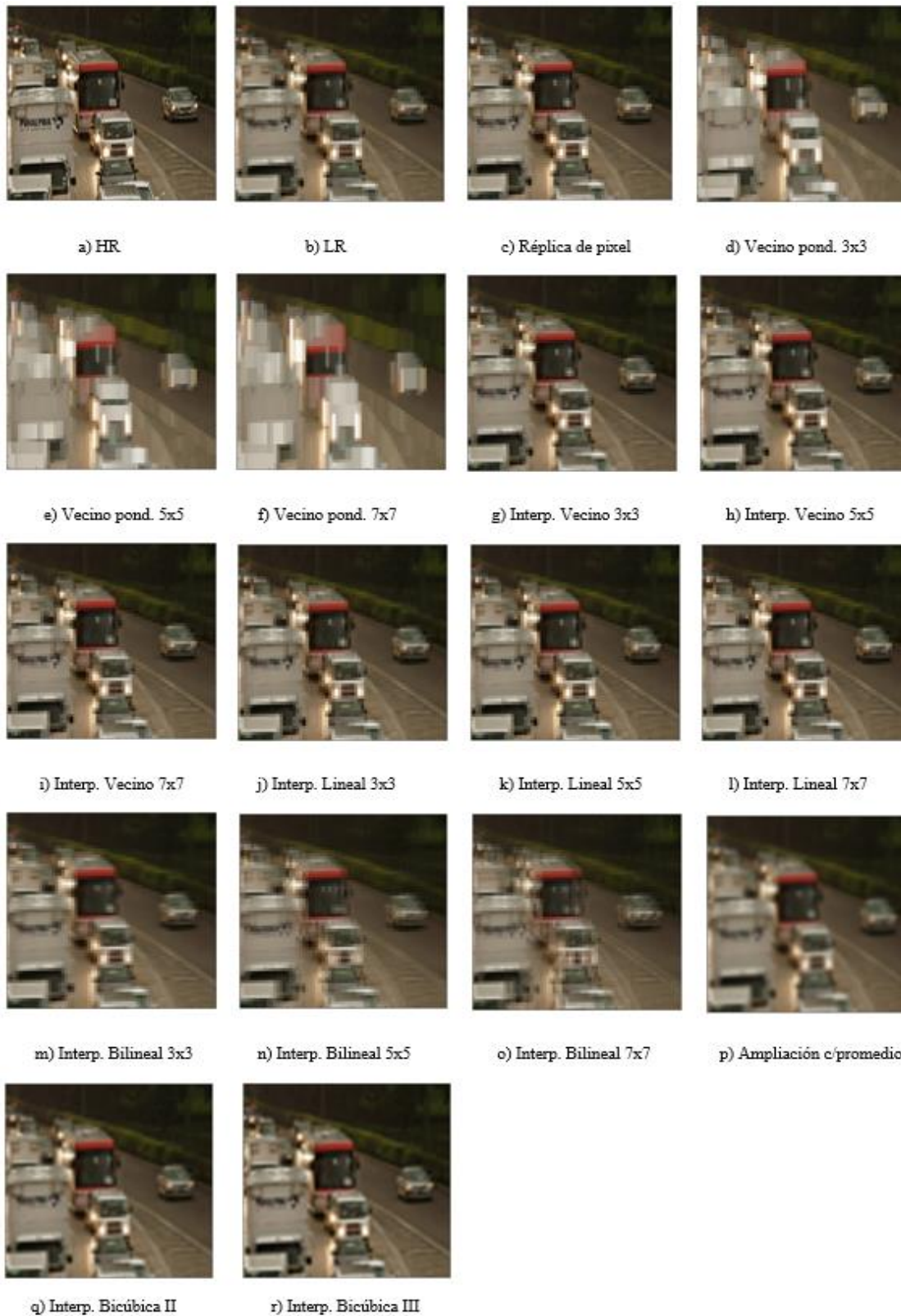


Figura A 47 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico11” a color.

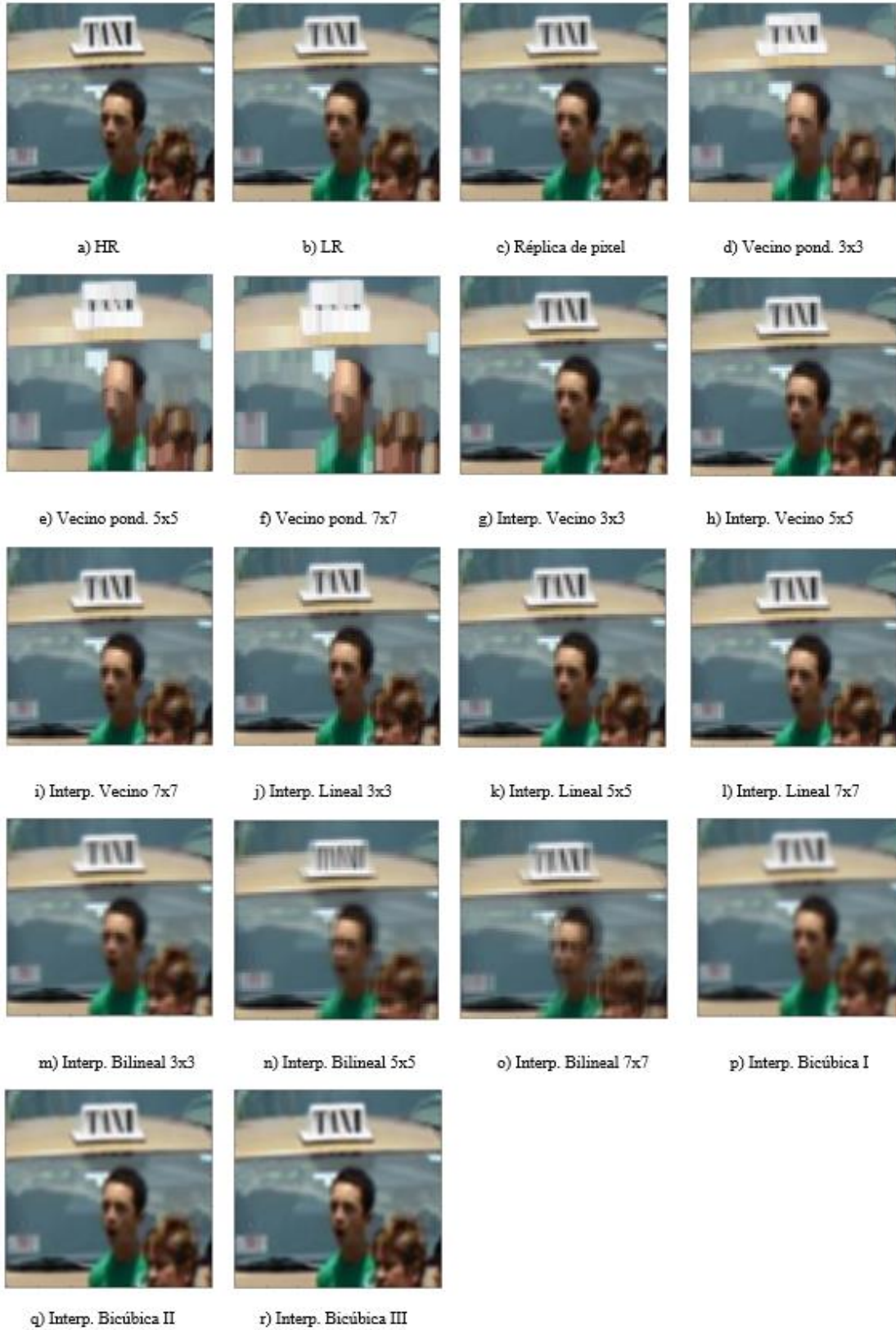


Figura A 48 Imágenes comparativas de métodos de SR, en imagen “Trafico12” a color.