

Transformaciones de Brillo

Rodrigo Javier Herrera García *

Las *transformaciones de brillo* son aquellos procesos donde el brillo o intensidad original de los píxeles se cambia por otro a través de algún criterio de transformación. Aunque de alguna manera, cualquier proceso sobre una imagen afecta el brillo de algunos o todos los píxeles, en esta sección se estudian aquellos que buscan mejorar la calidad visual o pictórica. Dos características básicas globales son generalmente afectadas: el brillo y el contraste de la imagen.

Para una definición formal, se considera que el rango de las intensidades o brillos de los píxeles de las imágenes original y transformada son los mismos. Si l denota la variable que indica el nivel de intensidad o brillo de un punto en una imagen, el rango de intensidades es entonces un intervalo que va desde cero hasta uno ($l \in [0, 1]$), donde la intensidad igual a cero ($l = 0$) corresponde al negro (mínimo brillo posible) y la intensidad igual a uno ($l = 1$) corresponde al blanco (máximo brillo posible). Sea $f(x, y)$ una imagen monocromática, con coordenadas espaciales x y y y sea l_i la variable que denota el nivel de intensidad de cada punto de la imagen, la transformación de brillo consiste en obtener una imagen $g(x, y)$ donde cada punto de $f(x, y)$ que tiene intensidad dentro del intervalo $[L_{i \min}, L_{i \max}]$ se han transformado a una intensidad que está dentro del rango de intensidades en el intervalo $[L_{o \min}, L_{o \max}]$ a través de

$$l_o = h(l_i) \quad \text{para } L_{i \min} \leq l_i \leq L_{i \max} \text{ y } L_{o \min} \leq l_o \leq L_{o \max} \quad (1)$$

donde $h(\cdot)$ es la función de transformación. Observe que para una transformación de intensidad completa de la imagen, los valores de $L_{i \min}$ y $L_{o \min}$ deben corresponder al valor de intensidad mínimo absoluto y $L_{i \max}$ y $L_{o \max}$ al valor de intensidad máximo absoluto en ambas imágenes. Desde una perspectiva más global los valores de intensidad mínimo y máximo absolutos, para ambos casos, debería ser 0 (negro) y 1 (blanco). No obstante, como se verá más adelante, los niveles mínimo y máximo de la imagen pueden no corresponder a cero y uno cuando la imagen a procesar tiene precisamente esa característica.

Por otro lado, para que la transformación sea invertible es necesario que la función de transformación h sea monótonamente creciente o decreciente en el intervalo para el cual está definida. En caso de no cumplir con esta condición, la imagen original no puede obtenerse a partir de la transformada. Es relativamente común que la función de transformación sea biunívoca para obtener tanto la imagen transformada como la original.

Las transformaciones de brillo derivadas de la ecuación (1) se han planteado para funciones de imagen continuas. Para imágenes digitales se debe tener en cuenta que los valores de intensidad son discretos y finitos. La representación de números discretos entre cero y uno dependen del número de bits asignado. En general, la función se describe como una función continua y luego se determinan los valores discretos dividiendo el rango total de intensidades en el número total de niveles de intensidad que se desea tener. Si el número de bits es 8, se tendrán 256 niveles entre negro y blanco y cada paso entre intensidades consecutivas tendrá una diferencia de 0,00390625 en decimal.

En las secciones siguientes se estudiarán algunas transformaciones típicas donde las funciones serán descritas en forma continua, por su facilidad en la definición. No obstante, estas transformaciones deben discretizarse y cuantificarse para poder procesar imágenes digitales. En general, la discretización de los niveles de intensidad se hace de manera uniforme, es decir se divide en pasos iguales entre los extremos del rango. Sin embargo no es una regla estricta ya que la discretización puede cumplir con una regla no uniforme.

*Profesor del Proyecto Curricular de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia.

1. Transformaciones Lineales de Intensidad

Con la definición de la ecuación (1) se pueden tener infinitas transformaciones. Existen algunas que por sus resultados son más utilizadas. Algunas de ellas se estudian con algún detalle en esta sección aunque las transformaciones posibles pueden generarse a gusto o necesidad de la aplicación. Sin embargo, la propiedad que es común a todas ellas es que están relacionadas, de alguna manera, con rectas. Otro tipo de funciones es posible pero se estudiarán más adelante.

La transformación de intensidades más sencilla corresponde a la determinada por la ecuación de una recta. La función de transformación está definida como

$$l_o = h(l_i) = a l_i + b \quad (2)$$

donde a es la pendiente de la recta y b es la constante de desplazamiento. Esta transformación es lineal. Puesto que la transformación está definida para un intervalo de intensidades $[L_{i \min}, L_{i \max}]$, que se espera sea transformado en el intervalo $[L_{o \min}, L_{o \max}]$, la pendiente y la constante de desplazamiento se pueden obtener como

$$a = \frac{L_{o \max} - L_{o \min}}{L_{i \max} - L_{i \min}}, \quad (3)$$

$$b = \frac{L_{i \max} L_{o \min} - L_{i \min} L_{o \max}}{L_{i \max} - L_{i \min}} \quad (4)$$

Los límites determinan entonces un segmento de recta cuyos puntos extremos son $(L_{i \min}, L_{o \min})$ y $(L_{i \max}, L_{o \max})$. Observe la gráfica de la función de transformación y los intervalos involucrados en la **Figura 1**. Cuando se determinan los parámetros de la transformación de los píxeles que pertenecen a la transformación, aquellos que no están incluidos también sufren modificación de su intensidad. De hecho, podrían haber varias posibilidades sobre las que el diseñador debe escoger. Estos píxeles juegan un papel importante en el momento de la presentación de los resultados.

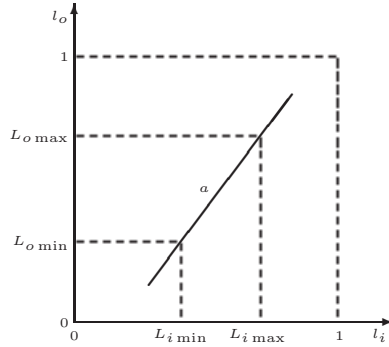


Figura 1: Transformación lineal del brillo de los píxeles.

La pendiente a es un valor que puede ser mayor, menor o igual a uno. Si $a > 1$ hay una expansión de contraste en la imagen transformada puesto que el intervalo $[L_{o \min}, L_{o \max}]$ es mayor que el intervalo $[L_{i \min}, L_{i \max}]$. Este tipo de operación se conoce como *ampliación* o *estiramiento de contraste*. En el intervalo obtenido no se aumenta el número de intensidades sino que se obtiene una mayor diferencia entre cada uno de ellos. La ampliación de contraste puede incluir también una modificación del brillo promedio del intervalo. Por otro lado, los píxeles que no están involucrados en la ampliación de contraste pueden ser modificados de acuerdo con el interés de los resultados. La **Figura 2** muestra algunas de estas opciones. Una opción es sencillamente eliminarlos haciendo que tomen un valor específico. La parte (a) de la Figura muestra que a los píxeles que están por fuera del intervalo de intensidades de interés se les anula asignándoles el valor de cero. La parte (b) muestra cómo a los píxeles que tienen intensidades que están por debajo de $L_{i \min}$ se les asigna el valor de $L_{o \min}$ y a los que tienen valores por encima de $L_{i \max}$ se les asigna $L_{o \max}$. La parte (c) de la Figura muestra otra opción que consiste en mantener los píxeles de

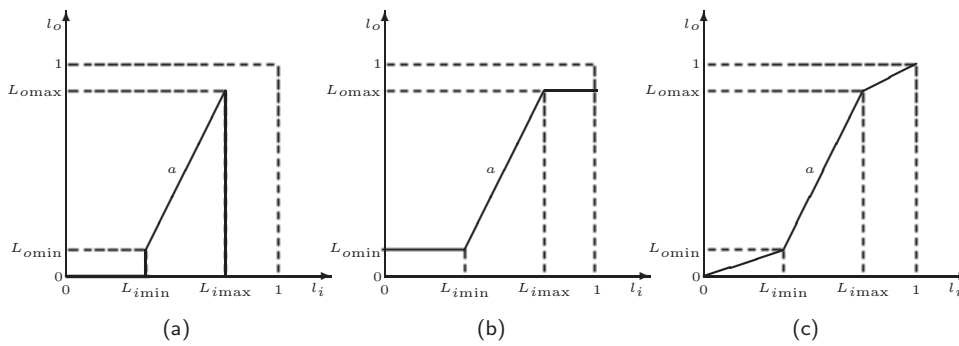


Figura 2: Transformación de ampliación de contraste con (a) eliminación, (b) recorte o (c) reducción de intensidades. La pendiente $a > 1$.

la imagen pero con un rango de intensidades menor. De cualquier forma, los píxeles que no pertenecen al intervalo de interés sufren una reducción en el rango de intensidades.

Por otro lado, si $a < 1$, el intervalo original se comprime produciendo una *reducción* o *encogimiento de contraste*. Las mismas definiciones de la ampliación de contraste se aplican para este caso. De hecho, en la parte (c) de la **Figura 2** se puede ver reducción de contraste en los extremos del rango de intensidades. Si todos los píxeles participan en la transformación de brillo, unos intervalos de intensidades serán ampliados mientras que otros serán reducidos. Aunque la Figura muestra sólo tres intervalos, no existe restricción al respecto. El número de intervalos puede variar dependiendo de la aplicación o de las características de cada imagen. Si $a = 1$, no hay variación en el contraste dentro del intervalo seleccionado pero podría haber un cambio de brillo.

Un ejemplo de una transformación del brillo de los píxeles se puede ver en la **Figura 3**. Allí se muestran los tres casos: estiramiento para las intensidades intermedias, reducción para las intensidades altas y no se modifican para las intensidades bajas. Sin embargo, el propósito es mejorar la presentación de la imagen aumentando el contraste en las intensidades intermedias. Las intensidades en el intervalo $[0, 0,15]$ se mantienen igual. Las intensidades intermedias en el intervalo $[0,15, 0,54]$ se amplían al intervalo $[0,15, 0,89]$, es decir $L_{i\min} = L_{o\min} = 0,15$, $L_{i\max} = 0,54$ y $L_{o\max} = 0,89$. Finalmente, las intensidades dentro del intervalo $[0,54, 1]$ se trasladan al intervalo $[0,89, 1]$. Las pendientes de los segmentos de recta son 1, 1,9 y 0,24, respectivamente.

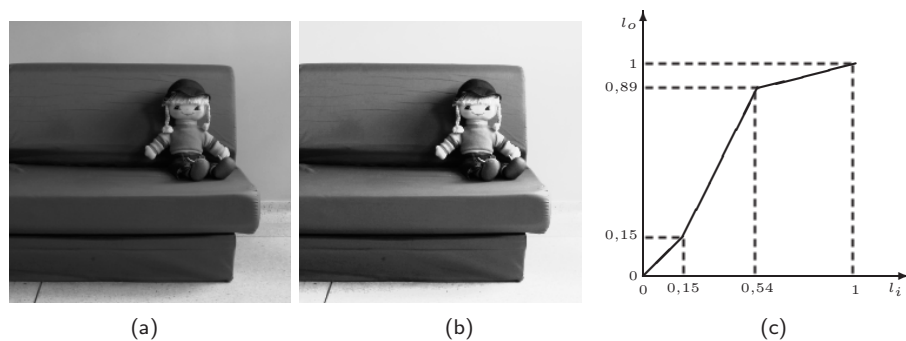


Figura 3: Ejemplo de estiramiento de contraste. La imagen original (a) se ha transformado en la imagen (b) a través de la función mostrada en (c). El brillo de los píxeles está cuantificado en 256 niveles.

Una transformación de estiramiento muy común se presenta cuando $L_{o\min} = 0$ y $L_{o\max} = 1$. Esta transformación es útil cuando la imagen presenta muy bajo contraste. Si las intensidades mínima y máxima de una imagen son $L_{i\min}$ y $L_{i\max}$, respectivamente, el estiramiento se da en todos los niveles de gris presentes en la imagen original. La gráfica de la transformación se muestra en la parte (a) de la **Figura 4**. En la imagen resultante se obtiene niveles de gris desde negro hasta blanco, porque el estiramiento se realiza sobre todo el rango de intensidades. Sin embargo, si la imagen original tuviera todos los niveles

de brillo, con esta transformación se presentaría recorte en los niveles de brillo oscuros y claros.

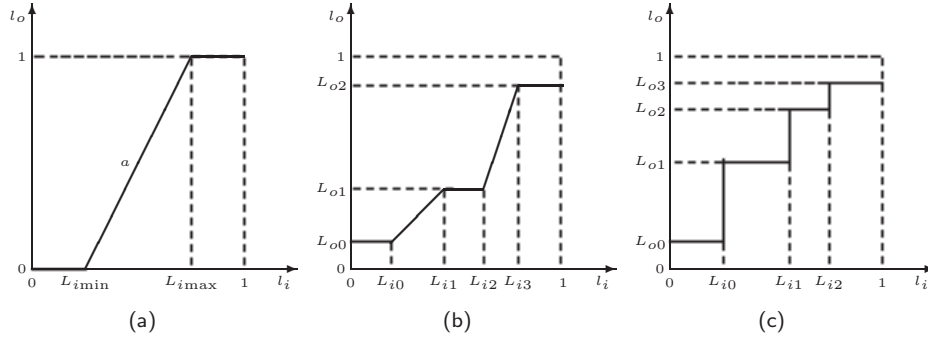


Figura 4: Ejemplos de transformaciones de brillo. (a) Estiramiento del rango de brillos para imágenes con bajo contraste. (b) Recortador de brillos. (c) Discriminador de brillos a través de umbrales.

Cuando la función de transformación tiene segmentos de recta con pendientes en cero se tienen los *recortadores* o *limitadores de brillo*. En estos casos, todo un intervalo de intensidades, en la imagen original, tendrá una sola intensidad en la imagen transformada. Un ejemplo de este tipo de transformaciones se muestra en la parte (b) de la **Figura 4**. Todos los píxeles que tienen intensidades que estén entre 0 y L_{i0} se convierten en píxeles con intensidad igual a L_{o0} ; Los que tienen intensidades entre L_{i1} y L_{i2} tendrán intensidad igual a L_{o1} ; y así sucesivamente. El concepto de limitador se refiere al hecho que los intervalos de entrada están restringidos a sólo un valor en la salida

Si se requiere un limitador o recortador puro entonces las pendientes de los segmentos inclinados deben ser uno. Si las pendientes son mayores que uno, se tienen estiramientos además de la limitación de brillos. Si las pendientes son menores que uno también se pueden tener limitadores o recortadores pero con contracción de contrastes.

Los *discriminadores por umbrales* son aquellas transformaciones donde las intensidades de los píxeles se convierten en una intensidad que es seleccionada de un conjunto finito menor que los posibles de tener con la cunatificación. En este tipo de transformaciones se busca principalmente lograr niveles de contraste fuertes entre rangos de intensidades. En efecto, Un ejemplo de discriminador por umbrales se puede observar en la parte (c) de la **Figura 4**. Un caso especial es cuando se requiere obtener una imagen *binaria*¹. Por ejemplo una página de texto obtenida a través de un escáner tiene muchos niveles de brillo en sus píxeles. Sin embargo, para fines prácticos, debería tener sólo dos: blanco para el fondo y negro para las letras y números. Con una función de transformación de discriminación por umbral se puede obtener esta imagen binaria. La **Figura 5** muestra el proceso de conversión en imagen binaria (parte b) de una imagen real (parte a) y la función de discriminación por umbral utilizada (parte c). La imagen binaria puede ser usada para posterior procesamiento en dactilografía. Para obtener imágenes binarias a través de umbrales, la función de transformación se define como

$$l_o = h(l_i) = \begin{cases} 0, & l_i \leq T, \\ 1, & l_i > T. \end{cases} \quad (5)$$

donde T es el nivel de brillo que separa cuáles píxeles se convierten a negro y cuáles se convierten a blanco. Cualquier función de transformación, con cualquier número de segmentos de recta, con pendiente igual a cero, que tenga discontinuidades podrá ser considerada como función de discriminación por umbrales sin necesidad de que la imagen transformada sea considerada binaria.

Por la adaptabilidad del ojo humano al brillo general de una imagen, en algunas oportunidades es posible observar mejor algunos detalles cuando se invierten los brillos de la imagen. La inversión consiste en hacer que las partes oscuras de la imagen se vuelvan claras y las partes claras en oscuras. Usualmente, a este tipo de transformación se le conoce como conversión de una imagen a *negativo*. Por extensión, una

¹Una imagen *binaria* es aquella que tiene sólo dos niveles de intensidad que, en general, corresponden al negro y al blanco

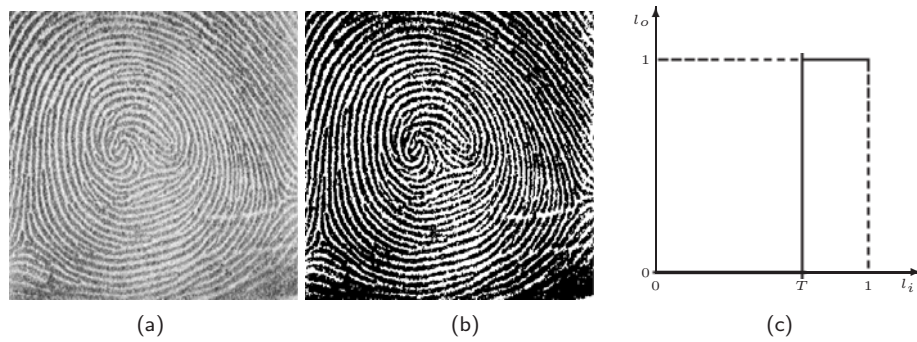


Figura 5: Obtención de una imagen binaria por medio de un discriminador por umbral. La huella dactilar de la imagen original (a) tiene diferentes niveles de brillo. La imagen (b) es el resultado de la discriminación de brillos en sólo dos: negro y blanco. La función de transformación utilizada se puede ver en (c).

imagen con los brillos naturales se le conoce como *positivo*. La función de transformación está definida como

$$l_o = h(l_i) = 1 - l_i \quad 0 \leq l_i \leq 1 \quad (6)$$

donde 0 es el nivel definido para el negro y 1 para el blanco. Cuando un píxel tiene el nivel de blanco, la función lo convierte en negro o, cuando tiene el nivel de negro, lo convierte en blanco. Lo mismo sucede con los valores intermedios pero teniendo en cuenta las diferencias frente al blanco y al negro. La **Figura 6** muestra un ejemplo de esta transformación y la gráfica de la función de transformación.

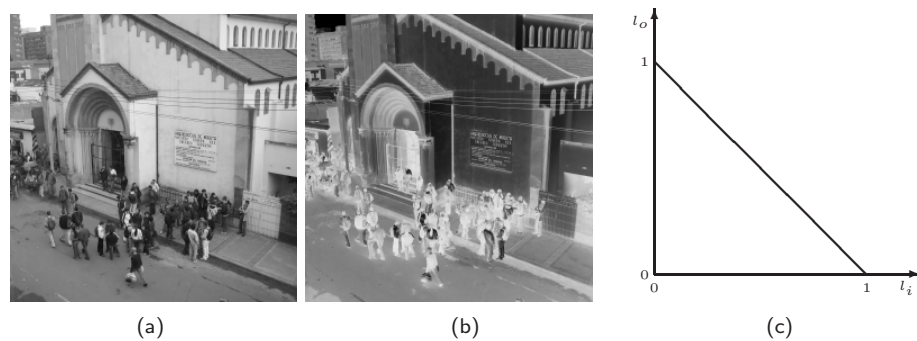


Figura 6: Transformación de una imagen a negativo. (a) Imagen original; (b) imagen en negativo; (c) función de transformación de intensidades.

Cuando se requiera resaltar un rango de intensidades del resto de la imagen se puede utilizar la transformación de *resaltado*. Esta transformación se puede obtener de dos maneras diferentes: sin fondo y con fondo. La transformación de resaltado sin fondo se define como

$$l_o = h(l_i) = \begin{cases} 1, & L_{i1} \leq l_i \leq L_{i2} \\ 0, & l_i < L_{i1} \text{ o } l_i > L_{i2} \end{cases} \quad (7)$$

donde L_{i1} y L_{i2} son los extremos del intervalo de intensidades de gris que se quiere resaltar. La transformación de resaltado con fondo tiene una pequeña diferencia. En este caso, el resto de intensidades (no resaltadas) se mantienen presentes en la imagen. La definición queda

$$l_o = h(l_i) = \begin{cases} 1, & L_{i1} \leq l_i \leq L_{i2} \\ l_i, & l_i < L_{i1} \text{ o } l_i > L_{i2} \end{cases} \quad (8)$$

En la **Figura 7** se muestra el resultado del resaltado para un intervalo de brillos con y sin fondo. Los errores que se presentan se deben fundamentalmente a la iluminación no uniforme sobre la muestra.

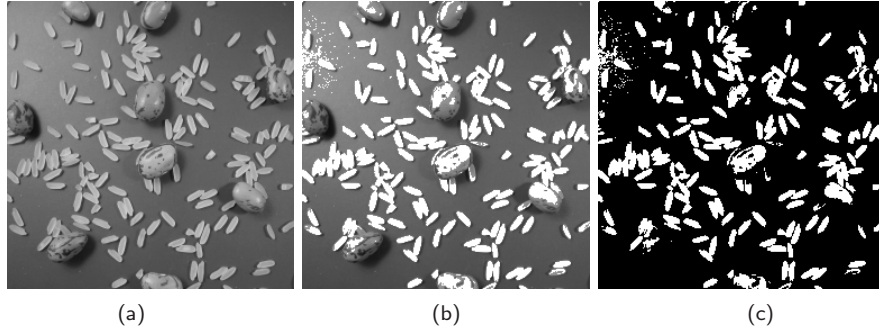


Figura 7: Ejemplo de transformación de resaltado para un intervalo de intensidades de gris. (a) Imagen original; (b) resaltado con fondo; (c) resaltado sin fondo.

Dentro de las transformaciones de resaltado, existe una que es de especial interés para determinar el número de bits visualmente significativos en una imagen. Esta transformación se denomina *extracción de bits* de la imagen y obtiene la imagen producida por cada uno de los bits de los códigos de brillo de cada píxel. Supongamos que la intensidad o brillo de cada píxel está cuantificado uniformemente en palabras digitales de B bits. El proceso de extracción de bits consiste en obtener una imagen que muestre el estado de un bit de cada palabra digital de todos los píxeles. La imagen resultante es una imagen binaria donde el blanco representa que el bit es uno y el negro que el bit es cero. Si l_i es el nivel de brillo de un píxel que está codificado como un número entero en B bits, la construcción del código, discriminado por el valor de cada bit, sería

$$l_i = b_{B-1}2^{B-1} + b_{B-2}2^{B-2} + \dots + b_22^2 + b_12^1 + b_02^0 \quad (9)$$

donde b_i puede ser cero o uno e i representa la posición del bit dentro de la palabra digital². Si ahora l_i es el nivel de brillo de un píxel codificado en B bits como un número real positivo que va desde 0 hasta 1 en punto fijo, la construcción del código, discriminado por el valor de cada bit, sería

$$l_i = b_{B-1}2^{-1} + b_{B-2}2^{-2} + \dots + b_22^{-(B-2)} + b_12^{-(B-1)} + b_02^{-B} \quad (10)$$

Entonces, la transformación de brillo para extraer el bit b_i está definida como

$$l_o = \begin{cases} 0, & \text{si } b_i = 0 \\ 1, & \text{si } b_i = 1 \end{cases} \quad (11)$$

Luego, como se mencionó, l_o toma sólo valores de 0 (negro) o 1 (blanco) para cada píxel formando una imagen binaria. La **Figura 8** muestra la extracción de cada uno de los bits de la imagen mostrada en la parte (a) de la **Figura 6** cuyos brillos están codificados en palabras de 8 bits ($B = 8$). Se puede observar que los bits menos significativos parecen no proveer información sobre la estructura de la imagen. Es posible que la eliminación de estos bits no afecte significativamente la calidad pictórica de la imagen.

2. Transformaciones No Lineales de Intensidad

Hasta ahora, la función f de la ecuación (1) se ha definido a trazos. Sin embargo, puede también obtenerse transformaciones con funciones definidas para todo el intervalo de brillos. De hecho, se pueden utilizar polinomios, funciones exponenciales o logarítmicas o cualquier otro tipo de ecuaciones que sirvan a un propósito dentro de la imagen. Es común, por ejemplo, que el comportamiento de los detectores, en el proceso de captura de la imagen, tengan un comportamiento no lineal conocido. Generalmente, estos comportamientos están descritos por ecuaciones matemáticas que pueden ser corregidos después, durante el procesamiento digital de la imagen. No obstante la gran cantidad de funciones que pueden aplicarse a la transformación de niveles de brillo, sólo se mencionarán unos pocos, a manera de ejemplo.

²De acuerdo con la codificación, b_0 representa el bit menos significativo o LSB (*Least Significant Bit*) mientras que b_{B-1} el bit más significativo o MSB (*Most Significant Bit*).

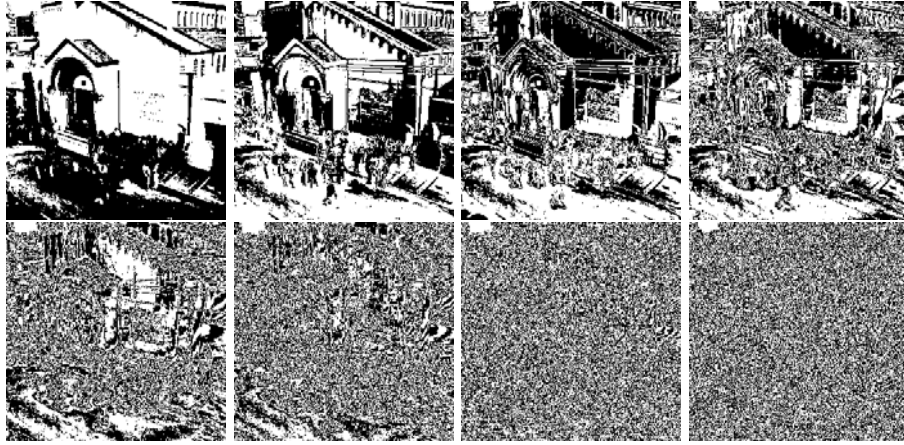


Figura 8: Extracción de bits en una imagen. Las imágenes de arriba corresponden a la extracción de los bits b_7 , b_6 , b_5 y b_4 y las imágenes de abajo a los bits b_3 , b_2 , b_1 y b_0 de la imagen original de la **Figura 6**.

Una transformación de niveles de gris que modifica el brillo general de la imagen consiste en aplicar una potencia a cada uno de los niveles de brillo de los píxeles. Para aplicar esta transformación es conveniente trabajar los niveles de manera normalizada, es decir, sobre un intervalo de intensidades entre cero y uno (cero para el negro, uno para el blanco). La transformación está definida como

$$l_o = h(l_i) = (l_i)^\gamma \quad (12)$$

donde γ es un número real positivo. Cuando $\gamma > 1$, el brillo de la imagen disminuye (la imagen se torna más oscura), el contraste en las partes oscuras se reduce y el contraste en las partes claras se aumenta. Cuando $\gamma < 1$, el brillo de la imagen aumenta (la imagen se torna más clara), el contraste en las partes oscuras se aumenta y el contraste en las partes claras se reduce. Cuando $\gamma = 1$ no hay modificación del brillo ni de los contrastes. Obviamente, el precio que se paga por aumentar el contraste en unas zonas es la reducción en las otras. La **Figura 9** muestra la disminución y el aumento del brillo de una imagen cuando $\gamma = 2$ y $\gamma = \frac{1}{2}$; también muestra gráficamente las funciones de transformación para los dos casos.



Figura 9: Transformación de niveles de gris de una imagen a través de la operación de potenciación. (a) Imagen original; (b) imagen transformada con $\gamma = 2$; (c) imagen transformada con $\gamma = \frac{1}{2}$; (d) gráficas de las funciones de transformación.

En conclusión, cualquier función que pueda ser aplicada al intervalo de niveles de gris puede ser utilizada como función de transformación. Lo importante es que la función produzca los resultados que se esperan. Obsérvese que en general las transformaciones aplicadas aquí buscaron una mejora en la presentación visual de la imagen. Sin embargo, pueden existir otros elementos de juicio para determinar la función más apropiada. Es frecuente, por ejemplo, que en las mediciones de intensidad, si los rangos son muy grandes, se utilicen los logaritmos de los datos para compararlos. Esto permite una ampliación del rango de intensidades que se pueden procesar.

3. Modificación a Través del Histograma

Como se vio en el capítulo La Imagen Digital, el histograma de una imagen representa la frecuencia relativa de ocurrencia de los niveles de gris presentes en la imagen. Su representación es global y no indica algo respecto del contenido de la imagen. Por esta razón, el histograma es una herramienta útil para cambiar globalmente características como brillo y contraste de las imágenes con la intención de mejorar su presentación visual.

Aunque en la sección anterior no se mencionó al histograma, las transformaciones aplicadas allí producen modificaciones de manera que el histograma de la imagen resultante es diferente al de la imagen original. Cuando se hace una modificación lineal del brillo general de la imagen, el histograma de la imagen resultante será muy similar al de la imagen original con sólo un desplazamiento de sus frecuencias relativas hacia niveles de gris más claros o más oscuros, dependiendo del tipo de modificación. Si el tipo de transformación no es lineal, el histograma de la imagen resultante puede ser bastante diferente porque se modifica la distribución de los niveles de gris.

El histograma de una imagen cualquiera puede tener formas muy diversas con algunas bandas de grises muy pobladas y otras con muy poca población. De hecho, una misma escena capturada con diferentes tipos de iluminación puede modificar el histograma significativamente. Entonces, una posibilidad de modificación de la presentación de la imagen puede consistir en buscar que las frecuencias de ocurrencia de una imagen sean similares sobre todo el rango de intensidades de gris. A la función de transformación que realiza esta operación se le conoce como *ecualización de histograma* y se busca que la distribución de niveles de gris sea uniforme.

El histograma se puede ver como una función de densidad de probabilidad en donde el valor de cada frecuencia (apropiadamente normalizada) indica la probabilidad de que aparezca un píxel con ese nivel de gris. Entonces, si l_i es la variable que representa los niveles de gris de una imagen, se buscará una función de transformación f que produzca la variable l_o y que realice la ecualización del histograma. Luego, de la ecuación (1) sabemos que

$$l_o = f(l_i) \quad (13)$$

Se denota el histograma de la imagen original como $h(l_i)$ para un intervalo de intensidades de gris $[l_{i1}, l_{i2}]$. La intención es encontrar la función de transformación de intensidades que produzca un histograma $g(l_o)$ con distribución uniforme sobre el intervalo de intensidades de gris $[l_{o1}, l_{o2}]$. La función de transformación debe cumplir con las siguientes condiciones:

- $f(l_i)$ debe ser de valor único,
- $f(l_i)$ debe ser monótonamente creciente en el intervalo $[l_{i1}, l_{i2}]$.

Estas condiciones preservan el orden entre negro y blanco dentro de la escala de grises. La propiedad monótona de la función de transformación implica que

$$\int_{l_{o1}}^{l_o} g(w) dw = \int_{l_{i1}}^{l_i} h(w) dw \quad (14)$$

Las integrales de las funciones de densidad de probabilidad se conocen como funciones de distribución acumulada. Si se supone que las dimensiones de la imagen son $N \times M$, entonces el histograma ecualizado $g(l_o)$ corresponde a la función de densidad de probabilidad uniforme g cuyo valor es

$$g(l_o) = \frac{NM}{l_{o2} - l_{o1}} \quad (15)$$

Entonces, reemplazando en la ecuación (14), se obtiene

$$\int_{l_{o1}}^{l_o} \frac{NM}{l_{o2} - l_{o1}} dw = \frac{NM}{l_{o2} - l_{o1}} (l_o - l_{o1}) = \int_{l_{i1}}^{l_i} h(w) dw \quad (16)$$

Luego, la transformación de niveles de gris se obtiene como

$$l_o = f(l_i) = \frac{l_{o2} - l_{o1}}{NM} \int_{l_{i1}}^{l_i} h(w) dw + l_{o1} \quad (17)$$

Dado que los histogramas son discretos, las funciones de densidad son discretas. Por consiguiente, la integral de la ecuación (17) se aproxima a una suma. La aproximación produce entonces una función de transformación discreta como

$$l_o = f[l_i] = \frac{l_{o2} - l_{o1}}{NM} \sum_{k=l_{i1}}^{l_i} h[k] + l_{o1} \quad (18)$$

Esta aproximación obviamente no produce un histograma ecualizado ideal. La **Figura 10** muestra una imagen sintética cuyo tamaño es de 256×256 píxeles y 256 niveles de gris, con su respectivo histograma, y la imagen ecualizada también con su histograma. Observe cómo la ecualización muestra una mejora en los contrastes de la imagen.

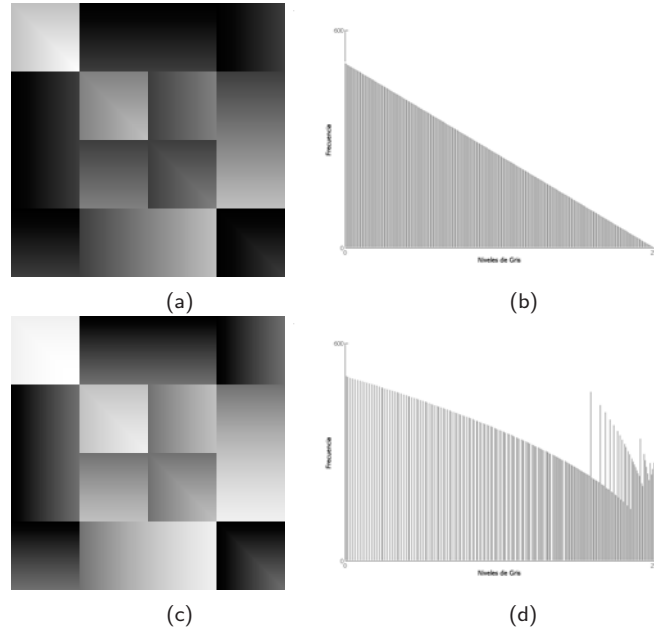


Figura 10: Ecualización de histograma. (a) Imagen sintetizada original, (b) histograma de la imagen original, (c) imagen ecualizada y (d) histograma de la imagen ecualizada.

La ecualización de histograma es una poderosa herramienta que se utiliza con mucha frecuencia en el procesamiento preliminar de las imágenes. Sus ventajas son obvias. Sin embargo, su mayor utilidad está en el hecho que se puede obtener automáticamente mientras que las transformaciones anteriores sólo son aplicables después que se han visto las deficiencias en la imagen y se decide aplicarlas. Adicionalmente, se deben tomar decisiones sobre los parámetros que requiere cada una de las transformaciones. La obtención del histograma de una imagen es sencilla y se puede computar sobre la marcha; el cálculo de los nuevos niveles de gris se puede implementar directamente aplicando la ecuación (18). En general, la imagen ecualizada se obtiene a través de tablas que relacionan los dos intervalos de intensidades de gris $[l_{i1}, l_{i2}]$ y $[l_{o1}, l_{o2}]$.

4. Modificación Dependiente de la Posición

Es usual considerar que la captura de las imágenes es ideal y que los dispositivos utilizados en la captura tienen un comportamiento uniforme. De hecho, estos dispositivos se construyen buscando un respuesta uniforme. Sin embargo, se pueden presentar degradaciones en las imágenes debido a que algunos factores afectan el comportamiento de estos dispositivos. Por ejemplo, en los sistemas ópticos, los lentes pueden atenuar la luz de manera diferente cuando se tiene en cuenta la distancia del eje óptico. A esto se le puede añadir el hecho que la sensibilidad de los detectores fotoeléctricos, dentro de un mismo dispositivo de captura, no es idéntica o, aún peor, la iluminación de una escena puede no ser uniforme.

Aquellas degradaciones que se presentan de manera aleatoria son difíciles de corregir por la imposibilidad de determinar cuándo o dónde se presenta la degradación. En cambio, si las degradaciones se presentan de manera sistemática, es posible corregirlas a través de la modificación del brillo de los píxeles. La corrección es válida sólo si la degradación se presenta en forma estable.

Para representar estas degradaciones, se considera un coeficiente de error multiplicativo dependiente de la posición dentro de la imagen, notado como $\varepsilon[m, n]$, que describe la modificación de la función de transferencia ideal. Supongamos que $y[m, n]$ representa la imagen original o verdadera (sin degradación) y $x[m, n]$ la imagen capturada o que contiene la degradación. Entonces,

$$x[m, n] = y[m, n] \varepsilon[m, n] \quad (19)$$

Una manera de obtener los coeficientes de error $\varepsilon[m, n]$ puede ser a través de la captura de una imagen de referencia cuyas intensidades son conocidas. Una posibilidad es la captura de una imagen con brillo constante. En la **Figura 11** se muestra la corrección del brillo de una imagen que tiene iluminación no uniforme a través de los coeficientes de error mostrados en la parte (b). Estos coeficientes fueron encontrados a través de la captura de una imagen de referencia con brillo constante. Se puede observar que los efectos de la iluminación no uniforme se eliminan en la imagen resultante.

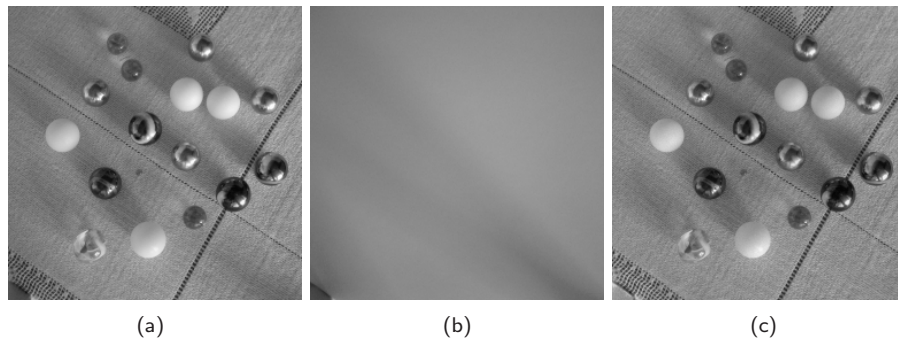


Figura 11: Corrección del brillo dependiente de la posición. A la imagen mostrada en (a) se le hace una corrección del brillo debido a la iluminación no uniforme mostrada en (b). La imagen en (c) muestra la corrección aplicando la transformación con los coeficientes de error obtenidos de la imagen (b).

La corrección de brillo por iluminación no uniforme también se puede lograr por medio de la sustracción de imágenes. El caso mostrado en la **Figura 11** se puede tratar como sustracción teniendo en cuenta que la imagen de referencia tiene brillo constante. Las variaciones de esta imagen muestran las modificaciones que se deben hacer sobre la imagen a corregir. En efecto, todos los píxeles que tengan un nivel de brillo inferior al de referencia indican que a los píxeles de la imagen a corregir se les debe aumentar proporcionalmente. Lo contrario debe hacerse cuando el brillo de los píxeles de la imagen de referencia sea mayor. Aplicando esta operación se puede observar el resultado para la misma imagen de la **Figura 11** en la **Figura 12**. Es notoria la similitud de los resultados obtenidos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la imagen de referencia fue también capturada. Para los casos donde se presenten degradaciones por razones diferentes puede no existir una imagen de referencia sino una función de transferencia que deberá ser aplicada como se muestra en la ecuación (19).

Bibliografía

- [1] Gonzalo Pajares Martinsanz y Jesús M. De La Cruz García, *Visión por Computador: Imágenes Digitales y Aplicaciones*, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, D.F., 2002.
- [2] John C. Russ, *The Image Processing Handbook*, Fourth Edition, CRC Press LLC, Boca Ratón, Florida, USA, 2002.
- [3] Marcos Faúndez Zanuy, *Tratamiento Digital de Voz e Imagen y Aplicación a la Multimedia*, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, D.F., 2001.

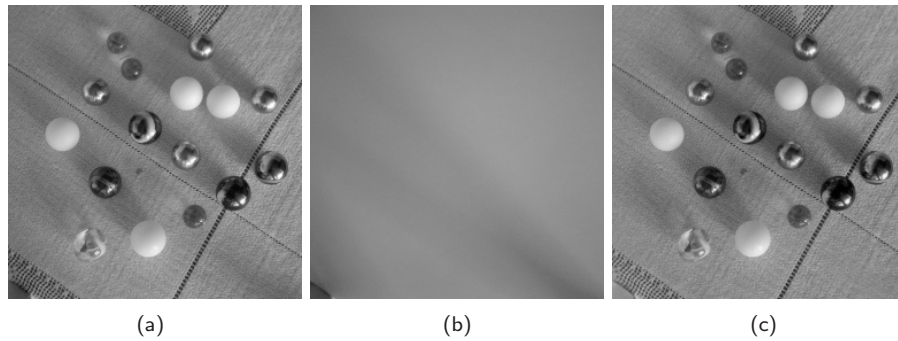


Figura 12: Corrección de la iluminación no uniforme por medio de sustracción de imágenes. (a) Imagen original con iluminación no uniforme, (b) imagen de referencia de brillo constante con iluminación no uniforme y (c) imagen corregida.

- [4] Rafael C. González and Richard E. Woods, *Digital Image Processing*, Second Edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 2002.
- [5] Steven W. Smith, *The Scientist and Engineers Guide to Digital Signal Processing*, Second Edition, California Technical Publishing, San Diego, California, 1999.
- [6] William K. Pratt, *Digital Image Processing*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1991.