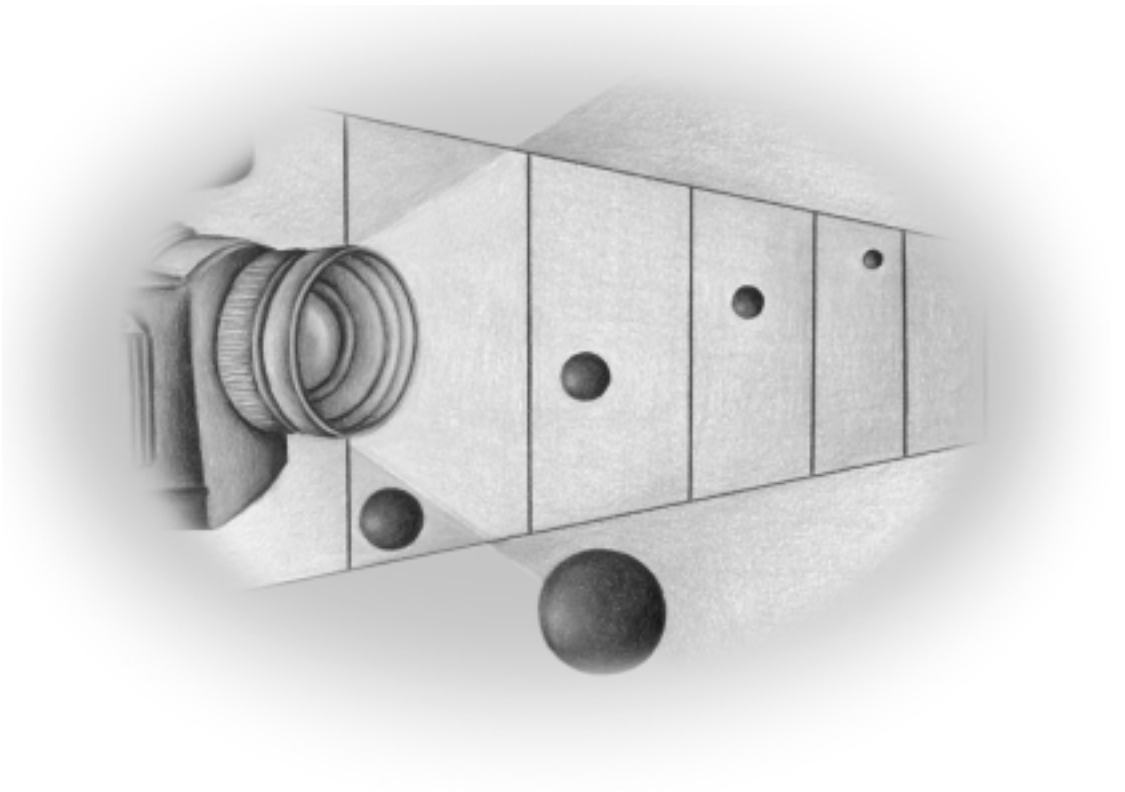


# Principios de tratamiento de la imagen (1<sup>a</sup> parte)





## Índice

---

<b>Etapa 1: Introducción, principios básicos y área de aplicación .....</b>	<b>5</b>
<b>Tratamiento y transmisión de imágenes a distancia:</b>	
<b>precedentes históricos .....</b>	<b>5</b>
<b>Ventajas e inconvenientes del tratamiento</b>	
<b>y transmisión de imágenes digitales .....</b>	<b>6</b>
<b>Áreas de aplicación del tratamiento digital de imagen .....</b>	<b>8</b>
Mejora y restauración de imágenes .....	8
Visión artificial y reconocimiento de imágenes .....	9
Compresión de imagen.....	9
<b>Etapa 2: Conceptos elementales: representación de imágenes .....</b>	<b>11</b>
<b>La imagen digital: notación y nociones básicas.....</b>	<b>11</b>
Elementos de imagen.....	11
Componentes de color.....	12
Niveles de cuantificación de la imagen.....	14
Normalización del nivel de gris .....	16
Número de muestras: tamaño de la imagen.....	16
<b>Principios generales de mejora de imágenes .....</b>	<b>16</b>
Métodos directos .....	17
<b>Etapa 3: Transformaciones punto a punto .....</b>	<b>19</b>
<b>Concepto de transformación puntual .....</b>	<b>19</b>
<b>Características generales de una transformación puntual .....</b>	<b>20</b>
<b>Histograma de una imagen .....</b>	<b>21</b>
<b>Interpretación del histograma .....</b>	<b>21</b>
<b>Transformaciones puntuales más representativas .....</b>	<b>22</b>
<b>Negativo de una imagen .....</b>	<b>23</b>
<b>Enfatización de contraste.....</b>	<b>24</b>
Binarización .....	28
<b>Clipping .....</b>	<b>29</b>
<b>Corrección gamma .....</b>	<b>31</b>
<b>Pseudocolor .....</b>	<b>33</b>
<b>Ajustes de brillo, contraste y saturación .....</b>	<b>35</b>
<b>Etapa 4: Ecuación de histogramas .....</b>	<b>37</b>
<b>Ecuación de histogramas .....</b>	<b>37</b>
Cálculo de la función de ecuación: aproximación continua .....	38
Cálculo de la función de ecuación: aproximación al caso discreto .....	39
Propiedades de la función de ecuación.....	42

<b>Tratamiento de la información de color</b> .....	44
Aplicación de la transformación puntual a los componentes de color por separado (corrección de las componentes) .....	45
Aplicación de la transformación puntual al componente de luminancia (corrección de intensidad) .....	46
<b>Transformaciones puntuales de ámbito local</b> .....	48

## Etapa 1: Introducción, principios básicos y áreas de aplicación

### Tratamiento y transmisión de imágenes a distancia: precedentes históricos

---

La posibilidad de realizar un muestreo de una imagen y después procesarla digitalmente mediante algoritmos matemáticos supuso un fuerte impacto tecnológico que incidió en campos tan variados como la robótica, el control de procesos, las comunicaciones, los sistemas multimedia, etc.

Las primeras aplicaciones comerciales en las que intervienen imágenes digitalizadas se remontan a 1920, momento en el que aparecen los primeros sistemas de codificación de imágenes para la transmisión de fotografías entre periódicos vía cable submarino entre Londres y Nueva York.

Es evidente que estos sistemas eran muy primitivos, pero ya incluían aspectos elementales de codificación de la imagen (manejo de hasta cinco niveles distintos de gris ya en 1920) y técnicas básicas para la mejora de la calidad de la imagen (selección de procedimientos de impresión, impresoras basadas en semitonos de gris, etc.). La velocidad de transmisión era muy lenta, ya que se requería un tiempo aproximado de 3 horas para la transmisión de una única fotografía. Sin embargo, comparado con los métodos tradicionales de transporte marítimo (varias semanas), resultaba ser muy eficiente, de manera que se produjo un rápido desarrollo orientado a mejorar la calidad y la eficiencia de estos primeros equipos. En estos primeros sistemas, el tratamiento de la imagen se realizaba combinando técnicas fotográficas y de impresión que eran fundamentalmente manuales.

El tratamiento digital de la imagen, tal y como se entiende hoy día, surge cuando se empiezan a aplicar técnicas de procesamiento automático de la imagen mediante computadoras digitales. Se suele considerar que la primera aplicación dentro de este campo fue la corrección de distorsiones geométricas de cámara en las imágenes de la Luna transmitidas por la sonda espacial Ranger 7, que fueron procesadas por el Laboratorio de Propulsión Espacial de Pasadena (California) en 1964. A partir de este momento se produce una rápida evolución e implantación de estos métodos, tanto en el entorno industrial como en el de las comunicaciones, que está vinculado directamente con el progreso en capacidad de cálculo y memoria de los ordenadores digitales.



Imagen transmitida por cable entre Londres y Nueva York en 1929. La imagen corresponde a los generales Pershing y Foch y está codificada con 15 niveles de brillo (tecnología disponible en 1929).

## Ventajas e inconvenientes del tratamiento y transmisión de imágenes digitales

Ventajas	Inconvenientes
Fuerte protección ante el ruido	Ruido de cuantificación
Inexistencia de derivas	Aumento del ancho de banda de la señal
Tratamiento de señal de gran versatilidad y complejidad	Dificultad en la edición de señales
Facilita la encriptación de los datos y el acceso condicional	
Uso de códigos de protección frente a errores	

- Fuerte protección ante el ruido de la información de carácter binario, lo que permite obtener una gran calidad de imagen en los sistemas de comunicaciones que transmiten imágenes digitales. En sistemas de registro de señal de vídeo en formato digital, pueden obtenerse múltiples generaciones de copias manteniendo una elevada calidad de la señal.
- Inexistencia de derivas de los sistemas de proceso de la señal. Uno de los problemas inherentes a los sistemas analógicos son las derivas temporales de los elementos que integran el sistema, así como su dependencia con la temperatura, humedad, etc. En los sistemas digitales, el proceso se realiza mediante unidades de proceso de datos cuyas derivas temporales son inexistentes.
- Tratamiento de señal de gran versatilidad y complejidad. El procesado de la señal se realiza mediante procesadores en coma flotante o coma fija que, con la programación adecuada, pueden implementar complejas operaciones matemáticas sobre la señal. El tratamiento digital de la información facilita el cálculo de logaritmos, funciones exponenciales, transformaciones de datos en dominios alternativos, etc., que son funciones difícilmente realizables mediante sistemas analógicos. Además, si el diseño del entorno *hardware* es correcto, las operaciones que se aplican a la señal son fácilmente modificables, ya que sólo hay que reprogramar las rutinas de proceso de la señal.

- Facilita la encriptación de los datos y el acceso condicional, puesto que la naturaleza binaria de los datos permite enmascarar la información mediante secuencias pseudoaleatorias que el receptor autorizado puede reproducir con facilidad, pero que son difícilmente generables si no se dispone de información acerca de los parámetros mediante los cuales se genera el enmascaramiento.
- Permite utilizar códigos de protección frente a errores que introducen un cierto grado de redundancia en la información para facilitar la detección, e incluso corrección, de posibles errores en la transmisión o almacenamiento de los datos.
- Ruido de cuantificación inherente a toda digitalización de una señal analógica. En efecto, las muestras de la señal analógica original deben aproximarse por palabras código que tienen un número de bits finito ( $N$  bits). Por lo tanto, el valor real de la señal tiene que ser aproximado, ya que el sistema sólo admite un número finito de valores posibles ( $2^N$  valores). Esta aproximación es equivalente a suponer que aparece un ruido superpuesto a la señal y que modifica su valor real por un valor aproximado. No obstante, el nivel de ruido dependerá de la precisión del sistema que se puede controlar modificando el número de bits con el que se codifica cada palabra. Hemos visto en el módulo “Introducción”, que el número de bits con que se representa cada muestra debe tener en cuenta las características del sistema visual para garantizar que el espectador es incapaz de diferenciar entre las imágenes analógicas originales y las digitalizadas. Si se verifican estas condiciones, el ruido de cuantificación no será observable, por lo que sus efectos se pueden despreciar.
- El ancho de banda nominal de las señales aumenta considerablemente. En efecto, tal y como se ha visto en el módulo “Introducción”, la digitalización de una señal de vídeo en color, en el formato 4:2:2 de la recomendación ITU-R BT 601, requiere un total de 216 Mbps dedicados en exclusiva a la información de vídeo (es decir, sin tener en cuenta los componentes de audio o señales de control). Si este flujo de datos se transmitiera directamente exigiría, con independencia del tipo de modulación digital utilizado, un canal con un ancho de banda muy superior al de la señal de vídeo en banda base (5 MHz aproximadamente). Sin embargo, veremos que en la práctica este ancho de banda puede reducirse de una forma considerable si se utilizan algoritmos de compresión de la señal de vídeo adecuados, y que incluso permitiría obtener señales de calidad de radiodifusión con anchos de banda inferiores al de la señal analógica.
- Los editores de señal de televisión analógicos requieren una perfecta sincronización de las señales que se pretenden mezclar o editar. No obstante, una vez hemos obtenido la garantía de que las señales están bien sincronizadas, el corte, la mezcla o la inserción pueden realizarse sin mayores dificultades mediante circuitos analógicos muy sencillos. En el caso de señales digitales, el tren de datos binario suele incorporar, además de la información de vídeo, otras señales de control, protección frente a errores, sincronismos, inicializaciones de trama, etc. Por este motivo, la edición de las señales en formato digital exige tener en cuenta todos

estos elementos, por lo que el subsistema de edición suele ser de una mayor complejidad tecnológica que su equivalente analógico. Sin embargo, esto no siempre tiene una repercusión directa sobre el precio, ya que, con los sistemas de producción actuales, pueden obtenerse complejos subsistemas de tratamiento digital a costes reducidos.

## Áreas de aplicación del tratamiento digital de imagen

---

### Mejora y restauración de imágenes

Consiste en el diseño de algoritmos y procedimientos que acondicionen la imagen adquirida por el sensor. Es un área básica que en la práctica se emplea en casi todas las aplicaciones y cuyos algoritmos dependen de si la información final debe ser manipulada por un ordenador (para el caso de visión artificial) o si, por otra parte, debe ser presentada a un espectador humano. En el primer caso, el acondicionamiento de la imagen consiste en extraer toda aquella información que se considera irrelevante para el sistema que finalmente deberá procesar la señal. En el supuesto de que el usuario final sea un espectador humano, el objetivo y la metodología dependen en gran medida de la aplicación y pueden consistir en corregir los posibles defectos del sistema de adquisición, cancelar los errores originados por ruidos o interferencias en el sistema de transmisión, reducir los efectos de una incorrecta iluminación de la imagen original, etc.

En general, si las operaciones que se aplican a la imagen no utilizan un modelo explícito sobre la causa que ha provocado la degeneración de la imagen, se habla de **métodos para la mejora de imágenes** (*image enhancement*). Por el contrario, cuando el acondicionamiento de la imagen se basa en modelos sobre los fenómenos físicos que han producido la pérdida de calidad, éstos se conocen como **métodos de restauración de imágenes** (*image restoration*).

El uso de una u otra técnica depende, en cierto modo, de la información que se disponga acerca del sistema con el que se ha adquirido la imagen. Los métodos de restauración de imágenes suelen tener una fuerte componente analítica que trata de sintetizar el sistema inverso que ha originado la degradación de la imagen. Los resultados suelen ser espectaculares, siempre y cuando el modelo utilizado se ajuste a la realidad. No obstante, en muchos casos sólo se pueden realizar aproximaciones al modelo en el que, además, un buen número de parámetros se mantienen desconocidos, con lo cual obtenemos unos resultados menos espectaculares. Por tanto, se utilizan básicamente en aquellas aplicaciones en las que existe un buen modelo de la causa degradante. Entre las aplicaciones principales destaca la restauración de viejas fotografías, la corrección de efectos de desenfoque de la óptica o del movimiento de la cámara, etc.



En la mayor parte de las aplicaciones que se consideran en este texto sólo se utilizan los métodos de mejora de imágenes que, en casi todos los casos, cuentan con una formulación y un tratamiento mucho más simple. La selección de uno u otro método depende, en parte, de la experiencia del diseñador para determinar la naturaleza de los problemas que aparecen en la imagen. En algunas ocasiones suele existir un proceso interactivo de prueba y error en la selección de los parámetros básicos, que una vez establecido se aplica de manera sistemática a la imagen. Entonces examinaremos con cierto detalle los procedimientos más utilizados para la mejora de imágenes en este mismo módulo.

### **Visión artificial y reconocimiento de imágenes**

En estas aplicaciones, el objetivo es identificar uno o más elementos característicos dentro de la imagen, controlando algún dispositivo físico en función del resultado de la identificación. Las aplicaciones son muy variadas y abarcan aspectos tan distintos como el control de calidad en procesos de producción, el control de movimientos de máquinas y robots, la identificación automática de usuarios, el reconocimiento óptico de caracteres, etc. El diseño de estos sistemas suele presentar una cierta dependencia con la misma aplicación y engloba desde el sistema de formación de imágenes (selección de la cámara, entorno, iluminación), el procesado de señal para el acondicionamiento y mejora de las imágenes obtenidas, la identificación de la región de interés en la imagen, la segmentación y extracción de la información relevante, la representación y descripción de la información, la gestión de las bases de datos necesarias hasta, para finalizar, el reconocimiento de la señal.

### **Compresión de imagen**

En general, la codificación de cualquier señal digitalizada se refiere al conjunto de reglas mediante las cuales se define el formato de datos binario utilizado para transmitir o almacenar la información. Por tanto, la codificación define la secuencia de operaciones que se deben aplicar a la señal digital hasta obtener la forma de onda que finalmente se enviará al modulador para su transmisión o almacenamiento. Este procedimiento, a su vez, tendrá que ser invertible, es decir, será preciso que podamos recuperar la información original, o por lo menos de forma aproximada, mediante un sistema que recibe el nombre genérico de decodificador. Esta definición tiene un carácter muy general y da lugar a que el problema de la codificación/decodificación se divida en distintas subáreas en las que se consideran problemas conceptualmente distintos.

Así, suelen diferenciarse los denominados sistemas de codificación de fuente y los de codificación de canal. Los primeros se orientan a obtener una representación eficiente de la información y fundamentalmente consisten en extraer parte de la información redundante que hay en la señal para reducir, en la medida de lo posible, el número de bits que representa la señal. Por el contrario, la codificación de canal consiste en proporcionar la adecuada protección a los datos para acondicionarlos de este modo a las características del canal o del soporte. La codificación de canal suele in-

corporar códigos para la protección de la señal frente a errores y establece las formas de onda adecuadas para la transmisión de la información.

En general, la codificación de imagen se refiere en exclusiva al proceso de codificación de fuente, puesto que ésta se tendrá que diseñar de una manera específica para las características de la señal y, por supuesto, del sistema visual humano. Así pues, como podemos ver, la codificación de canal se ve directamente condicionada por las características del canal de comunicaciones o del soporte. En el caso concreto de los sistemas de radiodifusión de televisión digital actuales, la codificación de imagen o de fuente se establece mediante las normativas MPEG, mientras que el tipo de modulación utilizado se considera en los distintos formatos de DVB (*Digital Video Broadcasting*), que evidentemente dependen del canal utilizado para la transmisión (satélite, TV terrena, cable, etc.).

En este texto nos concentraremos fundamentalmente en las áreas de mejora de imagen y compresión. La primera de estas áreas será esencial en aplicaciones multimedia al proporcionar las bases científicas necesarias para comprender los distintos procedimientos de mejora y manipulación de imágenes, tanto para imágenes estáticas como secuencias de vídeo. Los procedimientos que presentaremos permiten comprender los algoritmos matemáticos que utilizan los principales programas comerciales de retoque fotográfico para mejorar la calidad de las imágenes o manipular su contenido. Se estudiarán conceptos como el histograma de la imagen, las curvas de retoque de componentes de color, el ajuste de brillo, contraste y saturación, la ecualización de histogramas, los filtros de desenfoque, los filtros de mediana, las distorsiones geométricas, la interpolación de imágenes, la fusión de imágenes, etc. Si bien muchos de estos algoritmos pueden utilizarse sin necesidad de conocer a fondo los procedimientos matemáticos implicados, también es cierto que su conocimiento simplifica considerablemente la tarea de acondicionar una imagen y, al mismo tiempo, reduce de manera apreciable el tiempo que se dedica al proceso de retoque.

La codificación y decodificación de imágenes y secuencias de vídeo también son de gran importancia en el desarrollo de aplicaciones multimedia. El hecho de conocer los principios de funcionamiento de los principales *codec* (CODificador/DECodificador) ayuda a su selección en función de las necesidades de la aplicación, y también permite comprender de una forma lógica el proceso de selección de parámetros y prever las calidades finales que obtendremos con cada uno de éstos.

## Etapa 2: Conceptos elementales: representación de imágenes

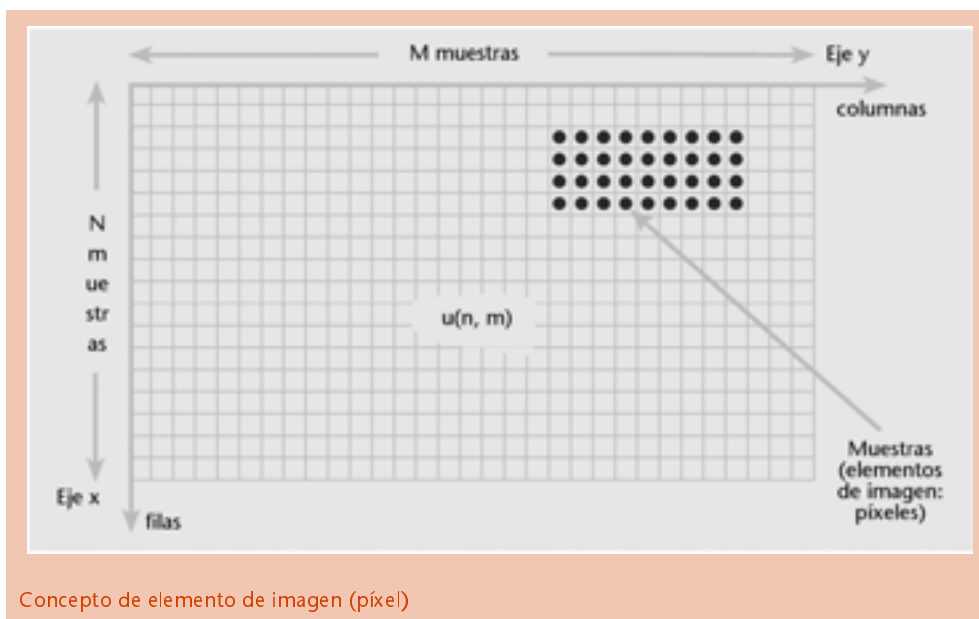
### La imagen digital: notación y nociones básicas

#### Elementos de imagen

En el entorno del presente texto entenderemos que una imagen digital se obtiene como resultado de tomar muestras sobre una retícula rectangular como la que se representa en la siguiente figura, sobre los componentes de color de un fotograma de la escena. El resultado de este muestreo produce tres matrices que se denotan como:

$$u_R[n, m]; u_G[n, m]; u_B[n, m]. \quad 0 \leq n \leq N-1; \quad 0 \leq m \leq M-1,$$

donde la variable  $n$  indica la fila y  $m$ , la columna de la matriz; la ecuación anterior supone que se toman  $N$  muestras en el sentido vertical y  $M$ , en el sentido horizontal. Resulta evidente que el número de muestras adecuado dependerá de las dimensiones de la imagen, la distancia desde la cual se debe observar, su relación de aspecto y, en algunos casos, de las características de la cámara o del sistema de adquisición. Las muestras en sí mismas se denominan elementos de imagen o, usando la abreviación anglosajona, *pixels* (*picture elements*).



La imagen se puede representar como un conjunto de tres matrices (una por cada componente de color), donde los píxeles son los elementos de estas matrices.

---

*Procesar digitalmente una imagen consiste en aplicar transformaciones sistemáticas sobre la matriz que representa la imagen.*

---

### Componentes de color

Los componentes de color con que se representa una imagen dependen, en general, del tipo de aplicación y de la fuente a partir de la cual se ha obtenido la imagen.

En las aplicaciones de visión por ordenador o retoque de fotografías es habitual utilizar los componentes de color R, G y B. En este caso, la imagen se representa mediante tres matrices que están en función de los niveles de cada uno de los componentes de color. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de esta descomposición en componentes de color.

---

*El tratamiento digital de la imagen puede aplicarse de forma independiente a cada uno de los componentes de color.*

---



Descomposición de una imagen en los componentes de color RGB.

En una gran cantidad de aplicaciones de reconocimiento de imagen o visión artificial es habitual trabajar con un único componente, ya que la información de las tres matrices de color puede resultar redundante para muchos de los problemas que se pretenden resolver. Consideremos, por ejemplo, el caso de los sistemas de reconocimiento automático de caracteres, en los que la información que se debe reconocer está en blanco y negro. En este caso, los componentes de color no aportan ninguna información adicional, por lo que resulta preferible utilizar un único componente para reducir el tiempo de proceso. Prestemos atención al hecho de que, no obstante, en aquellos problemas de reconocimiento en que se pueda extraer información útil del color, será recomendable hacer uso de ésta (por ejemplo, en el reconocimiento de objetos por sus propiedades de color).

Cuando se utiliza un único componente para representar la imagen, generalmente se trata de la información de luminancia (componente utilizado en la televisión en blanco y negro), un componente que se puede obtener a partir de los componentes de color, mediante el uso de la siguiente relación:

$$u_{B\&W}[n,m] = 0,3 \cdot u_R[n,m] + 0,59 \cdot u_G[n,m] + 0,11 \cdot u_B[n,m]$$

En la figura que podemos ver a continuación se muestra esquemáticamente el proceso que se sigue a la hora de convertir la información de color en información en blanco y negro.

En algunas aplicaciones, como la exploración de imágenes de la tierra por medio de satélite o imágenes médicas, se utilizan sensores de imagen que usan regiones del espectro radioeléctrico distintas de la visible. En estos casos, la imagen que finalmente se procesa puede corresponder a bandas del ultravioleta, infrarrojo, etc. Por otra parte, también es habitual trabajar con varios tipos de sensores, por lo que el procesado se realiza utilizando, en algunas ocasiones, más de tres componentes, lo que se conoce como procesado multiespectral.



En tratamiento de señales de vídeo o televisión, los componentes más utilizados son Y, U y V. El primer componente coincide con la información de luminancia y los otras dos se denominan señales diferencia de color y se obtienen como la diferencia entre un componente de color y la luminancia.

El uso de estos tres componentes en sustitución de los componentes RGB se debe, fundamentalmente, a que el sistema visual humano presenta una menor resolución espacial en los componentes de color que a los de luminancia, lo cual permite que se pueda reducir el número de muestras de los componentes que proporcionan la información de color (U y V) sin que se produzca, por este motivo, una pérdida aparente de calidad. Otra razón para el uso de los componentes YUV es de carácter histórico, y se debe a criterios de compatibilidad entre los sistemas de televisión analógicos en blanco y negro y los sistemas en color. En cualquier caso, los estándares de compresión más usuales (JPEG, JPEG200, MPEG1, MPEG2, MPEG4) utilizan generalmente una representación de las imágenes basada en componentes YUV.

La conversión entre los componentes RGB y los YUV se puede llevar a cabo utilizando la siguiente transformación matricial:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3 & 0,59 & 0,11 \\ -0,15 & -0,3 & 0,44 \\ 0,61 & -0,51 & -0,1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

La conversión entre YUV y RGB se puede obtener mediante el uso de la relación inversa.

En muchos casos, la selección de unas u otras componentes para representar las imágenes en color depende del tipo de dispositivo de captura. En cámaras profesionales o para visión industrial es habitual disponer de los componentes RGB como señales de salida, por lo que este espacio de representación es el más usual. Si se desea trabajar con componentes YUV, es necesario realizar la conversión implícita en la relación matricial anterior.

En cámaras domésticas o semiprofesionales las salidas más habituales son las de vídeo compuesto o S-vídeo; en ambos formatos obtendremos directamente los componentes YUV, por lo que será necesario que apliquemos la transformación inversa si deseamos trabajar con componentes RGB.

En el desarrollo de *drivers* de impresora o programas de gestión de impresión, los componentes de color son los colores complementarios CMY (cian, magenta y amarillo); cuando la impresión se realiza combinando componentes de color con tinta negra se utiliza el espacio CMYK.

En programas de gestión del color suelen utilizarse espacios de color universales, con lo que resulta más simple representar las imágenes y prever cómo se mostrarán o capturarán en los distintos dispositivos (monitor, escáner, impresora, etc.). Los espacios de color más habituales son el XYZ, CIE Lab y RGBs, entre otros, y en todos los casos existen matrices de conversión que permiten pasar de una representación de color a otra.

Con objeto de simplificar la exposición, cuando el procedimiento de mejora de la imagen pueda aplicarse indistintamente a los tres componentes de color, admitiremos tácitamente que se aplica sobre una señal en blanco y negro. Por otra parte, en caso de tratar con imágenes en color se puede aplicar la misma metodología de proceso a cada uno de los componentes.

### Niveles de cuantificación de la imagen

Si la imagen se ha conseguido a partir de un fotograma analógico, la relación espacial entre la imagen analógica y la digital puede obtenerse como:

$$u_{\alpha}[n, m] = Q(r_{\alpha}(\Delta x \cdot n, \Delta y \cdot m)),$$

donde  $\alpha$  representa un componente de color genérico y  $D_x$ ,  $D_y$ , el espaciado entre las muestras en los ejes  $x$  y  $y$ . La función  $Q$  representa la cuantificación, como palabra binaria, del valor que toma el componente de color  $\alpha$ .

En la mayor parte de las aplicaciones se considera suficiente que las muestras se cuantifiquen utilizando 8 bits. Por lo tanto, supondremos que el margen de posibles valores que pueden tomar las muestras de la imagen son enteros situados entre 0 y 255, en los que 0 y 255 representan el valor mínimo y máximo, respectivamente, del componente de color. No obstante, en algunas aplicaciones concretas, este valor puede aumentar hasta 12 bits o también reducirse hasta 3 ó 4 bits (cuando se consideren estos casos, siempre estarán detallados con precisión).

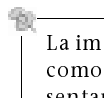
En la siguiente figura se muestra la misma imagen representada con un número de bits distinto:



En muchas aplicaciones, podemos prescindir del número de bits con el que se codifican las muestras, por lo que escribiremos:

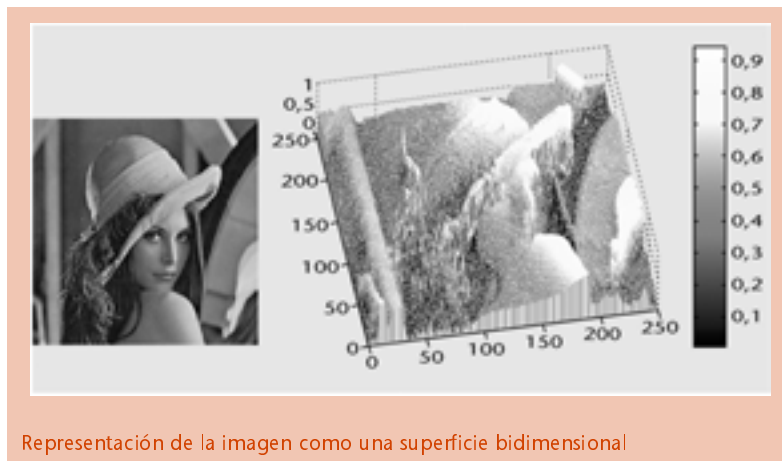
$$u_{\alpha}[n, m] = r_{\alpha}(\Delta x \cdot n, \Delta y \cdot m),$$

suponiendo que el cuantificador se halla implícito en la operación de muestreo.



La imagen queda, en tal caso, representada como una matriz cuyos elementos representan el nivel de gris de cada píxel. Desde un punto de vista matemático, esta matriz puede identificarse al muestreo de una superficie. Los niveles más próximos al blanco son los puntos más altos de la superficie y los más oscuros, los más bajos. Esta interpretación de la imagen como superficie bidimensional (observad la figura adjunta)

es útil para plantear, desde un punto de vista formal, problemas como la detección de los contornos de la imagen o la segmentación en los objetos que la constituyen. Así, la operación de determinar los contornos de un objeto puede identificarse como la operación matemática de identificar los puntos en los que se produce la máxima variación de nivel de la superficie (gradiente).“



## Normalización del nivel de gris

La representación de cada componente de color mediante 8 bits es el formato que se ha difundido de una manera más extensa, lo cual significa que los niveles de la imagen estarán situados entre 0 (nivel mínimo que representa el negro) y 255 (nivel máximo que representa el blanco). No obstante, en algunas aplicaciones profesionales empiezan a utilizarse sistemas de cuantificación que usan 10 o hasta 12 bits. Con esto, el nivel máximo puede tomar el valor 1.024 (10 bits) o 4.096 (12 bits).

En muchos casos resulta útil normalizar el nivel de gris máximo a la unidad, por lo que la representación interna de la imagen y la interpretación de los resultados será independiente del número de bits. Con imágenes normalizadas, el nivel 0 representa el negro y el nivel 1, el blanco, de modo que las diferentes gradaciones de gris estarán comprendidas entre el 0 y el 1. En general es sencillo identificar, a partir del contexto, si nos estamos refiriendo a niveles normalizados o a niveles enteros.

## Número de muestras: tamaño de la imagen

El número de filas y de columnas que se consideran en una imagen depende de varios factores: distancia a la que se llevará a cabo el visionado, tamaño con el que se representará la imagen final, etc. Como hemos podido ver anteriormente, para disponer de una calidad parecida a la de la televisión analógica es necesario que las imágenes sean de  $576 \times 768$  elementos.

En la figura se muestra el efecto del cambio de resolución en una imagen:



## Principios generales de mejora de imágenes

---

En el terreno de la mejora de imágenes podemos distinguir dos tipos de sistemas de procesado:

- 1) Métodos directos.
- 2) Métodos transformados.



En los métodos directos, la mejora de imagen se realiza manipulando directamente, como su propio nombre indica, los niveles de gris de la imagen. En cambio, los métodos transformados se basan en realizar primero una transformación de la imagen (transformada de Fourier, transformada coseno, transformada wavelet, etc.) y con posterioridad manipular el resultado de dicha transformación. Tras haber realizado el tratamiento de la imagen en el dominio transformado, se aplica la transformación inversa con el fin de obtener el resultado en su espacio de representación convencional. A pesar de que hemos presentado ambos métodos, en este texto nos vamos a concentrar fundamentalmente en los métodos directos.

### Métodos directos

Estos métodos se basan en aplicaciones del tipo:

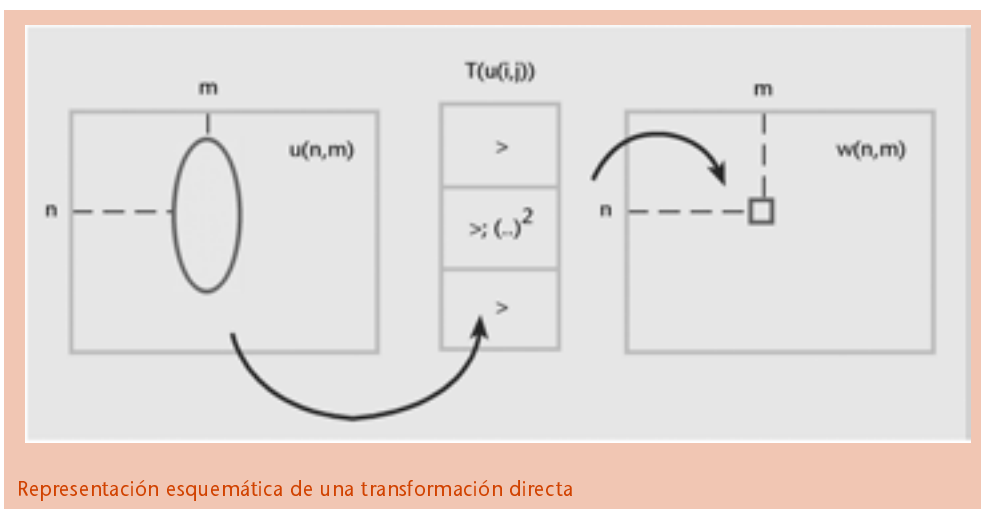
$$w[n, m] = T(u[i, j]),$$

donde  $u[i, j]$  representa la imagen original;  $w[n, m]$  la imagen procesada y  $T$  es una función que establece la relación analítica que permite calcular el nivel de gris de un píxel  $(n, m)$  en la imagen resultante a partir de los niveles de gris de la original.

Como ejemplo genérico de este tipo de aplicaciones consideremos:

$$w[n, m] = u[n - 1, m] + (u[n, m])^2 + u[n + 1, m],$$

que indica que el nivel de gris correspondiente al píxel  $(n, m)$  se determina elevando al cuadrado el nivel de gris de la imagen original en este mismo elemento de imagen y sumando los niveles de gris correspondientes a los píxeles situados en la fila anterior y posterior. En la figura adjunta se representa gráficamente la relación entre ambas imágenes.



Esta representación gráfica es útil para identificar el dominio de la aplicación, al indicarnos con total claridad cuáles son los píxeles de la imagen original que afectarán

al cálculo de un determinado elemento de imagen. En general, este dominio recibe el nombre de entorno o plantilla. Para tener una idea clara de cómo se determina la imagen resultante es conveniente imaginar que la plantilla se va desplazando por toda la imagen original, centrándose en todos los posibles pares de puntos  $(n, m)$  y aplicando de manera sistemática la transformación definida por la ecuación.



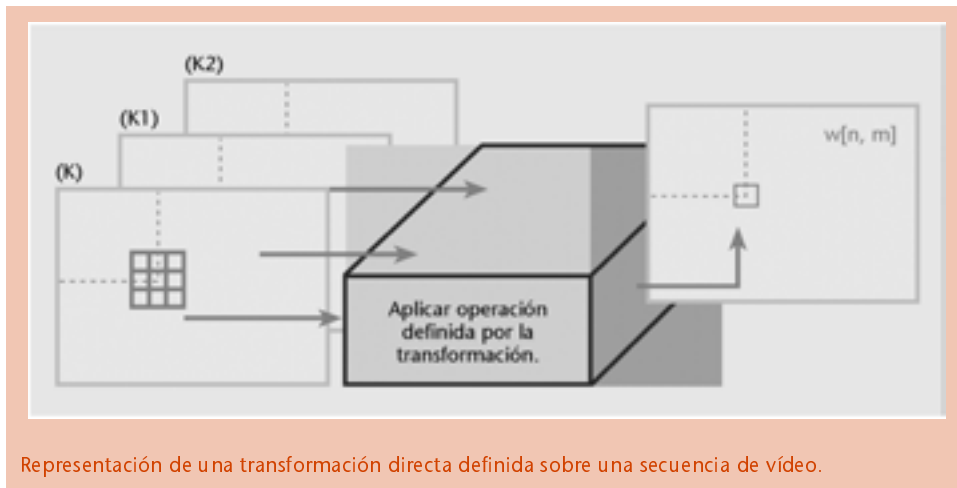
Si disponemos de una secuencia de imágenes, el entorno o plantilla de la aplicación

puede extenderse a más de una imagen. En este caso, deberíamos escribir:

$$w^{(k)}[n, m] = T(\dots, u^{(k-2)}[i, j], u^{(k-1)}[i, j], u^{(k)}[i, j]),$$

indicando explícitamente el índice temporal de las imágenes originales sobre las que se realiza la transformación. Es necesario advertir que este tipo de operaciones puede conducir a un problema de naturaleza no causal, puesto que, en efecto, cuando el índice temporal de las imágenes de partida es superior al de la imagen procesada, esto sig-

nifica que para determinar la imagen resultante en el instante actual tendremos que utilizar imágenes futuras, lo cual resulta, cuando no se poseen poderes extrasensoriales, realmente difícil de implementar. En la siguiente figura se representa una de estas plantillas que actúa simultáneamente sobre varias imágenes.



También podemos llevar a cabo la transformación partiendo de varias imágenes que no tengan una relación temporal directa. Así, por ejemplo, en algunas aplicaciones se utilizan imágenes de una misma escena obtenidas a partir de sensores de distinta naturaleza (infrarrojos, visible, etc.), con el objetivo de alcanzar una imagen que combine los diferentes tipos de información de una manera coherente. Asimismo, como veremos más adelante, también existen alternativas en las que la plantilla toma puntos de la propia imagen resultante  $w[n, m]$  que se han procesado previamente.

Los métodos directos se descomponen en dos tipos principales:

- **Transformaciones puntuales:** para obtener el valor de la imagen resultante en el punto  $(n, m)$  sólo utilizamos el valor de este mismo píxel en la imagen original.
- **Transformaciones espaciales:** la aplicación  $T(\cdot)$  actúa sobre un entorno de píxeles situados alrededor de la posición donde se calcula la transformada.

## Etapa 3: Transformaciones punto a punto

### Concepto de transformación puntual

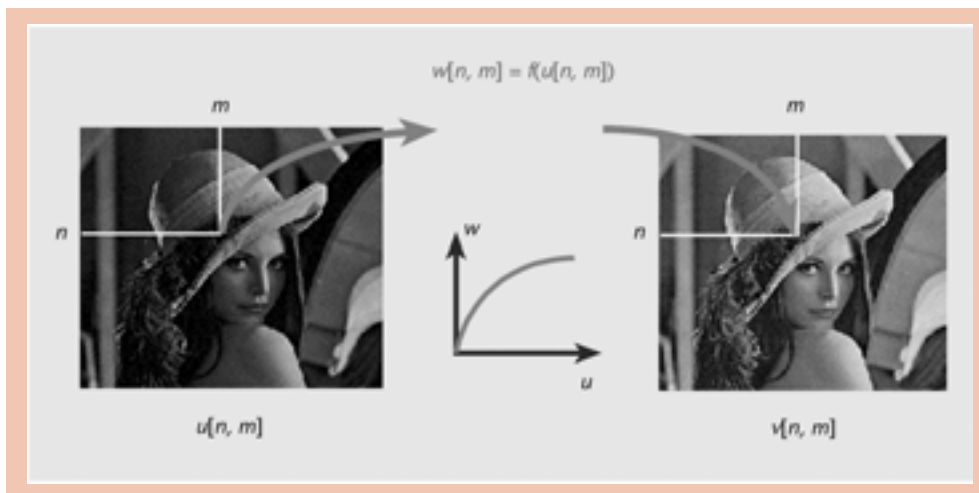
Las transformaciones puntuales constituyen una de las técnicas de mejora de imagen más sencillas, lo cual significa bien poco, ya que en muchos casos es posible obtener una gran efectividad con ellas. La imagen resultante se consigue sustituyendo el nivel de los píxeles en la imagen original por el valor que se indica en una tabla de asignación asociada a cada transformación puntual.

En el caso de imágenes en blanco y negro, con 256 niveles de gris, la tabla de asignación estará formada por 256 entradas, cada una de las cuales corresponde a un nivel de gris y establece el valor por el que debe ser sustituido para obtener la imagen resultante. Es habitual representar la tabla de asignación mediante un gráfico que indica la asociación entre los niveles de gris de la imagen original y los de la imagen resultante.



Las transformaciones puntuales se pueden realizar con gran velocidad y eficiencia al contar con la posibilidad de almacenar la función en tablas, de manera que no será necesario efectuar cálculos. Tened en cuenta que gracias a que los componentes de color de la imagen se cuantifican con un número finito de bits

(en general 8), sólo se requiere disponer de una tabla con un número de entradas suficiente. Este tipo de operaciones se utiliza con frecuencia para corregir sistemáticamente las imágenes adquiridas por la cámara, tratando de reducir la posible falta de contraste o inadecuada iluminación de una escena.



### Transformación puntual

El nivel de gris del elemento de imagen situado en la fila  $n$ , columna  $m$  (cuyo valor se representa como  $u[n, m]$ ) se sustituye por el valor indicado en la tabla de transformación (gráfico  $w[n, m]$ ). Este proceso se repite para cada uno de los píxeles de la imagen original, y el resultado final dependerá de la forma exacta de la transformación puntual.

*Para aplicar una transformación puntual a una imagen tenemos que modificar el nivel de cada píxel de acuerdo con una tabla de transformación.*

## Características generales de una transformación puntual

Una transformación puntual queda completamente definida cuando se proporcionan los valores de entrada y salida de la tabla de asignación; la tabla de asignación se suele representar mediante una función matemática:

$$w[n, m] = f(u[n, m]),$$

donde  $u[n, m]$  representa los niveles de gris de la imagen original y  $w[n, m]$ , los de la imagen resultante.

La representación gráfica de la función  $f(\cdot)$  suele proporcionar una valiosa información acerca de los efectos de la transformación puntual en la imagen.



Uno de los inconvenientes principales de estas técnicas de mejora de imagen es que resulta difícil prever con exactitud cuál será el resultado de una determinada transformación puntual. Por norma general, hay que seguir un proceso iterativo de prueba y error antes de establecer cuál será la transformación definitiva utilizada en cada aplicación. La experiencia del diseñador, aunque sea difícil de cuantificar, tiene una

gran incidencia en este proceso de ajuste de la función. Por este motivo es conveniente formarse una idea intuitiva de cómo actuará sobre la imagen una determinada transformación puntual. Es importante, de todos modos, saber interpretar desde el principio los efectos que producen sobre la imagen los parámetros básicos de la función como valor inicial y final, pendiente en cada región de la curva, etc.

### Características de la transformación puntual

Si la función es **creciente**, la transformación puntual no modifica los niveles de gris relativos en la imagen resultante; es decir, que si un píxel es más oscuro que otro en la imagen original, también se mantendrá esta relación en la imagen modificada. En la figura se observa que  $d1 < d2$ , entonces, los nuevos valores de gris  $D1$  y  $D2$  también mantendrán esta misma relación de orden. Con la excepción de algunos casos especiales en los que priman los efectos sobre la imagen más que su mejora de calidad, la mayor parte de las transformaciones puntuales es de carácter creciente.

Cuando la función asociada a la transformación se mantiene por encima de la función identidad, el resultado es que la imagen modificada es más clara que la imagen original. En efecto, los niveles de gris obtenidos aplicando la transformación son siempre mayores que los valores originales, por lo que la imagen resultante es más clara. Análogamente, cuando la curva de la transformación se mantiene por debajo de la identidad, la imagen resultante es más oscura. Los casos en que la función cruza la recta identidad suelen producir mejoras de contraste de la imagen en algunas regiones de nivel de gris.

Cuando la función tiene una **pendiente mayor que la unidad**, se produce una mejora de contraste en esta región de niveles de gris. En el ejemplo de la figura, el margen de niveles de gris situado entre 0 y  $d1$  se expande al margen situado entre 0 y  $D1$  y, en consecuencia, las zonas más oscuras de la imagen se expanden hacia niveles claros, de modo que permiten observar con mayor claridad los objetos que habían quedado en las sombras.

Si la **pendiente es menor que la identidad** se produce una reducción del contraste. En nuestro ejemplo, todos los valores de gris que estaban situados entre  $d2$  y 255 quedan reducidos al margen situado entre  $D2$  y 255; los objetos claros quedarán compactados en un intervalo menor de niveles de gris, por lo que se producirá una reducción del contraste en estas regiones.

### Características de la transformación puntual

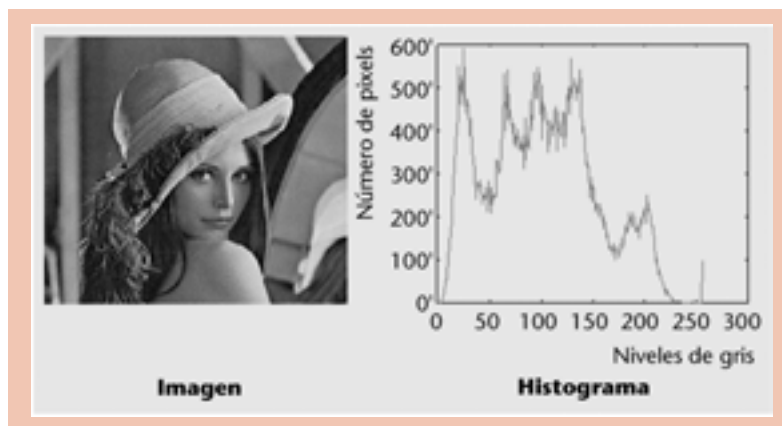
Los valores de la **función en el origen** y en el **blanco** también son indicativos en especial de las características de la mejora. Cuando  $f(0) = 0$  y  $f(255) = 255$ , esto significa que la transformación mantiene los niveles de negro y blanco.

## Histograma de una imagen

El histograma de una imagen es una representación bidimensional del número de píxeles que tienen un determinado nivel de gris, se trata de una representación que proporciona una información muy valiosa para la selección de parámetros en las transformaciones puntuales.

*El histograma proporciona información sobre las características de la imagen y es útil para el diseño de transformaciones puntuales.*

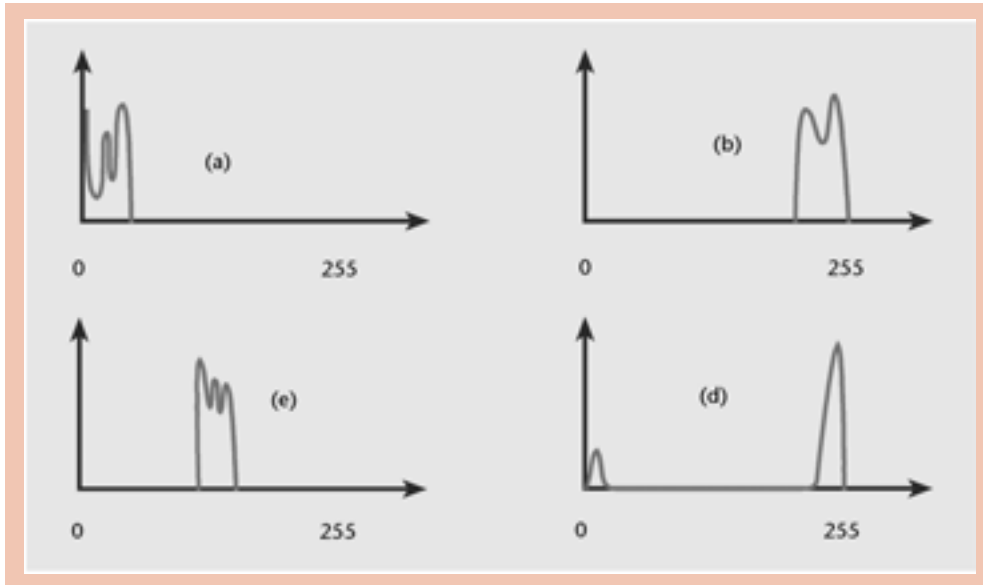
El histograma indica, como hemos dicho, el número de píxeles de la imagen que tienen un determinado nivel de gris. En la imagen de la figura vemos que existe una predominancia de píxeles en las zonas más oscuras, con cuatro picos significativos situados en torno a los niveles de gris (25, 75, 110 y 135). A partir del nivel de gris 150, el número de píxeles disminuye de manera considerable, con un máximo relativo situado en el nivel de gris 200; el número de píxeles con nivel de gris entre 225 y 254 es prácticamente nulo; y el pico final situado en el nivel 255 indica la presencia de un número importante de píxeles blancos.



## Interpretación del histograma

En la siguiente figura se representan cuatro posibles histogramas de una imagen que utilizaremos para indicar el tipo de información que se puede extraer a partir de estas gráficas. En el caso (a), todos los píxeles de la imagen se encuentran situados en la

región de niveles de gris próximos al negro, por lo que la imagen aparecerá oscura. Por el contrario, la imagen asociada al histograma (b) será muy clara. El histograma (c) podría corresponder a una imagen con bajo contraste, al observarse que todos los píxeles de la imagen tienen unos niveles de gris muy parecidos, por lo que la imagen tendrá un aspecto grisáceo y, debido a su reducida dinámica, resultará difícil apreciar los detalles. Para finalizar, el supuesto (d) podría estar asociado a una imagen de naturaleza binaria, como un documento impreso, puesto que el histograma indica la presencia de dos niveles predominantes situados cerca del blanco y el negro.



## Transformaciones puntuales más representativas

En los apartados que podremos ver a continuación se ilustran algunas de las transformaciones puntuales más utilizadas. En general, la aplicación de un método u otro dependerá de las características de la imagen y de la habilidad del diseñador. Por su parte, el análisis del histograma suele proporcionar una información lateral de gran ayuda en la selección de los métodos y parámetros más adecuados.

Transformaciones puntuales más representativas	
<b>Negativo</b>	Simula el negativo de una fotografía.
<b>Enfatización de contraste</b>	Mejora el contraste en algunas zonas de nivel de gris de la imagen. Es útil cuando la imagen ha sido mal adquirida y no dispone de todo el margen de niveles de gris.
<b>Binarización</b>	Convierte la imagen a blanco y negro puro y se utiliza para mejorar imágenes de naturaleza bimodal (dos niveles principales) como un papel con texto escrito.
<b>Clipping</b>	Mejora las regiones próximas al nivel de negro o de blanco.
<b>Corrección de gamma</b>	Corrección de monitores; mejora de contraste global.

## Negativo de una imagen

El negativo de una imagen consiste en invertir la gradación de los niveles de gris, de manera que el nivel de gris resultante sea tanto más oscuro cuanto más claro era el nivel original. La relación entre el nivel de gris original y el modificado se puede obtener mediante:

$$w[n, m] = 255 - u[n, m],$$

que nos indica que el blanco ( $u[n, m] = 255$ ) se convierte en negro ( $w[n, m] = 0$ ), y viceversa. Por norma general, esta fórmula se utiliza en la conversión de negativos fotográficos originales explorados por escáner de blanco y negro a positivos.



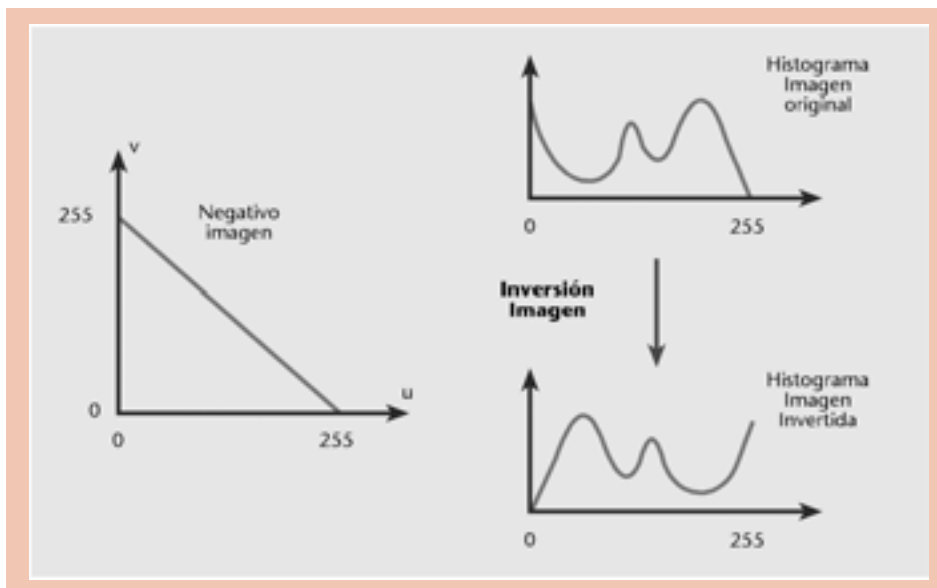
Imagen original e imagen invertida



Al realizar el negativo de una imagen también modificamos su histograma, y dicha modificación debe resultar evidente, ya que simplemente se trata de un giro de la curva con respecto a su centro. En efecto, si en la imagen

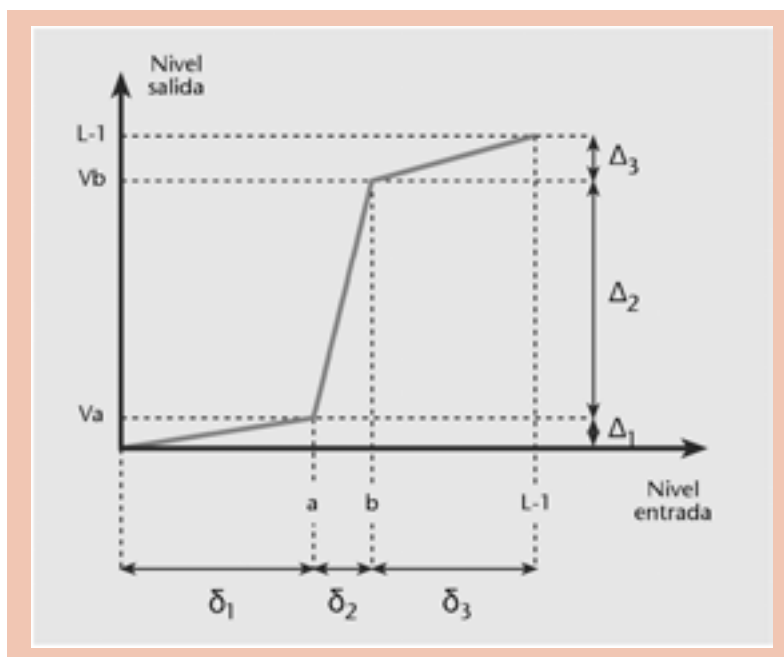
original existen  $P$  píxeles con un nivel de gris  $a$ , en la imagen resultante también existirán  $P$  píxeles con un nivel de gris  $255 - a$ . Así pues, el nuevo histograma está relacionado con el de la imagen original mediante la ecuación:

$$H'[k] = h[255 - k]$$



## Enfatización de contraste

Una transformación muy utilizada para mejorar el contraste de una imagen es la función lineal a tramos que se representa en la siguiente figura. La mejora de contraste se encuentra directamente relacionada con el margen dinámico de la luminancia; en efecto, aquellos objetos cuyos niveles de gris están muy próximos aparecen poco contrastados. Pues bien, para mejorar el contraste es necesario realizar una expansión de estos niveles de gris, llevando el gris más oscuro hacia el negro, y el gris más claro hacia el blanco.



La transformación queda completamente especificada mediante los pares de coordenadas  $(a, Va)$  y  $(b, Vb)$  y está formada por tres tramos de líneas rectas que van:

- Tramo 1: desde el origen al punto  $(a, Va)$ ;
- Tramo 2: desde el punto  $(a, Va)$  al punto  $(b, Vb)$ ;
- Tramo 3: desde el punto  $(b, Vb)$  al punto final  $(255, 255)$ .

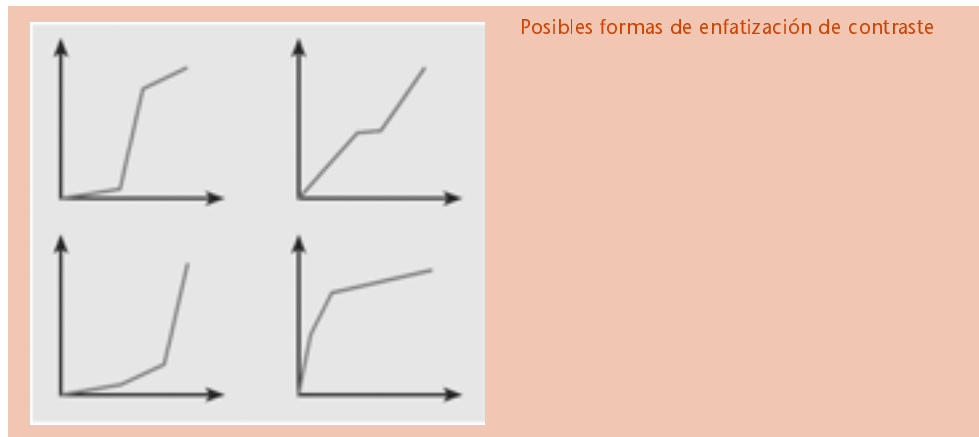
En este ejemplo concreto, la enfatización de contraste se realiza en la zona de niveles de gris de la imagen comprendidos entre  $(a, b)$ , que tras llevar a cabo su transformación se comprenderán entre  $(Va, Vb)$ . Puesto que la

diferencia  $\delta_2 = b - a$  es menor que  $\Delta_2 = Vb - Va$ , todos los niveles de gris comprendidos en esta región quedarán más separados, de manera que mejorará el contraste global de imagen en esta zona de niveles de gris. En general, podemos decir que en aquellos tramos en los que la pendiente sea mayor que la unidad (transformación identidad) se mejora el contraste de la imagen como consecuencia de una expansión del margen dinámico.

En cambio, en los tramos 1 y 3, cuya pendiente es menor que la unidad, se produce una reducción del contraste; todos los objetos cuyos niveles de gris estén comprendidos en estas regiones sufrirán una pérdida de contraste.

Mediante la modificación de los pares de valores  $(a, Va)$  y  $(b, Vb)$  se pueden obtener distintos tipos de mejora de contraste. En la siguiente figura se muestran varias transformaciones que pueden utilizarse para mejorar el contraste en una u otra zona de niveles de gris. Así pues, tendremos que realizar la selección de los tramos de rectas en función del contenido de la imagen y del tipo de problemas de contraste que aparezcan.





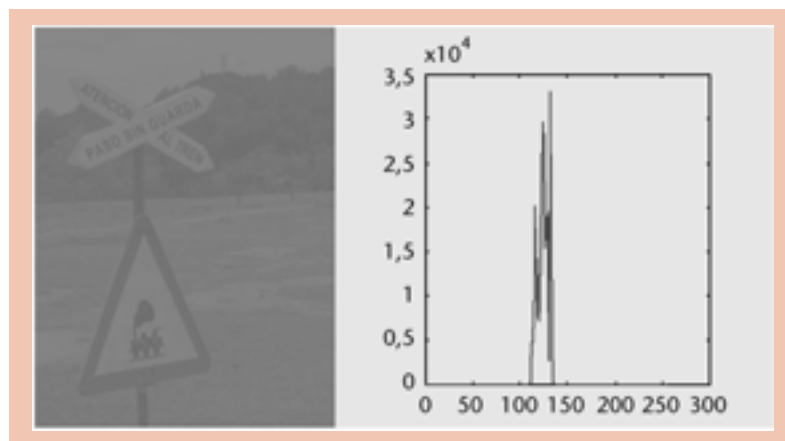
### Generalización de la enfatización de contraste

- La enfatización de contraste se puede generalizar a transformaciones con más o menos tramos lineales.
- El número de tramos lineales está relacionado con la complejidad de la transformación que deseamos realizar y el contenido de la imagen.
- El número de puntos  $(x, Vx)$  que hay que especificar es igual al número de tramos menos uno.
- En la mayor parte de los casos suele ser suficiente con el uso de dos o tres tramos.

*Los tramos con pendiente mayor que la unidad proporcionan una expansión del margen dinámico y una mejora del contraste.*

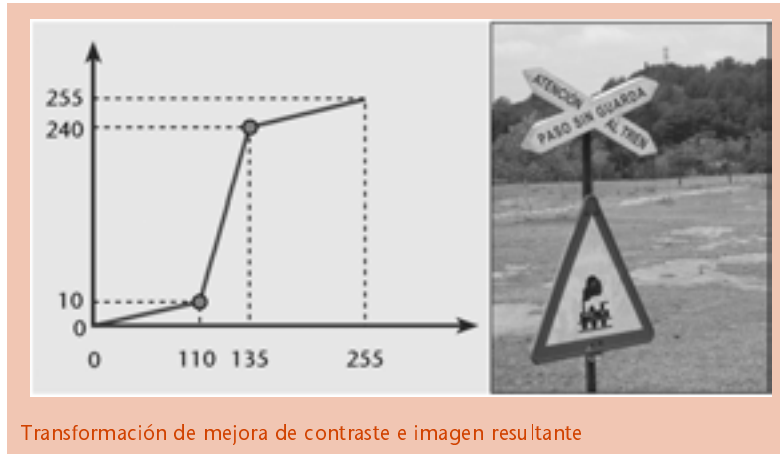
La pérdida de contraste en una fotografía puede venir motivada por múltiples causas, pero las más comunes son la subexposición, la sobreexposición y varios problemas que pueden aparecer en el proceso de positivado. En los siguientes ejemplos se consideran distintas imágenes con poco contraste, con el objetivo de comprender el proceso de selección de parámetros en este tipo de transformaciones.

### Selección de parámetros en la enfatización de contraste: ejemplo 1



Como podemos ver, la imagen de este ejemplo tiene un contraste muy reducido, ya que prácticamente todos los píxeles poseen un nivel de gris medio. El histograma de la imagen muestra esta circunstancia indicando que la mayor parte de los píxeles se encuentran entre un nivel de gris de 110 y 135, un margen dinámico tan reducido que impide que se puedan apreciar diferencias significativas entre los niveles más oscuros (110) y los más claros (135).

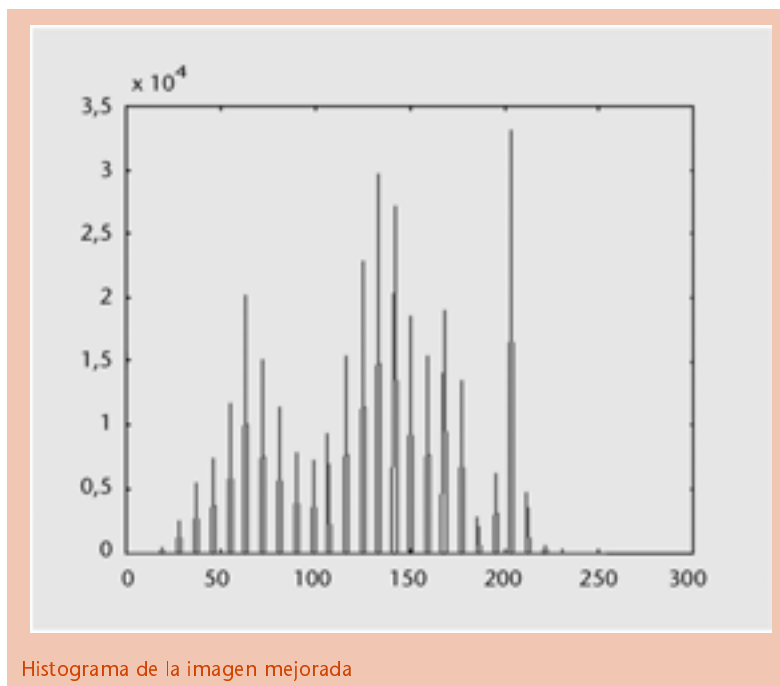
Para mejorar la imagen podemos utilizar una transformación puntual de enfatización de contraste que mejore su margen dinámico. En este caso, unos parámetros adecuados podrían ser los pares de puntos (110, 10) y (135, 240), con lo que el nivel de gris más oscuro (110) se transformaría en un nivel de gris próximo al negro (10), y el más claro (135), a un nivel próximo al blanco (240), efecto que mejoraría considerablemente, como se ve, el contraste de la imagen.



La mejora de contraste es global en toda la imagen y no se observa ninguna pérdida de calidad originada por la presencia de tramos con pendiente menor que la unidad (tramos 1 y 3). La razón debería estar clara si tenemos en cuenta que en el histograma de la imagen original prácticamente no existe ningún píxel comprendido en los intervalos (0, 110) y (135, 255). Así, podemos concluir que no se ha producido ninguna pérdida de contraste visible debido a que no existían píxeles en estos tramos.

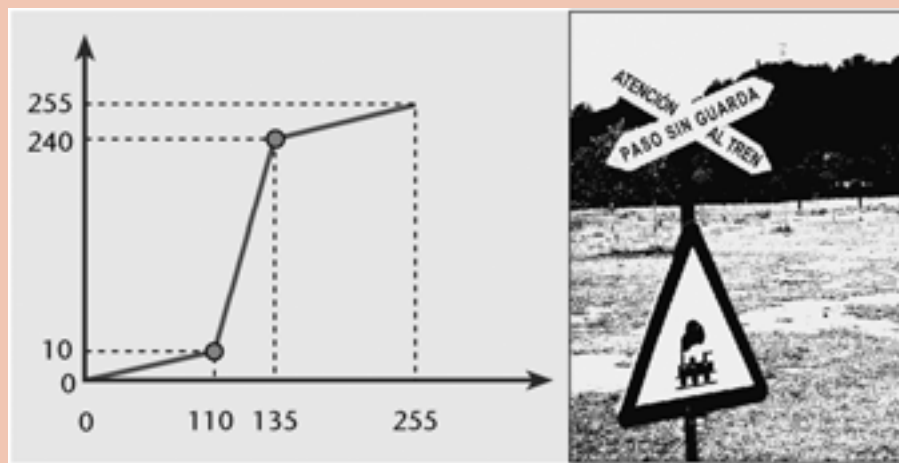
Mediante el análisis del histograma de la imagen resultante podemos comprobar que

el efecto de esta transformación puntual ha sido la expansión de los niveles de gris de la imagen hacia los niveles extremos (blanco y negro). También debemos observar que el histograma obtenido muestra que no aparecen todos los niveles posibles de gris en la zona que se ha expandido, y esto es así debido a que en la imagen original sólo existían 25 niveles de gris en la región 110 a 135 ( $135 - 110 = 25$ ). Tras haber expandido el margen dinámico siguen existiendo en exclusiva estos 25 niveles posibles, aunque ahora sus valores se encuentran distribuidos en el margen de niveles de gris que va desde 10 hasta 240.



Para comprender mejor la pérdida de contraste en los tramos lineales con pendiente menor que la unidad, podemos aplicar la misma transformación que hemos utilizado con anterioridad, pero aplicándola, esta vez, sobre la imagen ya mejorada. El resultado muestra que la zona del bosque, con unos ni-

veles de gris más oscuros (entre 0 y 110), ha sido comprimida a niveles situados entre 0 y 10, y ha adquirido una apariencia prácticamente negra (poco contraste). De manera análoga, podemos razonar que se han perdido detalles en las partes más claras (cielo y señal de aviso).



Al aplicar la mejora de contrastes a una imagen ya mejorada, se observa la pérdida de contraste causada por los tramos lineales con pendiente menor que la unidad.



### Selección de los parámetros de contraste: ejemplo 2

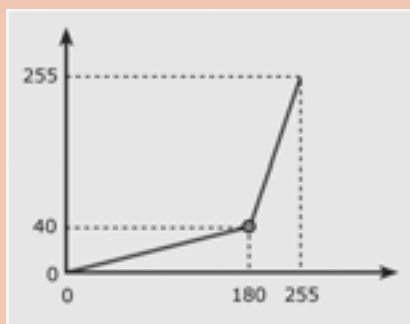
En este ejemplo la imagen ha sido sobreexpuesta, de modo que presenta un dominio de niveles de gris muy claros. El histograma de la imagen muestra esta característica, ya que prácticamente todos los niveles de gris están concentrados en el margen dinámico que va desde el nivel 190 al nivel 255.

Para mejorar el contraste de la imagen utilizaremos una transformación con sólo dos tramos lineales; por lo tanto, únicamente necesitaremos definir un punto  $(a, Va)$  como intersección entre las dos rectas. Aunque la selección del punto de intersección no es única, el histograma proporciona una valiosa información para su definición. En

este caso hemos seleccionado el punto  $(180, 40)$ , con lo que obtenemos como resultado que:

a) Todos los niveles de gris situados entre 0 y 180 se comprimirán en el margen situado entre 0 y 40, circunstancia que garantiza que todavía existirán varias gradaciones entre los niveles de gris más oscuros de la imagen.

b) Los niveles de gris situados entre 180 y 255 se transformarán al rango 40 – 180, por lo que se produce una expansión del margen dinámico que mejorará el contraste general de la imagen.



Transformación puntual de dos tramos lineales e imagen mejorada

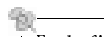
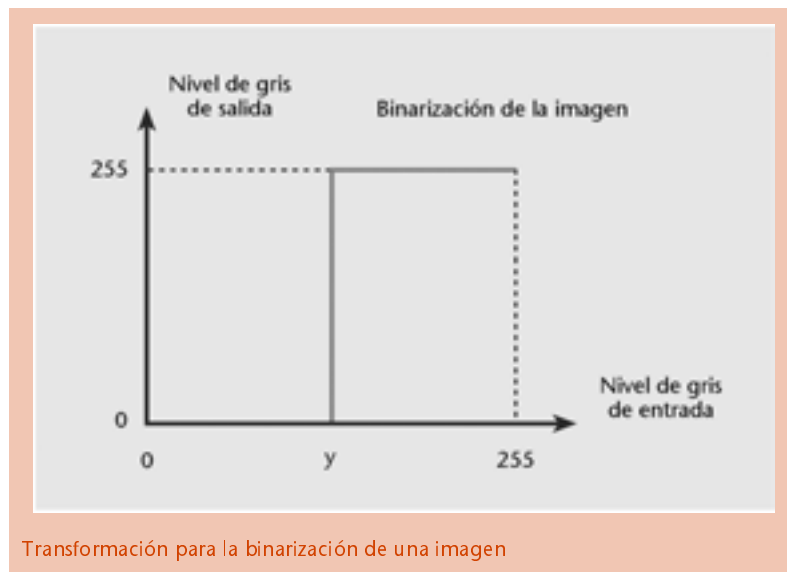
## Binarización

La binarización consiste en convertir una imagen multinivel (varios niveles de gris) en una imagen con sólo dos niveles: blanco y negro. Se utiliza sobre todo para imágenes con naturaleza bimodal que han sido capturadas utilizando dispositivos con diferentes niveles de gris. Uno de los ejemplos más típicos en los que se utiliza la binarización es el proceso de captura de documentos de texto y gráficos lineales con escáneres multinivel; también se usa con frecuencia en aplicaciones de visión artificial para identificar los objetos de interés en una imagen.

Se puede definir la transformación como la siguiente función:

$$f(u) = \begin{cases} 0 & \text{si } u[n, m] \leq \gamma \\ 1 & \text{si } u[n, m] > \gamma \end{cases}$$

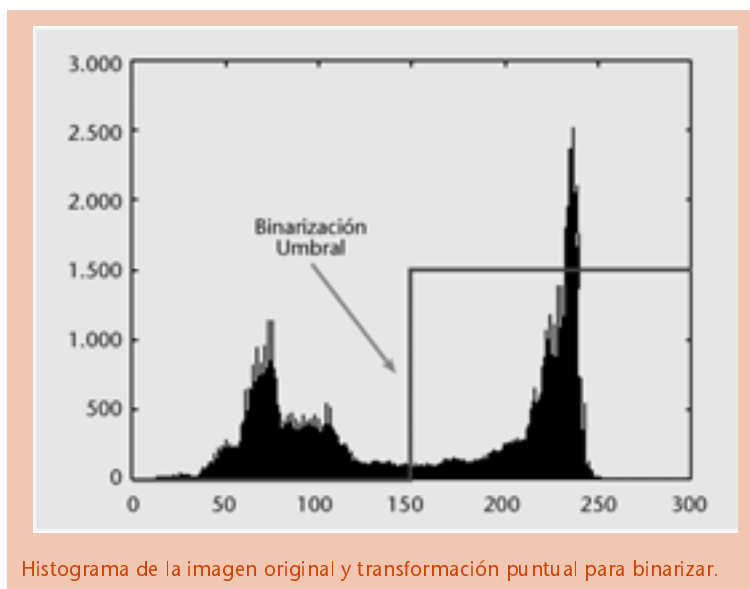
En dicha función,  $\gamma$  es el umbral que se utiliza para determinar la condición por la que un píxel se convierte en blanco o en negro; la representación gráfica de esta transformación es una función escalón desplazada a la abscisa  $\gamma$ .



En la figura que presentamos a continuación se muestra un ejemplo de una imagen correspondiente a la matrícula de un automóvil que se ha obtenido mediante una cámara situada en la entrada de un aparcamiento. La imagen original es de baja calidad y uniformidad por causa de una iluminación deficiente. A pesar de todo, la binarización de la imagen permite separar, con toda claridad, los dígitos que se tendrán que reconocer.



Para determinar el valor adecuado del nivel de umbral que se utiliza en la binarización suele ser suficiente con un simple análisis del histograma. En el ejemplo de la matrícula del automóvil, el histograma indica claramente la existencia de dos niveles de iluminación predominantes, ante lo que la selección del umbral como un valor intermedio entre estos dos niveles permite la correcta binarización de la imagen.



Histograma de la imagen original y transformación puntual para binarizar.



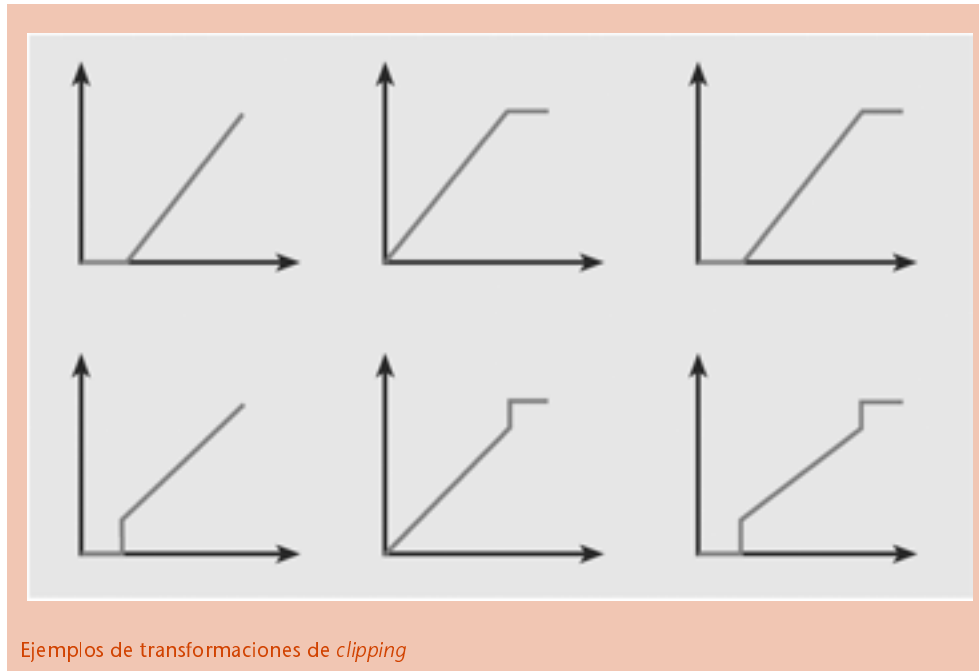
Tenemos la opción de automatizar el umbral definiendo algún tipo de proceso sistemático del histograma. Esta automatización resulta útil en especial para aquellos casos en los que se espera que las características de la imagen puedan depender del instante en que se realiza la digitalización. En nuestro ejemplo, si el aparcamiento es exterior, las condiciones de iluminación en las que opera el sistema variarán a lo largo del día, por lo que se espera que los niveles de gris donde se sitúan los dígitos y el fondo de la matrícula puedan desplazarse. Este hecho exigirá poder modificar el nivel de umbral dependiendo de las condiciones de la imagen.

Un posible procedimiento sistemático consiste en determinar la posición de los dos picos del histograma correspondientes a los niveles característicos (fondo y dígito) y situar el umbral como el valor medio entre estos dos niveles de gris. La alternativa que presentamos puede introducir algunos errores con motivo de la falta de continuidad entre valores consecutivos del histograma. Para solventar el problema, es habitual realizar un filtrado (paso bajo o morfológico) del histograma que suavice su curva y permita realizar una estimación menos sensible al ruido.

## Clipping

Las transformaciones de *clipping* consisten en fijar en un mismo nivel de gris  $p$  todos los píxeles cuyo nivel de gris se sitúa en las proximidades de  $p$ , teniendo en cuenta que los valores de  $p$  más habituales son el negro y el blanco. En las gráficas adjuntas se muestran algunos ejemplos de transformaciones de *clipping* a los niveles de blanco y

negro más usuales. En las transformaciones de la fila inferior, el nivel de gris de los píxeles sobre los que no se aplica el *clipping* se mantiene igual al nivel de gris original; las transformaciones de la fila superior son continuas, lo que significa que se aplica una enfatización de contraste en los niveles en los que no se realiza *clipping*.



*El clipping es especialmente útil cuando se aplica a la zona del negro para imágenes que tienen ruido.*



#### **Ejemplo de *clipping* en la región del negro**

La transformación de *clipping* es especialmente útil cuando se aplica al nivel de negro en imágenes que tienen cierto nivel de ruido. La sensibilidad del sistema visual humano a los cambios de nivel de gris es mayor en las zonas más oscuras de la imagen, por lo que el ruido en estas regiones resulta más visible. Una transformación de *clipping* puede mejorar de manera notable la percepción de la imagen en estos casos.

En las siguientes imágenes se muestra un fotograma con presencia de ruido unifor-

me. Este tipo de ruido aparece de manera habitual cuando se digitalizan imágenes procedentes de cintas de vídeo de baja calidad o muy utilizadas. Observad, en cualquier caso, que aunque el nivel de ruido es uniforme en toda la imagen, resulta mucho más visible en las regiones más oscuras. El resultado de una operación de *clipping* que convierte a negro los niveles más bajos de la imagen reduce notablemente la percepción del ruido.



## Corrección gamma

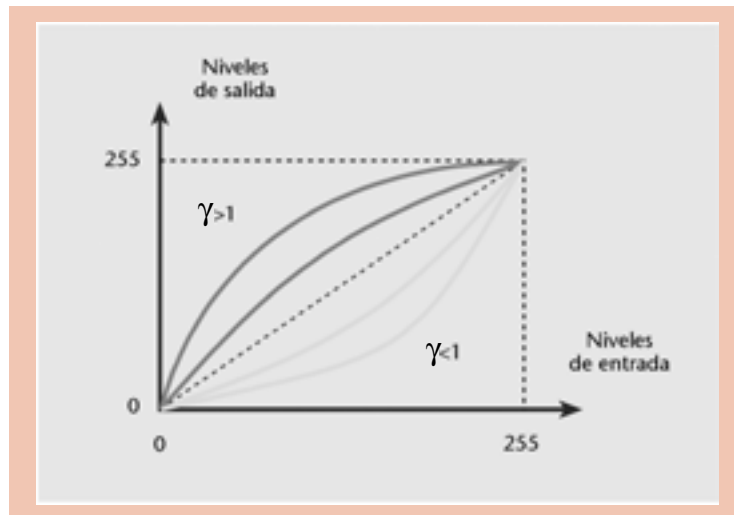
La corrección gamma se utiliza a menudo para modificar el margen dinámico o el contraste de las imágenes, y se define mediante la siguiente transformación:

$$f(u) = K \cdot (u[n, m])^{1/\gamma}$$

El valor de la constante  $K$  que aparece en la ecuación depende del valor de gamma. En general se calcula para que al nivel de gris de entrada máximo le corresponda el máximo nivel de salida. En el caso de imágenes con 256 niveles, tendremos:

$$K = \frac{255}{(255)^{1/\gamma}}$$

En esencia, se trata de una función de tipo potencial que recibe el nombre de corrección de gamma porque tiene la misma forma analítica que la corrección aplicada a una cámara de televisión para neutralizar el efecto de no linealidad del tubo de imagen. No obstante, en este caso, el valor de gamma puede ser cualquiera y no tiene por qué guardar ninguna relación con el factor del *display*. En la figura adjunta se indican algunas de las funciones obtenidas para distintos valores del parámetro gamma: para gamma mayor que la unidad se obtienen funciones que aumentan la dinámica de los niveles de gris bajos; a medida que gamma aumenta, el efecto es cada vez más pronunciado. Para gamma igual a la unidad, se obtiene la transformación identidad; por el contrario, valores de gamma menores que la unidad realizan una compresión del margen dinámico de los niveles de gris bajos, mientras que expande el de los niveles próximos al blanco.



La corrección de gamma es una transformación que aparece originalmente en el contexto de señales de televisión. Los tubos de imagen en blanco y negro o color tienen una respuesta no lineal, de manera que la luminosidad aparente en la pantalla no es proporcional a la tensión que se aplica al tubo. Con la intención de solventar este problema es necesario modificar la tensión de entrada al tubo mediante una curva de ponderación no lineal conocida como corrección gamma.

La corrección gamma se realiza en el propio estudio de televisión, antes de la transmisión de la señal (puesto que en los orígenes de la televisión el hecho de realizar esta corrección en el receptor no era trivial). En la actualidad, los receptores de televisión de plasma o los retroproyectores LCD deben deshacer la corrección gamma a consecuencia de que estos dispositivos de representación tienen curvas de respuesta bastante lineales.

### Corrección gamma: ejemplo

En el ejemplo de la figura se muestra el resultado de aplicar la corrección gamma a una imagen que ha sido subexpuesta. Con la ponderación de exposición se ha obtenido una lectura incorrecta debido a la intensa

luz del fondo de la imagen. La corrección de gamma con valores mayores que la unidad expande los niveles de gris oscuros hacia valores más claros, de modo que se obtienen imágenes más compensadas.



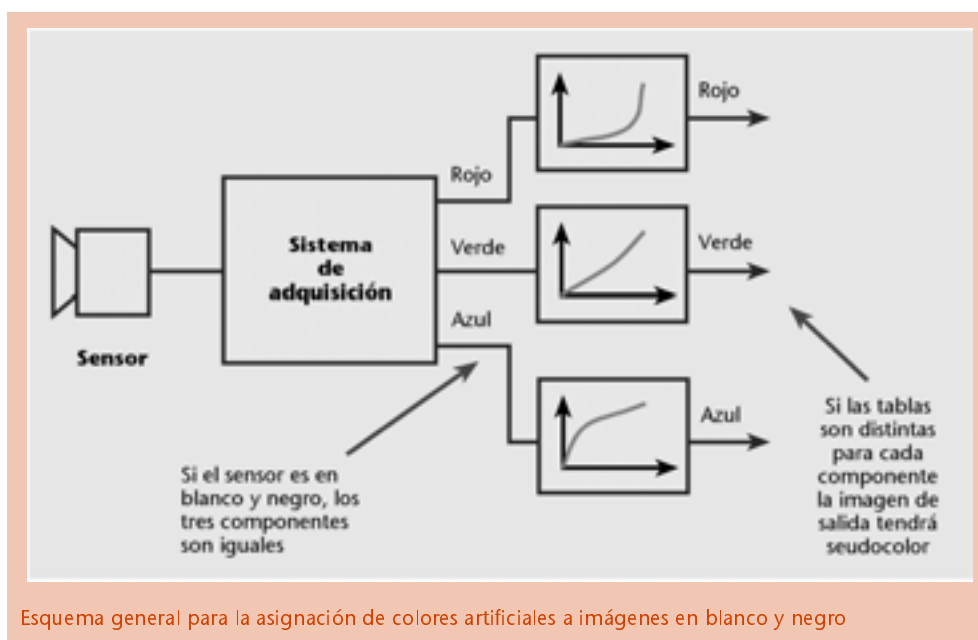
Ejemplo de corrección de gama para mejorar imágenes subexpuestas.  $\gamma = 1$  (imagen superior izquierda),  $\gamma = 1,5$  (imagen superior derecha) y  $\gamma = 2$  (imagen inferior).



## Pseudocolor

En determinadas aplicaciones en las que el sistema de captación de imágenes es, por restricciones propias del sistema de medida, necesariamente en blanco y negro, puede resultar de interés asignar colores artificiales a los distintos niveles de gris. Los ejemplos más típicos de pseudocolor se encuentran en el tratamiento de imágenes de la tierra obtenidas vía satélite e imágenes médicas. En ambos casos, los sensores suelen trabajar en bandas de frecuencias alternativas al espectro visible (rayos X, ecografías, infrarrojos, etc.), por lo que para visualizar las imágenes obtenidas se suelen asignar niveles de gris proporcionales a la cantidad de energía recibida en la banda de análisis. No obstante, la capacidad del sistema visual humano para discriminar entre distintos niveles de gris es bastante más reducida que la de discriminar colores, así que en algunas ocasiones resulta conveniente sustituir los niveles de gris por colores.

Para definir los colores en función del nivel de gris se utilizan transformaciones puntuales independientes para cada uno de los componentes de color, suponiendo que se trabaja con un modelo como el representado en la figura adjunta. De hecho, este modelo concuerda con el *hardware* utilizado en la mayoría de las tarjetas de adquisición de imagen, ya que por norma general incorporan tablas independientes para cada componente de color que pueden ser programados por el usuario.



Esquema general para la asignación de colores artificiales a imágenes en blanco y negro

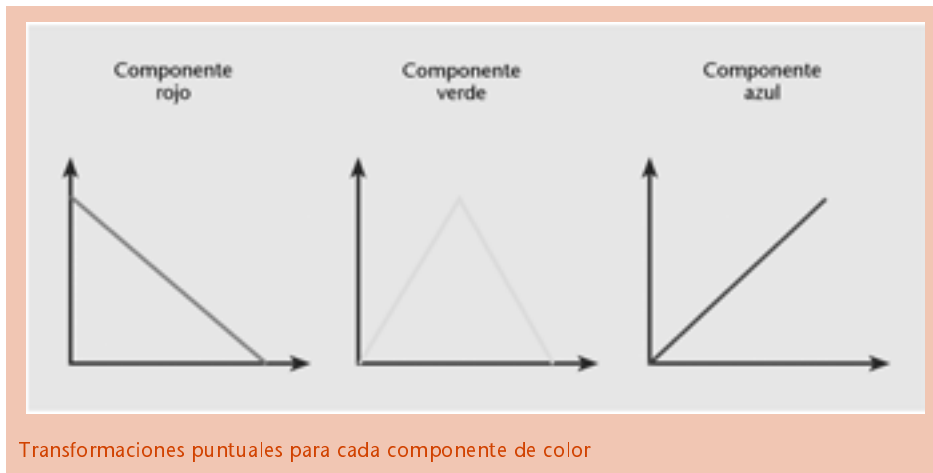
La imagen obtenida por el sensor se digitaliza obteniendo los tres componentes de color de manera independiente. En aquellos casos en los que las imágenes sean en blanco y negro, los tres componentes de color (es decir, las tres matrices  $u_R[n, m]$ ,  $u_G[n, m]$  y  $u_B[n, m]$ ) serán idénticos. Si las transformaciones puntuales implementadas para los tres componentes también son iguales, obtendremos una imagen en blanco y negro. Sin embargo, si utilizamos transformaciones distintas para cada componente de color, obtendremos una imagen de color en el visualizador, y los colores de esta imagen dependerán de las funciones utilizadas en las tablas de luminancia.



### Pseudocolor: ejemplo 1

Consideremos, por ejemplo, las tablas de la siguiente figura, en las que las asignaciones realizadas en los tres componentes básicos determinarán tonalidades de color distintos para cada nivel de gris. En el ejemplo que se muestra, los niveles de gris próximos al negro serán convertidos al color rojo, mientras que los cercanos al blanco serán codificados en

azul; los grises situados en la zona central serán codificados con matices de color verde claro (saturado), puesto que en su formación intervienen las tonalidades de rojo y azul en la misma cantidad con una mayor proporción de verde. Las imágenes muestran el resultado de haber aplicado estas transformaciones puntuales a una imagen en blanco y negro.



### Pseudocolor: ejemplo 2

A menudo el pseudocolor se utiliza en imágenes médicas para visualizar con mayor detalle las pequeñas diferencias de nivel de gris dentro de una imagen.





### Pseudocolor: ejemplo 3

También es habitual el uso del pseudocolor para obtener efectos artísticos utilizando colores artificiales a partir de una versión en blanco y negro de la imagen.



Imagen original en color



Imagen original convertida a blanco y negro



Imagen en pseudocolor

### Ajustes de brillo, contraste y saturación

---

Los ajustes de brillo, contraste y saturación que proporcionan las aplicaciones para el retoque de imagen se basan en los controles que reciben este mismo nombre de un receptor de televisión. Estos ajustes también pueden ser interpretados como una transformación puntual.

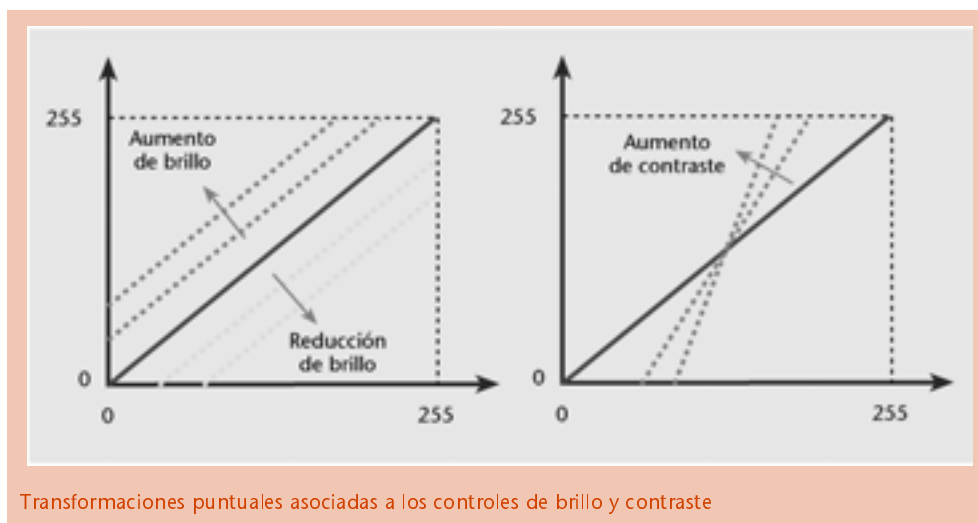
En el receptor de televisión el módulo de decodificación PAL dispone de las señales de luminancia y diferencia de color y los componentes de color en los que se realiza el control de brillo, contraste y saturación son, por paralelismo, las señales YUV.

La corrección de brillo y contraste sólo se aplica sobre la señal de luminancia y quedan definidas de forma matemática mediante las relaciones:

- Control de brillo:  $Y' = Y + B$ .
- Control de contraste:  $Y' = K(Y - 128) + 128$ .

Así, la corrección de brillo consiste en sumar (o restar) una constante a la señal de luminancia, mientras que la corrección de contraste es esencialmente el producto de la luminancia por un factor constante (modificación de la pendiente de la transformación puntual).

Desde un punto de vista gráfico, el control de brillo puede interpretarse como un desplazamiento de la transformación identidad (pendiente unidad) hacia arriba o hacia abajo; en cambio, el control de contraste es una modificación de la pendiente de la curva de la transformación. En cualquier caso, si llevamos a cabo ambos controles, podemos obtener rectas de transformación con cualquier pendiente y cualquier ordenada en el origen. Las transformaciones puntuales asociadas al brillo y al contraste se representan en la siguiente figura:



El control de saturación se aplica sobre los componentes U y V como un factor de ganancia:

- Control de saturación:  $U' = K U$   
 $V' = K V$

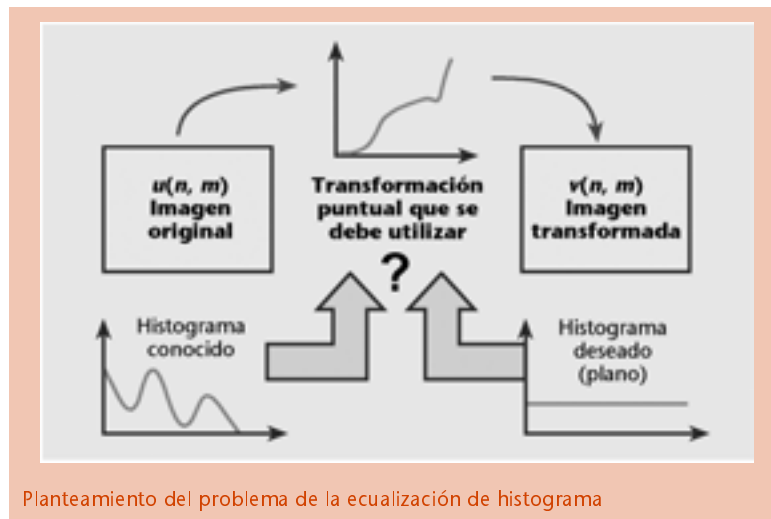
El efecto apreciado es que cuando el factor  $K$  aumenta por encima de la unidad, los colores toman mayor pureza (en general el valor máximo de  $K$  es 2), mientras que si la ganancia disminuye los colores se saturan (más blancos), tendiendo eventualmente al blanco y negro cuando la ganancia es nula (los componentes U y V son cero y sólo se representa la luminancia).

## Etapa 4: Ecuación de histogramas

### Ecuación de histogramas

Hasta ahora todas las transformaciones analizadas responden a funciones definidas por el diseñador, cuya elección se realiza basándose en las características de la imagen, pero con independencia de los valores concretos que ésta tome. En el presente apartado analizaremos un procedimiento que permite determinar de forma sistemática la transformación puntual, teniendo en cuenta los valores de los píxeles de la propia imagen.

La idea básica de la ecuación del histograma de una imagen consiste en determinar una transformación que aplicada a la imagen original produzca una imagen resultante con un histograma plano. El objetivo se ilustra en la figura adjunta, en la que se indica explícitamente que los datos de que partimos para la resolución del problema son la **imagen original**, el **histograma** de esta imagen (que siempre podremos calcular) y el histograma que deseamos que tenga la imagen resultante (plano). Con estos datos determinaremos la función adecuada para obtener una imagen con histograma plano.



Planteamiento del problema de la ecuación de histograma



Nos podemos cuestionar si la obtención de una imagen con histograma plano supone, en general, una mejora de la imagen. La respuesta a esta cuestión es, como es de esperar, que la mejora dependerá de las propias características de la imagen. En general, podríamos suponer que para escenas normales, bien iluminadas y con la cá-

mara correctamente ajustada, los niveles de gris de la imagen deberían ser equiprobables. En consecuencia, cuando las imágenes adolecen de algún defecto en su adquisición o iluminación, una ecuación del histograma supondría una mejora del contraste y de la calidad global de la imagen.

No obstante, es evidente que algunas imágenes pueden tener características peculiares que hagan que una ecualización del histograma resulte poco agradable desde una perspectiva visual. Considerad, por ejemplo, la imagen de la matrícula de un automóvil que hemos utilizado en el ejemplo de binarización. La naturaleza del histograma es claramente bimodal ya que, en esencia, la imagen está formada por dígitos negros sobre un fon-

do blanco. La ecualización del histograma, en este caso, tendería a repartir de una manera uniforme los niveles de gris en todo el margen dinámico, por lo que el resultado obtenido supondría un evidente deterioro de la calidad de la imagen. La figura muestra el resultado de una ecualización de esta imagen, en la que se pueden observar con claridad los resultados previstos.



### Cálculo de la función de ecualización: aproximación continua

Para determinar la transformación que permite ecualizar el histograma es conveniente partir de la función densidad de probabilidad del nivel de gris de la imagen, que se considera como una variable aleatoria continua. En general, para obtener una estimación de esta función de densidad de probabilidad siempre podemos utilizar el histograma de la imagen (recordemos que por su propia definición es una función discreta) mediante distintos tipos de funciones continuas (exponenciales, polinomios, etc.).

Supongamos que disponemos de una estimación de la función densidad de probabilidad (fdp) de la variable aleatoria nivel de gris, que denotaremos como  $p(u)$ .

Nuestro objetivo es determinar una función que modifique el nivel de gris de la imagen  $v = f(u)$ , de modo que la nueva variable aleatoria  $v$  tenga una fdp uniforme (plana). Para determinar la función  $f(\cdot)$ , tendremos que recurrir a un resultado básico de la teoría de la probabilidad que establece que la relación entre las fdp de variables relacionadas mediante una función  $f(\cdot)$  viene dada por:

$$p_v(v) = p_u(u) \cdot \frac{1}{\frac{df}{du}}$$

Admitiendo que las dos variables  $u$  y  $v$  tendrán el mismo dominio de definición, e imponiendo que buscamos que la fdp de  $v$  sea constante, obtenemos:

$$\frac{df}{du} = K \cdot p_u(u)$$

Por lo que la transformación que buscamos puede determinarse como:

$$f(u) = K' \cdot \int_0^u p_u(\xi) d\xi$$

Así pues, para convertir la fdp de una variable aleatoria cualquiera en uniforme es necesario transformar la variable original mediante su función de distribución, es decir, la integral de la fdp.

### **Cálculo de la función de ecualización: aproximación al caso discreto**

No obstante, este resultado parece poco útil desde un punto de vista práctico por cuanto debe estimarse la fdp del nivel de gris de la imagen, circunstancia que, en cualquier caso, introducirá imprecisiones en la ecualización, debido a que siempre tendremos que trabajar con valores aproximados. Por este motivo, es habitual aproximar la ecuación anterior por una versión discreta en la que la fdp se sustituye por el histograma normalizado:

$$f[m] = C \cdot \sum_{k=0}^m h[k]$$

Aquí, la constante  $C$  incluye el factor de normalización del histograma y se debe ajustar para que el máximo nivel de gris de salida coincida con la dinámica deseada. Para determinar el valor de esta constante, es preciso que observemos que la función  $f[m]$  –o su equivalente analógico  $f(u)$ – es monótona creciente.

Por lo tanto, el valor máximo de la imagen de salida se obtiene para el valor máximo de la imagen de entrada, con lo que si ambas imágenes están codificadas con 8 bits, obtendremos:

$$f[255] = 255 = C \cdot \sum_{k=0}^{255} h[k] = C \cdot (N \times M),$$

donde hemos utilizado que:

$$\sum_{k=0}^{255} h[k] = N \times M,$$

ya que la suma de todos los valores del histograma tiene que coincidir con el número de píxeles de la imagen.

A partir de la relación anterior podemos obtener directamente el valor de la constante multiplicativa. Así pues, la función que utilizaremos para ecualizar la imagen viene determinada por:

$$f[m] = \frac{255}{N \times M} \cdot \sum_{k=0}^m h[k],$$

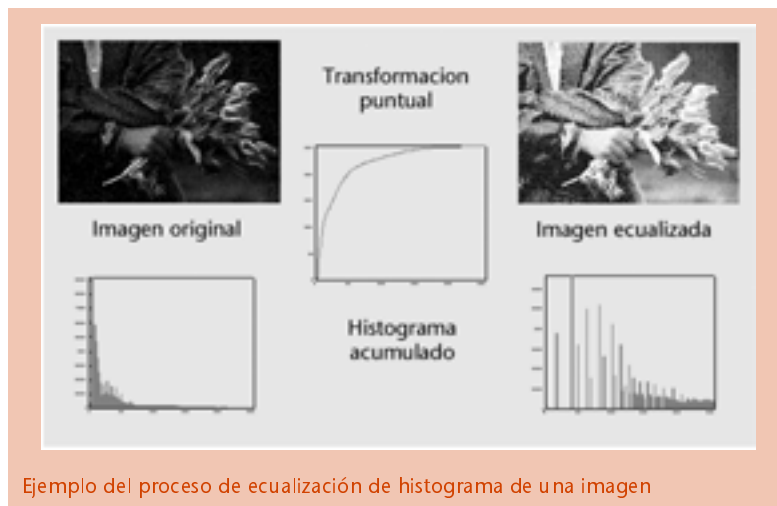
donde hemos supuesto que la imagen está formada por  $N$  filas y  $M$  columnas. Nos referiremos a la función  $f[m]$  como el histograma acumulado.

*Si aplicamos a una imagen  $u[n, m]$  una transformación puntual igual a su histograma acumulado  $f[m]$ , obtenemos una imagen resultante con histograma plano.*



En la siguiente figura se muestra un ejemplo de ecualización de histograma. La imagen original presenta, tal y como nos indica su histograma, una clara predominancia en niveles de gris oscuros, y el histograma acumulado es una función creciente que presenta un aspecto parecido al de la corrección gamma para valores de gamma superiores a la unidad. El resultado de aplicar esta transformación es un

nítido incremento del brillo de la imagen y un mejor equilibrio en los niveles de gris. No obstante, debemos observar que el histograma de la imagen resultante no es, tal y como pretendíamos, plano. Esto puede parecer sorprendente, pero es una consecuencia directa de la naturaleza discreta de la transformación puntual y de haber aproximado la fdp por el histograma normalizado.



*En el histograma de la imagen ecualizada las barras más altas se encuentran más separadas, mientras que las barras más pequeñas están juntas. El resultado es que la densidad de píxeles es prácticamente uniforme en todas las zonas de nivel de gris.*





### ¿Por qué el histograma resultante no es exactamente plano?

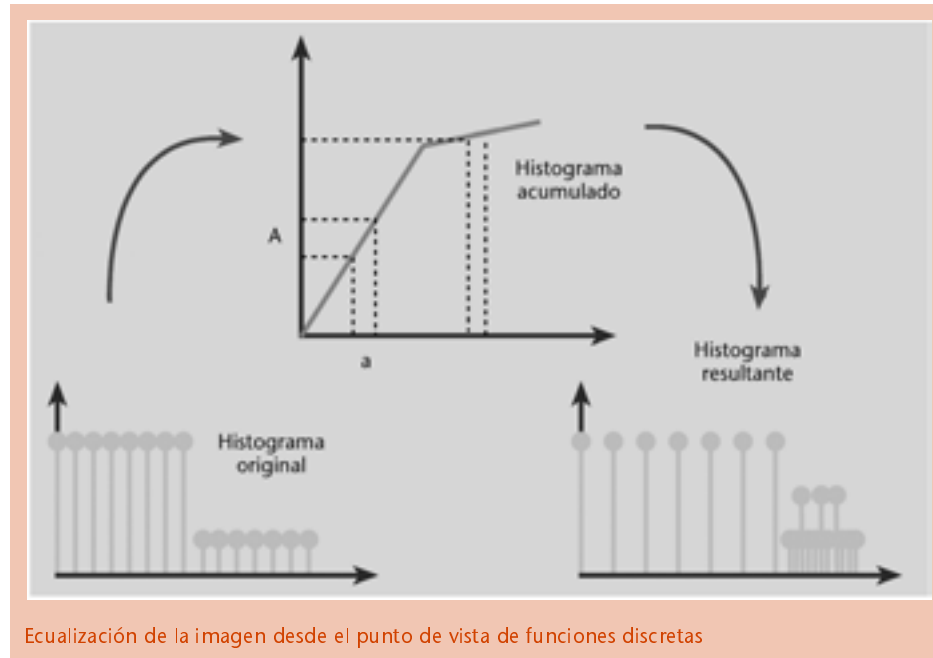
Para comprender por qué el histograma resultante no es exactamente plano consideraremos un sencillo ejemplo como el que se representa en la figura adjunta.

El histograma de la imagen original es una función que sólo toma dos valores, de manera que la cantidad de píxeles por debajo y por encima de un determinado nivel de gris es uniforme. En consecuencia, la transformación puntual que ecualiza el histograma está formada por dos segmentos rectilíneos cuyas pendientes dependen de la densidad de niveles de gris en cada región. En la región próxima al origen la pendiente de la recta es mayor que la unidad, por lo que los niveles de gris que originalmente se encuentran separados por una cantidad  $a$  quedarán transformados en niveles de gris con una mayor diferencia  $A$ . Por este motivo, en la imagen resultante las barras del histograma correspondientes a esta región estarán más separadas. Notad que al tratarse de una transformación puntual del nivel de gris, no es posible reducir la altura de las barras del histograma. En efecto, si originalmente había un número de píxeles  $R$  que tenían un nivel de gris  $a$ , y pongamos que la transformación modifica el nivel de gris  $a$  por  $b$ , en la imagen resultante habrá, como mínimo, un número de píxeles  $R$  con el nivel de gris  $b$ , debido a que todos los píxeles

que tomaban el valor  $a$  se habrán convertido en el mismo valor final.

Por otra parte, en la zona donde la pendiente de la transformación puntual es menor que la unidad, se produce el efecto contrario. Ahora las diferencias entre valores de gris quedan atenuadas, por lo que las barras del histograma quedarán más próximas. Además, es posible que dos o más niveles de gris consecutivos queden transformados al mismo nivel de gris final, con lo que las barras del histograma asociado eventualmente se funden en una única resultante.

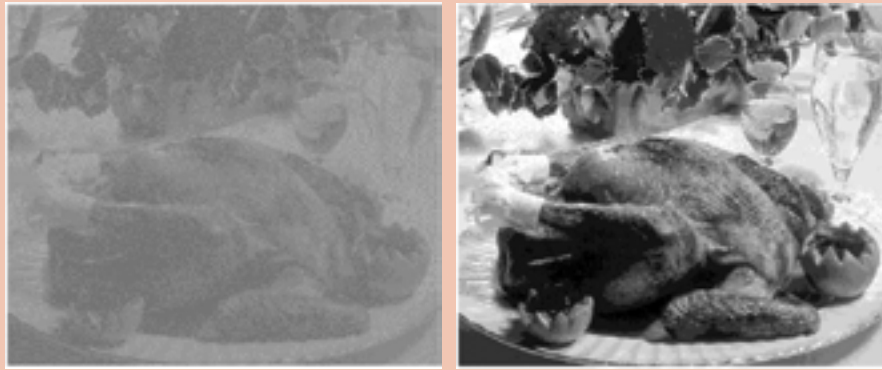
Como conclusión, podemos afirmar que la ecualización de una imagen supone una redistribución del histograma original, separando las barras con mayor número de píxeles y aproximando las que tienen menos píxeles asociados. El resultado final, en tal caso, es una distribución más uniforme de los píxeles en todo el dominio del margen dinámico (podéis comprobar estos resultados en el histograma resultante en el ejemplo de la imagen del ramo de flores, en el que, si contabilizáramos el número de píxeles que existen en un entorno lo bastante amplio, podríamos comprobar que la distribución de niveles de gris es aproximadamente uniforme).



### Ejemplo de ecualización de histograma

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo del resultado de ecualizar una imagen con bajo contraste, un resultado parecido al que hubiéramos obtenido utilizando transformaciones

de enfatización de contraste. No obstante, en este caso, el cálculo de la transformación puede realizarse de forma totalmente automática (sin la intervención del usuario).



Ejemplo de una ecualización de histograma. Imagen original (izquierda) e imagen ecualizada (derecha).

### Propiedades de la función de ecualización

Una característica de una especial relevancia de la ecualización del histograma es que la transformación resultante es, como ya hemos comentado, monótona creciente. Por este motivo, hay que verificar las tres propiedades siguientes:

- 1)  $f(0) \geq 0$ ,
- 2)  $f(u_1) \leq f(u_2)$  si  $u_1 < u_2$
- 3)  $f(L - 1) = L - 1$  (ajuste de cte).

Mediante esta verificación se garantiza que si en la imagen original un píxel es más oscuro que otro, éstos mantendrán esta relación después de la modificación y, además, el negro será convertido al nivel de gris más oscuro y el blanco, al blanco. Con ello tenemos la seguridad de que sólo se producirá una modificación del contraste en los objetos de la imagen, que permanecerán identificables después de la transformación. Estas propiedades también se cumplen para el resto de las transformaciones basadas en el histograma que desarrollaremos a continuación. La corrección gamma, la expansión/compresión logarítmica, la enfatización de contraste y otras funciones ya estudiadas también son monótonas crecientes, por lo que, en general, no suponen una pérdida de la información visible de la imagen original. Otras funciones como el negativo, la fragmentación de niveles de gris o la extracción de bit no verifican esta propiedad, así que en algunas ocasiones resulta difícil identificar el contenido de la imagen original.



#### Modificación del histograma

En algunas imágenes puede resultar conveniente utilizar modificaciones sobre la función histograma acumulado para obtener algún efecto adicional a la ecualización. La modificación más utilizada suele basarse en la corrección gama:

$$f[m] = C \cdot \sum_{k=0}^m (h[k])^{1/\gamma},$$

donde para obtener el máximo margen dinámico, en el caso de imágenes de 8 bits, la constante  $C$  debe tomar el valor:

$$C = \frac{255}{\left( \sum_{k=0}^{255} (h[k])^{1/\gamma} \right)}$$

En general, los resultados alcanzados gracias a estas transformaciones son parecidos a los que obtendríamos aplicando una ecualización de la imagen y una posterior expansión o compresión del margen dinámico.



### Especificación del histograma

En determinadas circunstancias es posible disponer de una información aproximada de la forma que debería tener el histograma de la imagen resultante para que ésta se visualizase de forma óptima. Así, resulta absurdo ecualizar una imagen de la que sabemos a priori que la mayor parte de los objetos que la forman son muy oscuros o muy claros, por lo que sería conveniente disponer de un método que nos permitiese introducir este tipo de informaciones laterales sobre las características de la imagen. La especificación del histograma consiste en determinar la transformación puntual que facilita la obtención de una imagen resultante con una forma de histograma que define el propio usuario. La idea general del problema es parecida, por tanto, a la que hemos planteado para la ecualización, aunque ahora el objetivo es obtener cualquier forma de histograma que se haya definido previamente.

La forma más simple para determinar la expresión analítica de la función que permite resolver este problema es recurrir de nuevo a la interpretación de los histogramas como funciones de densidad de probabilidad y utilizar los resultados proporcionados por la ecualización de la imagen. En la siguiente figura presentamos un esquema para determinar esta función.

Disponemos de la imagen original  $y$ , por lo tanto, podemos estimar su fdp –que denotaremos por  $p_u(u)$ . También conocemos,

por la propia definición del problema, la fdp de la imagen transformada que denominaremos  $p_v(v)$ .

Tal y como se plantea en este esquema, la resolución del problema consiste en calcular la función que permitiría pasar de la imagen original  $u[n, m]$  a una imagen auxiliar  $w[n, m]$  que tuviera el histograma plano. Asimismo, es preciso determinar la función que deberíamos aplicar a la imagen transformada  $v[n, m]$  para obtener la imagen auxiliar  $w[n, m]$  con histograma plano. Estas funciones pueden expresarse como la integral de las funciones densidad de probabilidad:

$$r(u) = K_u \cdot \int_0^u p_u(\xi) \cdot d\xi$$

$$s(v) = K_v \cdot \int_0^v p_v(\xi) \cdot d\xi$$

En consecuencia, la función que permite obtener la fdp especificada a partir de la imagen original, se puede expresar como la siguiente composición de funciones:

$$f(u) = s^{-1}(r(u)),$$

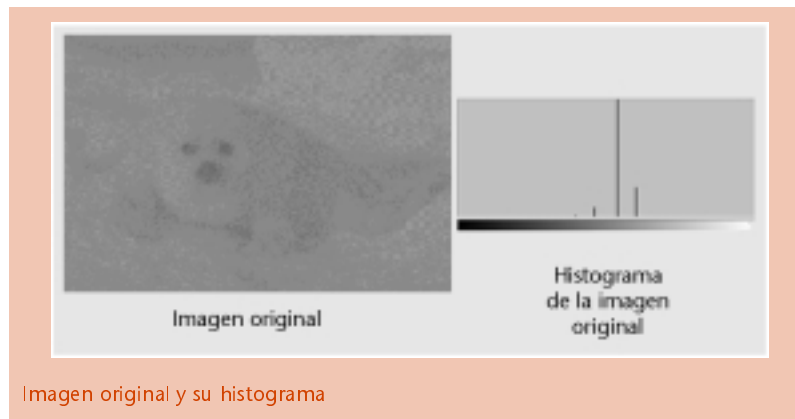
donde  $s^{-1}(\cdot)$  representa la función inversa o recíproca de  $s(\cdot)$ .



### Ejemplo de especificación de histogramas

En este ejemplo la imagen original es una imagen con bajo contraste en la que existe una evidente predominancia de los niveles claros (nieve + foga blanca). El resultado de una ecualización produce una imagen con contrastes mejorados con respecto a la imagen original, pero resulta evidente que algunos tonos de gris medios están forzados. La

calidad de la imagen con la especificación de histograma es claramente superior. En el ejemplo del que hablamos, para especificar el histograma de la imagen final, se ha tenido en cuenta que existen algunas regiones muy oscuras en la imagen (ojos y sombras), aunque la predominancia neta es de niveles muy claros.



## Tratamiento de la información de color

Todas las transformaciones puntuales que hemos analizado se han aplicado a imágenes en blanco y negro. La generalización para imágenes en color puede realizarse me-

diante dos alternativas que generan resultados distintos. Aunque consideraremos los diferentes ejemplos utilizando una corrección gamma, los resultados son generalizables a cualquier otro tipo de transformación.

### Aplicación de la transformación puntual a los componentes de color por separado (corrección de las componentes)

La primera estrategia es la más evidente; consiste en aplicar la transformación puntual a cada uno de los componentes de color de forma individual. En el caso de una corrección gamma, obtendríamos la siguiente relación:

$$\begin{aligned}v_R[n, m] &= K \cdot (u_R[n, m])^{1/\gamma} \\v_G[n, m] &= K \cdot (u_G[n, m])^{1/\gamma} \\v_B[n, m] &= K \cdot (u_B[n, m])^{1/\gamma}\end{aligned}$$

Esta relación indica que la transformación puntual se aplica a cada componente ( $R$ : rojo,  $G$ : verde,  $B$ : azul) de la imagen original para obtener los componentes de color de la imagen resultante. Esta alternativa es la que utilizan por lo general los programas de tratamiento y mejora de imágenes comerciales (Adobe Photoshop, Corel PhotoPaint, etc.), que casi siempre produce resultados bastante satisfactorios.

En las imágenes que encontramos a continuación se muestra el resultado de aplicar una corrección de gamma con valor igual a 2 a una imagen en color subexpuesta.



Imagen original subexpuesta



Imagen con corrección de gama independiente para cada canal de color

El principal problema de este procedimiento es que aparece un ligero cambio en el tono y la saturación de los colores. El cambio se hace más pronunciado a medida que la curva de la transformación puntual difiere en mayor grado con respecto a la aplicación identidad. Para analizar la aparición de este problema podemos considerar el resultado de aplicar la corrección de gamma a un píxel cuyos componentes sean  $(R, G, B) = (175, 100, 25)$ . Para un valor de gamma igual a 2, obtendremos que los valores de cada componente serán:

$$R' = \frac{255}{\sqrt{255}} \sqrt{175} = 211$$

$$G' = \frac{255}{\sqrt{255}} \sqrt{100} = 196$$

$$B' = \frac{255}{\sqrt{255}} \sqrt{25} = 80$$

Este resultado nos indica que, en nuestro ejemplo, el componente azul (el más pequeño) ha aumentado de manera proporcional más que los otros dos componentes, lo cual supondrá un cambio en el tono y la saturación del color asociado.

La siguiente figura muestra el color original y el color obtenido con una gamma igual a 2, donde la corrección gamma ha introducido un aumento de luminosidad pero también un pequeño cambio en el tono de color, a pesar de que en la mayoría de las transformaciones habituales este cambio de tono no es excesivamente importante. En la misma figura también podemos ver el color que se obtendría utilizando la segunda alternativa para el tratamiento de componentes de color, que se describe en el siguiente subapartado.



### Aplicación de la transformación puntual al componente de luminancia (corrección de intensidad)

En esta alternativa la transformación puntual se sigue aplicando, como en el caso de imágenes en blanco y negro, sobre los valores de luminancia. Para ello, el proceso para modificar un píxel de color exige determinar en primer lugar el nivel de luminancia de cada elemento de la imagen. Una vez conocido este nivel, se determina el cambio que experimentará cada píxel y se aplica esta constante multiplicativa a todos los componentes de la imagen. Podemos resumir el proceso en las siguientes etapas:

- 1) Calcular la luminancia asociada a cada píxel.

$$y[n, m] = 0,3 \cdot u_R[n, m] + 0,59 \cdot u_G[n, m] + 0,11 \cdot u_B[n, m]$$

2) Modificar cada componente de forma proporcional al cambio experimentado por la transformación de la luminancia.

$$v_R[n, m] = \left( \frac{f(y[n, m])}{y[n, m]} \right) \cdot u_R[n, m]$$

$$v_G[n, m] = \left( \frac{f(y[n, m])}{y[n, m]} \right) \cdot u_G[n, m]$$

$$v_B[n, m] = \left( \frac{f(y[n, m])}{y[n, m]} \right) \cdot u_B[n, m]$$

Podéis apreciar que en la ecuación anterior todos los componentes son modificados por un mismo factor multiplicativo, lo cual significará que el procedimiento garantiza el mantenimiento de las propiedades de tono y saturación del color y que sólo se modifica el componente de brillo.

En el caso considerado en el subapartado anterior,  $f(\cdot)$  tomaría la expresión de la función de corrección gamma. Para el píxel con valor  $(R, G, B) = (175, 100, 25)$  el resultado de esta transformación sería:

$$y = 0,3 \cdot 175 + 0,59 \cdot 150 + 0,11 \cdot 25 = 144$$

La corrección gamma con un valor del parámetro igual a 2 convierte este nivel de luminancia en:

$$f(y) = \frac{255}{\sqrt{255}} \sqrt{144} = 171$$

De este modo, el resultado de la transformación del píxel de color será:

$$R' = \frac{191}{144} \cdot 175 = 232$$

$$G' = \frac{191}{144} \cdot 150 = 199$$

$$B' = \frac{191}{144} \cdot 25 = 33$$

La imagen de la siguiente figura muestra el resultado de aplicar una corrección gamma a la misma imagen que hemos considerado en los ejemplos anteriores. El resultado muestra que los tonos de colores y su saturación son mucho más parecidos a los de la imagen original.



Corrección gamma de una imagen subexpuesta aplicando la corrección en intensidad

El principal problema de la corrección del color basada en la intensidad es que no existe ninguna garantía de que una vez realizado el producto por la constante multiplicativa, los niveles de color se mantengan dentro de los márgenes esperados. Esto significa que uno de los componentes puede tener valores superiores a 255, por lo que deberemos limitar su valor de alguna forma artificial. La limitación del valor del componente puede introducir, de nuevo, colores falsos que no concuerdan con la realidad. En general, se suele considerar que la corrección por componentes produce resultados bastante aceptables y no es necesario utilizar la corrección por intensidad.

## Transformaciones puntuales de ámbito local

Hasta ahora las transformaciones puntuales analizadas se aplican sistemáticamente a todos los píxeles de la imagen. Este método suele ser suficiente para mejorar imágenes en las que la causa degradante está distribuida de una manera uniforme en toda la escena. Así, un bajo nivel de contraste en la totalidad de la imagen puede compensarse con una única función de enfatización o una ecualización del histograma que se aplica de manera sistemática a todos los elementos de la imagen.

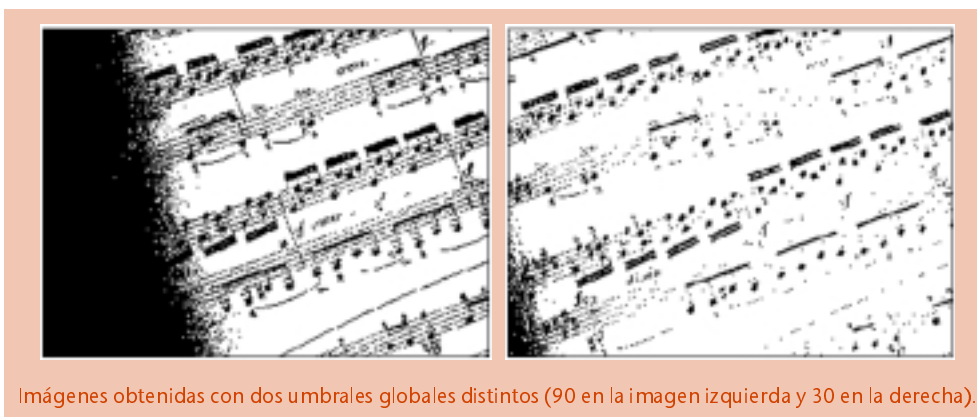
Sin embargo, en algunas imágenes es posible que la degradación no esté distribuida de manera uniforme, de modo que aparecerían regiones con reducida iluminación o bajo contraste, mientras que otras zonas permanecen correctamente iluminadas. En estas circunstancias, el empleo de una única función global para toda la imagen no suele producir los resultados deseados. Considerad, por ejemplo, la imagen de la siguiente figura, en la que, debido a una falta de iluminación uniforme, la parte de la izquierda aparece más oscura que la de la derecha. La imagen tiene una naturaleza claramente bimodal que no aparece implícita en su histograma, al no identificarse los dos picos principales.



Si el objetivo es binarizar la imagen para separar el contenido impreso con respecto al fondo del papel, el uso de un único umbral global parece insuficiente. En efecto, en la siguiente figura se muestra el resultado obtenido utilizando dos niveles de umbral distintos. Como se ve, en la imagen de la izquierda, el umbral elegido (nivel de



gris igual a 90) parece excesivamente elevado debido a que la parte menos iluminada de la imagen queda codificada como negro, de modo que pierde la información que contiene. En la imagen de la derecha se ha reducido el umbral (nivel de gris igual a 30) con objeto de poder visualizar la información contenida en la parte más oscura. Sin embargo, este nivel de umbral introduce pérdidas de información en la parte más iluminada. Así pues, determinar un umbral único que permita visualizar correctamente la totalidad de la imagen es una tarea impracticable.



A partir de estos resultados, la solución al problema parece evidente: deberíamos utilizar distintas transformaciones puntuales en función de las características de cada región de la imagen. En nuestro ejemplo, tendríamos que variar el umbral según la zona de la imagen que se esté procesando en cada momento. En la figura adjunta se muestra la imagen obtenida mediante un procedimiento que utiliza esta metodología.



Los procedimientos para determinar la transformación puntual que se aplica a cada región de la imagen presentan una gran variedad. Una estrategia que se utiliza a menudo consiste en dividir la imagen en regiones y aplicar una transformación puntual distinta en cada región. En el ejemplo de la figura siguiente se muestra un ejemplo de mejora que utiliza esta metodología y que sirve para ilustrar uno de

sus principales problemas. En efecto, al aplicar una transformación puntual distinta para cada región, es posible que resulte visible el cambio de transformación y que se aprecie un efecto de bloque. En este ejemplo concreto, el efecto es muy pronunciado debido a que los bloques son muy pequeños y no se superponen; además, la degradación de la imagen es muy considerable.



Una solución al problema del efecto tablero consiste en aplicar una transformación puntual distinta para cada punto de la imagen, una transformación que se puede obtener como una interpolación de las cuatro funciones más próximas. El coste computacional es algo más elevado que el de la alternativa anterior, ya que para obtener la imagen transformada es preciso contar con el resultado de cuatro transformaciones puntuales para cada elemento de la imagen. Estos cuatro valores transformados se combinan posteriormente en función de la posición del píxel, asignan-

do un mayor o menor peso dependiendo de la distancia entre el elemento de la imagen y el centro de cada subimagen. La ecuación utilizada para realizar la combinación entre los resultados de cada transformación puntual puede ajustarse en función de la aplicación, aunque, por lo general, la más utilizada por su simplicidad y excelentes resultados es una ponderación lineal en función de la distancia. Se utilizan variaciones de este procedimiento en distintas aplicaciones comerciales para la mejora de imágenes fotográficas (sistema Digi3 de Photoprix).