

## DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

---

### ORIGEN

---

El presente Proyecto Fin de Carrera se enmarcó dentro de una de las líneas principales de la **División de Sistemas Integrados (DSI)** que pertenece al **Instituto Universitario de Microelectronica Aplicada (IUMA)** de la **Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)**.

El tratamiento digital de imágenes y secuencias de video no es un campo nuevo, pero sí ha visto un increíble avance en sus técnicas de procesamiento en los últimos años. La explosión de este campo se produce en el momento en que el coste de los productos derivados, alcanza al usuario en forma de cámaras fotográfica, cámaras de vídeo, televisores, decodificadores, consolas y todas las formas posibles de entretenimiento electrónico. Pero el ámbito del tratamiento digital de imágenes no se ve sólo relegada al ámbito del ocio, sino que está en plena expansión en muchos otros campos: medicina, biología, geología, seguridad, aplicaciones militares y espaciales, construcción y cualquier otro que implique en mayor o menor medida la captura de imágenes para su análisis.

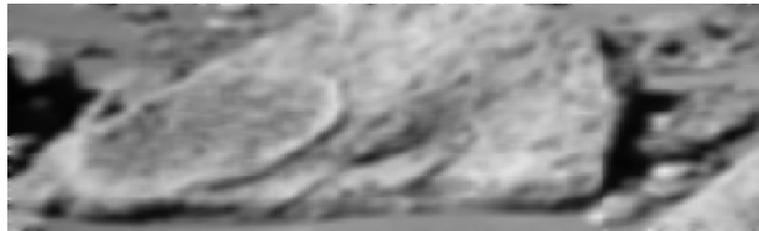
Dentro del tratamiento digital de imágenes existen numerosas aplicaciones, desde la compresión para su transmisión por redes de datos con pérdidas de calidad despreciables hasta el retoque fotográfico. Una de las áreas que más está evolucionando en los últimos años, debido a la llegada de la Alta Definición (HD) al hogar es la del realce o mejora de la resolución espacial de imágenes. Esta técnica consiste en aumentar el tamaño de una fotografía o de un vídeo de forma que detalles que permanecían ocultos debido a la baja resolución, logren ser recuperados.

Para lograr este objetivo existen dos aproximaciones. La primera de ellas es mejorar la calidad del sensor que captura la imagen. La segunda opción consiste en tratar la imagen de forma que se consiga recuperar la información a partir de un procesado digital de la misma. El primer método es el óptimo pero presenta dos grandes limitaciones, la primera es de carácter técnico: debido al grado de miniaturización que se está alcanzando hoy en día, los sensores están llegando a su límite práctico. La segunda limitación es de carácter económico, ya que un sensor de mayor resolución es a su vez mucho más caro, con lo que puede no ser viable desde un punto de vista comercial mejorar el propio sensor.

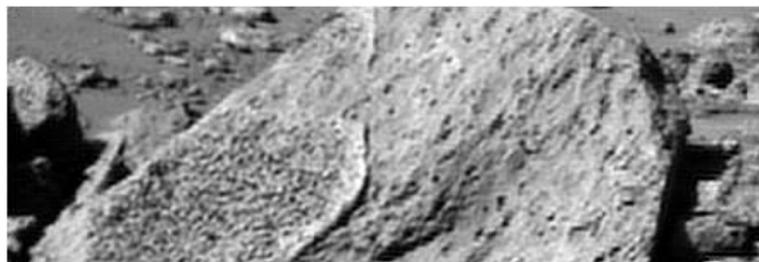
La segunda aproximación consiste en procesar la imagen de forma que se consiga aumentar la resolución de la misma. Un ejemplo de este tipo de mejoras son las ofrecidas por las cámaras digitales en forma de zoom digital, que aumentan un detalle mediante algún tipo de interpolación avanzada. El problema de este tipo de soluciones es que no aportan nueva información a la ya existente y contenida en la propia fotografía, de forma que se consigue una mejora en los bordes y en el enfoque pero nunca se pueden recuperar aquellos detalles que se hayan perdido en el proceso de muestreo.

Una solución a este problema fue propuesto por R. Tsai y T. Huang en 1984 al mezclar varias imágenes con un gran nivel de semejanza de forma que conseguían combinar la información de ellas y reconstruir una imagen de mayor resolución. El trabajo propuesto era para imágenes sin ruido y desplazadas de un mismo plano u objeto, y se trabajaba en el dominio de la frecuencia. A esta técnica la denominaron **Súper-Resolución (SR)** y ha sido el punto de partida de numerosos trabajos de investigación alrededor de este tema.

Las técnicas de SR fueron ampliamente estudiadas y de tener que trabajar, en principio, con unas condiciones muy específicas en cuanto a la nitidez de las imágenes, se consiguió perfeccionar la técnica para poder usar imágenes desenfocadas o ruidosas. Posteriormente se mejoró la forma de combinar las imágenes alcanzándose mayores cotas de calidad. En la Figura 1 podemos observar una imagen original transmitida por la *Mars Pathfinder* en misión para la NASA (a) y el resultado obtenido tras combinar varias de ellas mediante SR (b).



(a)



(b)

FIGURA 1: IMÁGENES DE BAJA RESOLUCIÓN TRANSMITIDAS POR LA *MARS PATHFINDER* (A) Y LAS OBTENIDOS POR LA NASA TRAS APLICAR SÚPER-RESOLUCIÓN

Todos estos trabajos están enfocados a aumentar y mejorar el tamaño de una sola imagen ya que las aproximaciones empleadas son muy costosas computacionalmente. En los laboratorios *Philips Resarch* de Eindhoven han conseguido desarrollar una versión de la SR en el dominio del espacio, con la ventaja de que su implementación en *hardware* es mucho más sencilla y eficaz. En 2003 Gustavo M. Callicó desarrolla una versión implementable de lo que se llama **Súper-Resolución Dinámica**, que consiste en aplicar la SR para todos y cada uno de los fotogramas de una secuencia de vídeo.

Esta solución, aunque mejora las prestaciones frente a las SR en el dominio de la frecuencia, sigue siendo terriblemente costosa, y más teniendo en cuenta que hay que realizarla para un elevado número de fotogramas. Analizando los tiempos de cómputo de cada uno de los bloques funcionales de la SR, se observa como el bloque de la **Estimación de Movimiento (ME)** conlleva más del 50% de tiempo de cómputo de todo el proceso.

La SR en el dominio del espacio se divide en tres bloques fundamentales. El primero de ellos es el de la ME, que consiste en detectar qué movimiento se ha producido comparando dos fotogramas, su dirección y su longitud. De esta forma se obtiene una serie de vectores de movimiento que determinará como se mueve una imagen respecto a otra. Una vez calculados los vectores de movimiento se procede a la siguiente etapa: el **Compensador de Movimiento (MC)**, que es el encargado de combinar la información proporcionada por los vectores de movimiento. Por último se procede a rellenar aquellos píxeles que no han podido ser completados por la etapa del MC mediante el **Rellenado de Huecos (FH)**, de forma que se obtiene el fotograma mejorado a una mayor resolución.

## OBJETIVOS

El algoritmo clásico de ME por ajuste de bloques es el de **Búsqueda Exhaustiva (FS)**, que evalúa todas las posibles posiciones retornando la de menor distorsión. Este es el proceso crítico dentro del proceso de SR tal y como se muestra en análisis de rendimiento de la Figura 2, es por ello que lo que se pretende es buscar una alternativa más rápida sin perder la calidad obtenida por el FS.

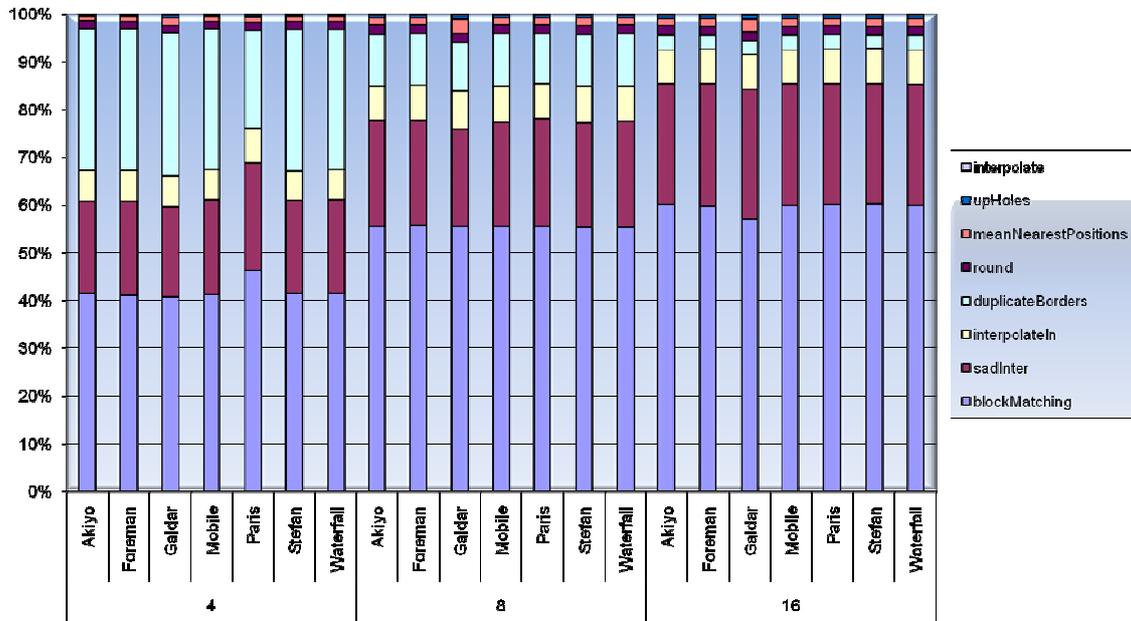


FIGURA 2: *PROFILE DEL PROCESO DE SÚPER-RESOLUCIÓN*

El objetivo fundamental del presente Proyecto Fin de Carrera haya sido la elaboración de una serie de recomendaciones para la optimización de este proceso con vistas a una futura implementación en una plataforma *hardware* para alcanzar las prestaciones de Tiempo Real. Para lograr este objetivo se plantearon una serie de hitos parciales:

- Estudio y evaluación de los mejores algoritmos de Estimación de Movimiento aplicados a Compresión de vídeo.
- Selección de los algoritmos más significativos y codificación en un lenguaje de alto nivel.
- Estudio del Algoritmo de Súper-Resolución Dinámica por Ajuste de Bloques.
- Codificación del algoritmo de SR en un lenguaje de alto nivel incluyendo los diferentes estimadores de movimiento.
- Simulación y evaluación de los diferentes algoritmos de Estimación de Movimiento dentro del proceso de Súper-Resolución.
- Análisis de los resultados obtenidos y elaboración de las recomendaciones.

## DESARROLLO

---

El presente Proyecto Fin de Carrera, tuvo como principal foco de interés el implementar y evaluar los diferentes algoritmos de Estimación de Movimiento destinados a compresión de vídeo, dentro del proceso de Súper-Resolución. Para ello estudiaron y analizaron un gran número de algoritmos de ME y se procedió a una primera selección con los 9 algoritmos más usados o que mejor resultados puedan ofertar para la SR.

Una vez seleccionados los algoritmos, se procedió a un estudio más detallado de los mismos y su posterior codificación en un lenguaje de alto nivel (ANSI C) y la correspondiente verificación de la correcta codificación de los mismos. Además se diseñaron una serie de aplicaciones para poder comparar los Vectores de Movimiento calculados por los diferentes algoritmos de forma visual y sencilla.

Una vez que se tuvieron los algoritmos de ME correctamente codificados se procedió al estudio en detalle del algoritmo de SR Dinámica por Ajuste de Bloques y su posterior implementación en lenguaje de alto nivel (C++). Se desarrolló un motor de SR altamente configurable que permitió configurar todos los parámetros necesarios de la SR así como de los diferentes algoritmos de la ME. Este motor a su vez es capaz de calcular el rendimiento de cada uno de los algoritmos y generar, además de la propia secuencia de video de salida, todos los datos necesarios para su posterior evaluación.

Una vez analizados los resultados obtenidos, se redactó una serie de recomendaciones para optimizar el rendimiento en cuanto a tiempo de cómputo del Estimador de Movimiento minimizando las pérdidas en calidad.

Durante el desarrollo e implementación del motor de SR, se añadieron una serie de posibles mejoras para evaluar el impacto de ellas sobre la SR. Estas mejoras abarcan diferentes aspectos como un nuevo tipo de interpolación ponderada, nuevas estrategias para evaluar la fiabilidad de los píxeles súper-resueltos o cambios en el sentido de la estimación de movimiento.

## CONCLUSIONES

---

El objetivo principal del presente Proyecto Fin de Carrera era encontrar un Estimador de Movimiento que minimizara las pérdidas de calidad frente al FS reduciendo de forma drástica el coste computacional. Este objetivo se ha cumplido ya que el Algoritmo de **Nueva Búsqueda en Tres Pasos (NTS)**, consigue perder menos de 0.1 dB de calidad objetiva en promedio siendo su cómputo entre 15 y 20 veces menor, facilitando de esta forma su implementación en un sistema hardware para aplicaciones en tiempo real.

Por otro lado, se han desarrollado diversas aportaciones algorítmicas al proceso de SR obteniendo una mejora apreciable con lo que se abre el camino para futuras investigaciones dentro de este campo.

Por último cabe destacar que este Proyecto Fin de Carrera ha dado pie a la realización de otros dos Proyectos realizados dentro del grupo de investigación, en los cuales se ha conseguido implementar el proceso de Súper-Resolución en un DSP de la casa *Texas-Instrument* alcanzando la tasa de proceso necesaria para tiempo real (en particular, se ha llegado a obtener un pico de 26 fotogramas por segundo).

## ORIGINALIDAD

---

En el actual estado del arte, dentro del campo de mejora de imágenes, el esfuerzo de investigación principal se centra fundamentalmente en tres aspectos, mejora de la calidad o nitidez de la imagen mediante técnicas de desentrelazado, mejora de la tasa temporal de fotogramas o aumento de la resolución de la imagen. En esta última área, la mayoría de las técnicas consisten en aprovechar la información contenida en una única imagen para realizar la propia imagen, siendo la Súper-Resolución una de las pocas técnicas capaces de integrar información de diferentes imágenes en una sola.

La gran mayoría de las técnicas de SR trabajan en el dominio de la frecuencia, con las enormes dificultades que implica esto en cuanto a implementación o alta carga computacional. Es por ello que el novedoso algoritmo de Súper-Resolución Dinámica por Ajuste de Bloques escogido, sin perder calidad frente al resto de opciones, es la idónea para su implementación en un sistema con posibilidades comerciales.

Aún así, el coste computacional sigue siendo muy elevado, aunque menor si lo comparamos con el resto de algoritmos de SR. Es por ello que se estudia cual es el cuello de botella del algoritmo y se propone una solución para el mismo. Tal y como se explicó anteriormente, el Estimador de Movimiento, soporta más del 50% de la carga computacional, lo que lo convierte en un claro candidato a ser mejorado.

En la literatura científica no existe ningún estudio acerca de ningún algoritmo de Estimación de Movimiento por Ajuste de Bloques dentro del proceso de SR así como de su impacto en cuanto a carga computacional o calidad de la secuencia súper-resuelta obtenida. Tal es así que a partir del presente Proyecto Fin de Carrera, se han publicado sus resultados en diferentes congresos y revistas.

En primer lugar, se presentaron los resultados obtenidos en el congreso internacional *"26th International Conference on Consumer Electronics 2008"* celebrado en enero del presente año 2008 en Las Vegas (EE.UU.) mediante el artículo *"Impact of Fast Motion Estimation Algorithms on Super-Resolved Video Sequences"* y se está pendiente de aceptación de la revista asociada al congreso, *"IEEE Transactions on Consumer Electronics"* de carácter internacional del artículo con título: *"Analysis of Fast Block Matching Motion Estimation Algorithms for Reliable Implementations of Video Enhancement Systems"*. Además también, ha sido aceptado el artículo *"Técnicas de Súper-Resolución para la Mejora de Secuencias de Video Comprimido"* en la revista *VECTOR PLUS* de ámbito nacional, para su publicación en el mes de marzo del presente.

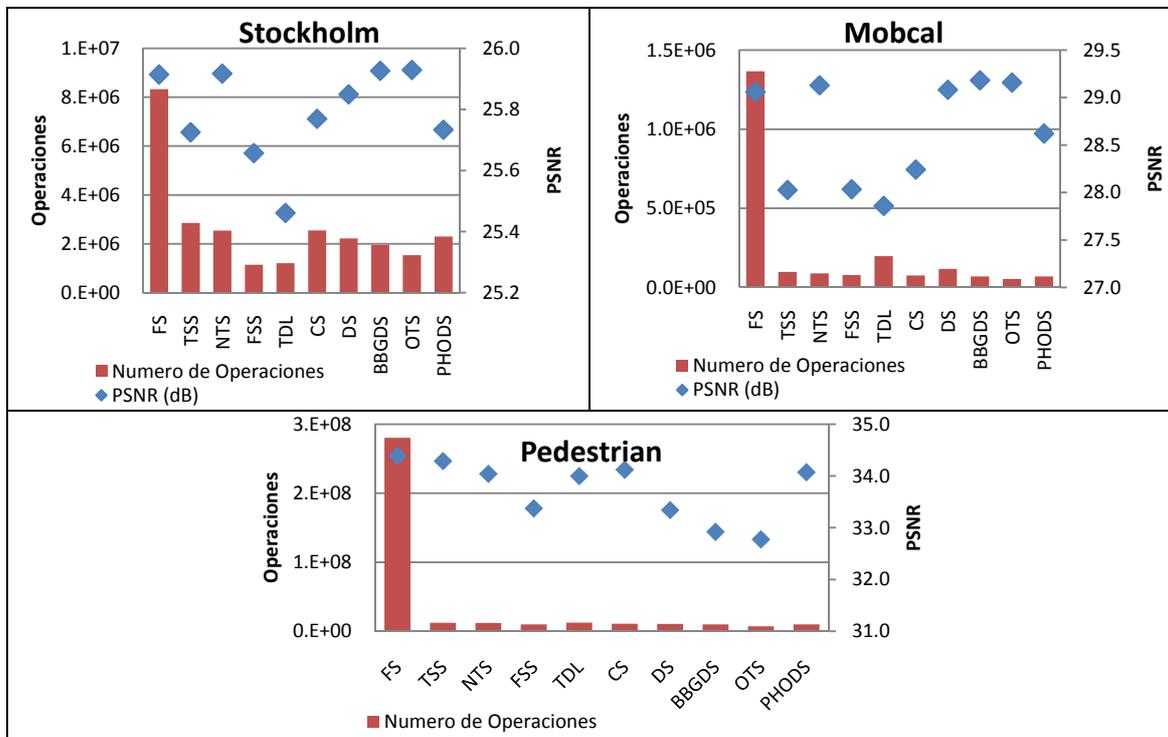
Por último, este proyecto está enmarcado dentro de una de las líneas de investigación prioritarias de la Red Temática **"Procesado de Imágenes y de Señal Multidimensional" (PRISMA)** liderada por el **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)**, dentro del apartado de implementaciones, liderado por el Doctor José F. López, miembro investigador del IUMA y co-tutor del presente Proyecto Fin de Carrera.

## RESULTADOS

Debido a la gran cantidad de simulaciones realizadas (1080 para nueve secuencias), se hace imposible presentar los resultados obtenidos para cada una de ellas. Es por ello que se presentan las gráficas con los resultados más significativos para cada una de las secuencias en forma de breve resumen.

En la Figura 3 se muestran los mejores resultados obtenidos para cada secuencia y para cada algoritmo. En una primera etapa, se utilizan tres secuencias de alta definición y se prueban en ellas los nueve algoritmos rápidos de estimación de movimiento seleccionados más el algoritmo de Búsqueda Exhaustiva (FS). Estos algoritmos son: Búsqueda en Tres Pasos (TSS), Nueva Búsqueda en Tres Pasos (NTS), Búsqueda en Cuatro Pasos (FSS), Búsqueda Logarítmica en Dos Dimensiones (TDL), Búsqueda en Cruz (CS), Búsqueda en Diamante (DS), Búsqueda en Gradiente Descendiente (BBGDS), Búsqueda de Uno por Vez (OTS) y Búsqueda Paralelo Jerárquica en Una Dimension (PHODS). Una vez analizados los resultados para las secuencias de *Stockholm*, *Mobcal* y *Pedestrian* se seleccionan los tres mejores algoritmos (NTS, DS y OTS) y se realiza un nuevo estudio en mayor profundidad con secuencias de tamaño *CIF* ampliamente utilizadas en la literatura científica. Con las nueve secuencias seleccionadas, se cubren todos los tipos posibles de movimiento en un vídeo, global, local, rápido lento, con objetos sin ellos, etc.

Para medir la calidad de la secuencia súper-resuelta, se usa el **Peak to Signal Noise Ratio (PSNR)** que representa una medida objetiva de la semejanza entre dos imágenes, con lo que podemos comparar el resultado obtenido por cada simulación con el resultado ideal. El PSNR se representa en forma de diamante en la Figura 3, mientras que el número de operaciones realizadas por cada Estimador viene representado en forma de barra vertical. Sobre el eje de abscisas se muestran los resultados obtenidos para cada Algoritmo de Estimación de Movimiento.



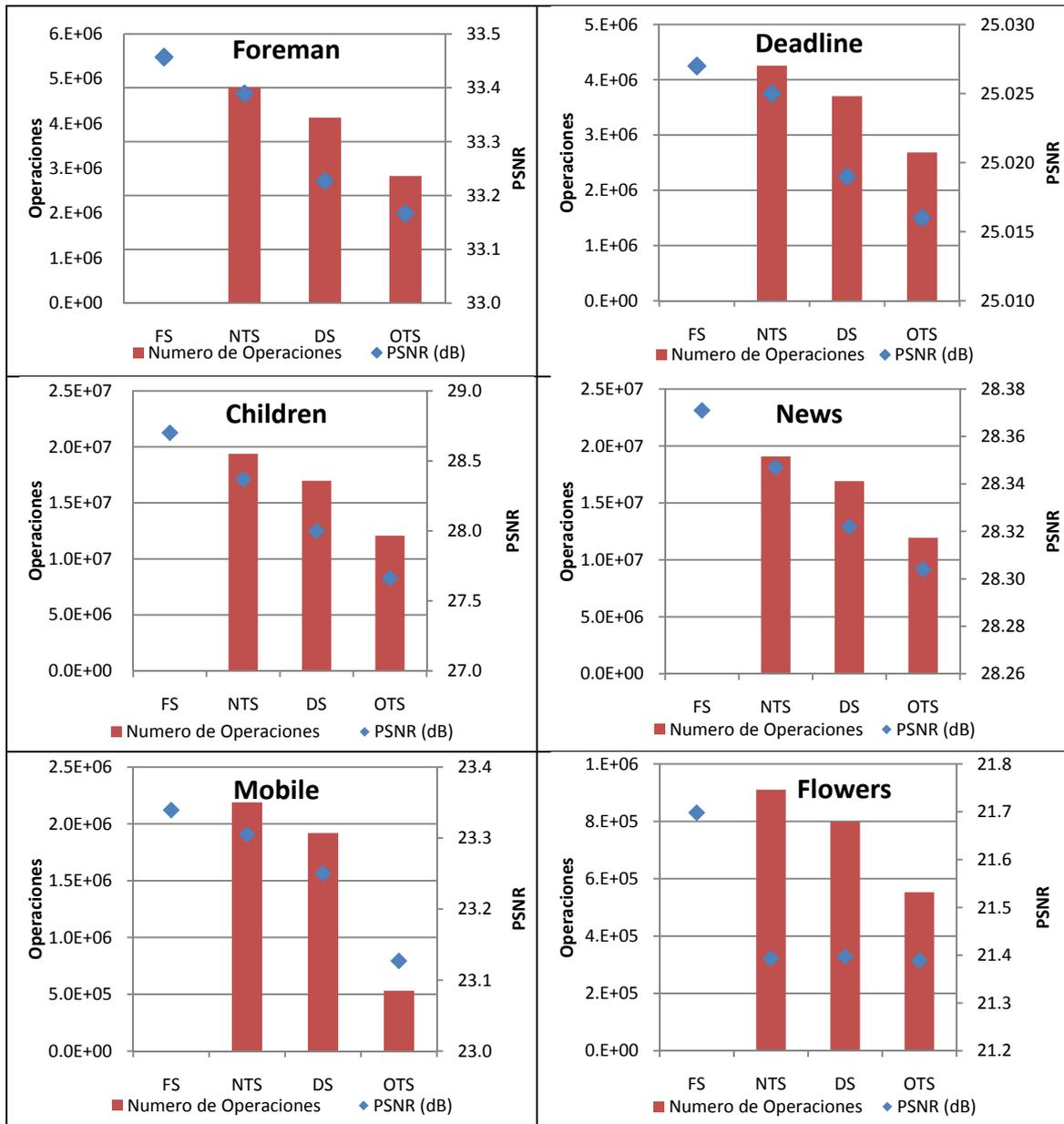


FIGURA 3: RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS DIFERENTE SECUENCIAS SIMULADAS

En la Tabla I se muestra un breve resumen donde se observan las diferencias en cuanto a calidad de los algoritmos que mejores resultados han obtenido con respecto al algoritmo de Búsqueda Exhaustiva, que recordemos, es el algoritmo ideal para la Estimación de Movimiento por Ajuste de Bloques.

TABLA I  
PROMEDIO RESULTADOS PARA SECUENCIAS CIF

Algoritmo	Operaciones (10 <sup>8</sup> )	% Operaciones con respecto al FS	PSNR (dB)	Perdidas PSNR(dB)	SD perdidas PSNR (dB)
NTS	3.25	5.66%	26.78	0.09	0.11
DS	2.81	4.91%	26.68	0.19	0.24
OTS	1.98	3.46%	26.57	0.29	0.35

En esta tabla se puede observar como el NTS obtiene un rendimiento excelente en comparación al FS con una aceleración cercana a las veinte veces. Además, a pesar de tener un poco más de cálculo que el resto de algoritmos, obtiene un rendimiento superior y sobre todo mucho más estable, con leves pérdidas frente al FS obteniendo una desviación estándar sobre las pérdidas de PSNR de tan solo 0.11 dB.

De las diferentes aportaciones algorítmicas implementadas, se obtienen resultados satisfactorios y esperanzadores requiriendo un estudio en mayor profundidad. En la Figura 4 se muestra una de las aportaciones diseñadas, la interpolación ponderada, en la que se puede llegar a conseguir un grado de mejora apreciable. En la gráfica está representada la diferencia de PSNR entre el resultado obtenido por la SR típica (que determina el nivel de 0 dB) y los diferentes tipos de interpolación.

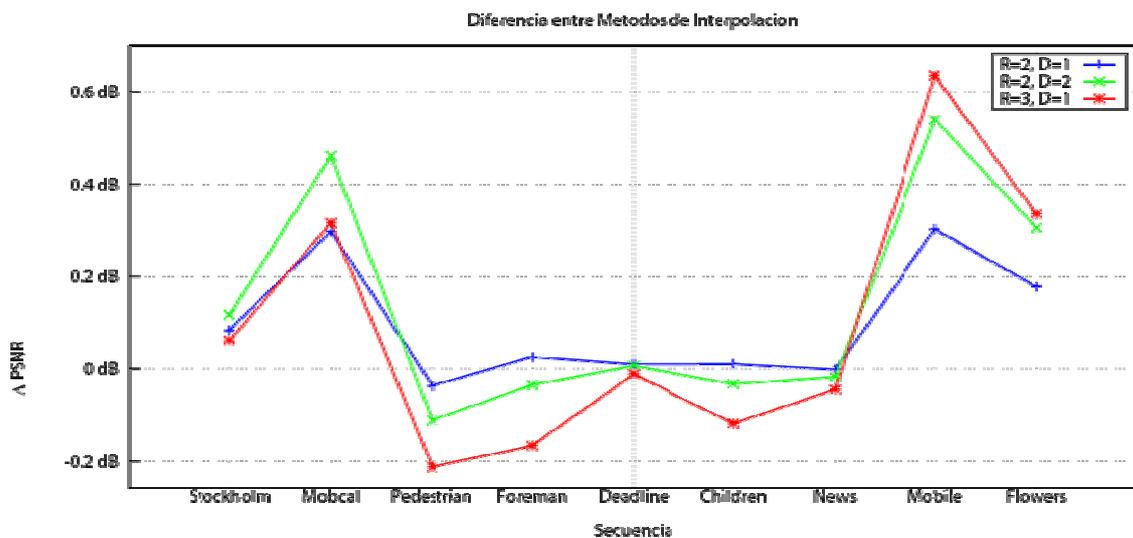


FIGURA 4: MEJORAS ALGORÍTMICAS AL PROCESO DE SÚPER RESOLUCIÓN.

Por último, se muestran la propia secuencia Súper-Resuelta y un detalle de los resultados obtenidos, donde se observan las grandes diferencias entre la Súper-Resolución y la interpolación y entre los diferentes estimadores de movimiento.



FIGURA 5: DETALLES DE LAS SECUENCIAS INTERPOLADAS Y SÚPER-RESUELTAS.

## APLICABILIDAD (ERICSSON)

---

La tendencia actual dentro del mundo multimedia viene dominada por dos vertientes, **Movilidad** y **Alta definición**. En la primera prima lo ligero, rápido y de bajo coste, mientras que en la segunda se persigue la máxima calidad y máxima fidelidad de la imagen. La Súper-Resolución tiene un papel importante en ambos casos.

En cuanto a la movilidad, cada vez se consigue una mayor integración de los dispositivos portátiles, con unas mayores prestaciones y un mayor número de aplicaciones integradas. Una de estas aplicaciones es la visualización de vídeos, que se ve restringido en la mayoría de las ocasiones por el ancho de banda disponible. Es por este motivo, que un aumento en la calidad del vídeo sin requerir un aumento del ancho de banda es un objetivo ampliamente perseguido por la industria.

Este aumento de calidad puede ser cubierto por la Súper-Resolución, ya que se puede enviar imágenes en baja resolución, procesarlas y obtener imágenes de alta resolución, usando un ancho de banda muy pequeño en comparación a si se tendría que usar un ancho de banda para un vídeo de alta resolución directamente. Esto se puede aplicar directamente a videoconferencia, vídeo bajo demanda, o simplemente a contenidos descargados directamente de la red.

Movilidad también viene intrínsecamente asociado a bajo consumo, y en el ámbito de la computación bajo consumo significa menos operaciones, que es al fin de cuentas, lo que se ha conseguido en este proyecto.

Es sobre todo en este tipo de contenidos en que el usuario necesita una satisfacción inmediata donde entra en juego la necesidad de una Súper-Resolución de bajo coste computacional, ya que si el tiempo de cómputo fuera elevado, tal vez sería más rentable para el usuario descargarse el contenido en alta calidad directamente sin necesidad de proceso.

La Alta Definición ha irrumpido de pleno en la gran mayoría de hogares, con todas las mejoras que ello implica, pero con un problema fundamental, los contenidos antiguos no están preparados para tales resoluciones. Una de las diferencias fundamentales entre las diferentes calidades de televisiones viene dada por la calidad de su *up-sampler*, que es el dispositivo que se encarga de re-escalar el tamaño de una imagen en Definición Estándar. Obviamente la Súper-Resolución es un claro candidato para estos sistemas ya que promete calidades superiores tanto objetiva como subjetivamente. Pero otra vez nos encontramos con el problema del cómputo, maximizado en este caso por el tamaño del vídeo a tratar. Es por ella que una SR rápida y funcional es crítica para que pueda ser implementada.

Además no sólo se puede aplicar SR en estos campos ya que en cualquier situación en que se requiera un aumento o mejora de la resolución, como en el zoom digital de una cámara de vídeo, encaja perfectamente la SR.

Por último, cabe destacar que el presente Proyecto Fin de Carrera ha servido como punto de partida para una línea de investigación de la DSI del IUMA para integrar la Súper-Resolución en diversas plataformas *Hardware* con enfoque multimedia como el *DSP Da-Vinci* de *Texas-Instrument* o sobre *CELL* basada en la *PlayStation 3*.