

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**DEPARTAMENTO DE ÓPTICA**



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Código TFG: OPT02**

**Fotografía computacional, Imágenes de alto rango dinámico.**

**(HDR)**

**Computational photography, high Dynamic range (HDR)**

**images.**

**Supervisor/es: J. A. Quiroga**

**Rafael García Fernández**

**Grado en Física**

**Curso académico 2022-23**

**Convocatoria extraordinaria fin de estudios febrero.**

## **Resumen**

En este trabajo de fin de grado vamos a describir el problema que presenta tratar de fotografiar y representar una imagen de alto rango dinámico, empleando para solventarlo el proceso de HDR tal y como se describe en el artículo de Paul Debevec [1], y la técnica de mapeo tonal desarrollada por Erik Reinhard [2]. Por último, utilizaremos el código de Matlab de Mathias Eitz [3] para aplicar estas técnicas a nuestras propias imágenes.

## **Abstract**

In this project we are going to describe the problem of trying to photograph and represent a high dynamic range image, using the HDR process described in Paul Debevec's paper [1] and the tone mapping technique developed by Erik Reinhard [2] to solve it. Finally, we will use Mathias Eitz's Matlab code [3] to apply these techniques to our own images.

# Índice.

1. Introducción.....	2
2. Recuperación de la curva de respuesta de la cámara y construcción del mapa de radiancia de alto rango dinámico. ....	4
2.1. Recuperación de la curva de respuesta. ....	4
2.2. Construcción del mapa de radiancia.....	7
3. Mapeo tonal. ....	7
3.1. Operador global. ....	8
3.2. Operador local.....	10
4. Resultados. ....	12
5. Conclusiones .....	20
Anexo .....	21
Bibliografía: .....	22

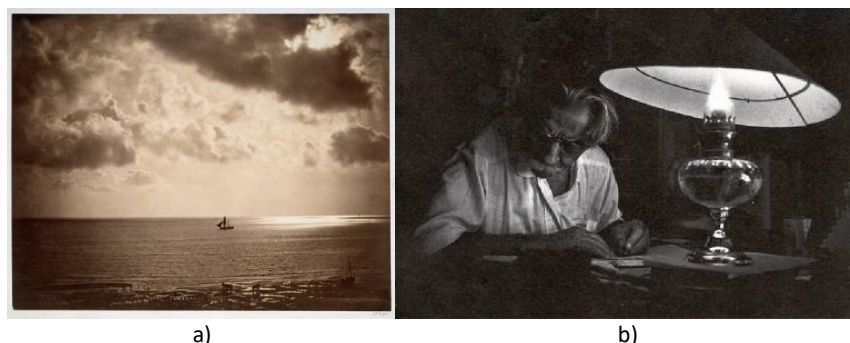
# 1. Introducción.

En este trabajo vamos a tratar el problema que supone la gran diferencia entre el alto rango lumínico que es capaz de captar nuestro ojo humano y el bajo rango lumínico que se puede capturar en una única fotografía o mostrar en una pantalla. Llamaremos rango dinámico de una escena a la diferencia entre el punto más iluminado y el punto menos iluminado de ella. La forma mediante la cual una cámara puede variar el rango lumínico que captura es mediante el tiempo de exposición. Esto es el tiempo que el objetivo permanece abierto, permitiendo que los fotones de la escena sean captados por la cámara. Si este tiempo de exposición es muy alto, las zonas de la escena que estén muy iluminadas saturarán (o quemarán) la imagen, mientras que, si el tiempo de exposición es bajo, en las zonas poco iluminadas apenas podrá apreciarse ningún detalle. Por otro lado, no solo basta con capturar un alto rango dinámico de luminosidad con nuestra cámara, también será necesario poder reproducirlo en una pantalla o papel fotográfico. Para solucionar estos problemas, emplearemos dos técnicas: el HDR y el mapeo tonal.

El término HDR (High Dynamic Range) se utiliza para nombrar la técnica que consiste en fotografiar una misma escena varias veces con distintos tiempos de exposición para después combinarlas en una sola imagen. De esta manera, con tiempos de exposición bajos se pueden obtener detalles de las zonas más iluminadas, mientras que con tiempos de exposición altos podremos obtener detalles de las zonas más oscuras para después combinar ambas informaciones.

El mapeo tonal es un proceso que consiste en renderizar una imagen con un alto rango dinámico de manera que tenga la mejor calidad posible al mostrarse en una pantalla o papel fotográfico, los cuales van a carecer del contraste necesario para mostrar todo el rango lumínico de una imagen HDR.

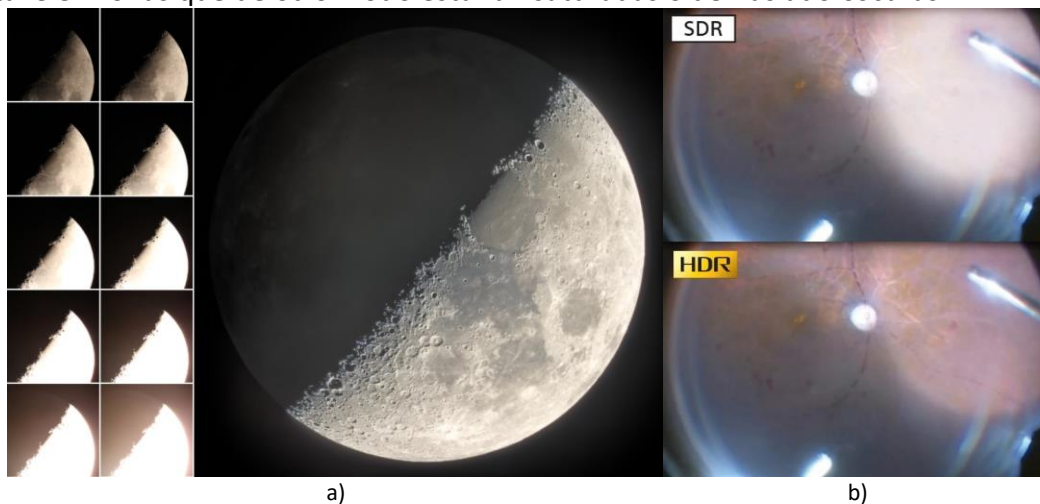
La historia del HDR [4] se remonta a la década de 1850, con Gustave Le Gray, el cual combinaba dos negativos de fotografías tomadas con un tiempo de exposición diferente en un único positivo. El origen del mapeo tonal se remonta a mediados del siglo XX, con la técnica del “dodging and burning”, la cual consistía en aumentar o reducir la exposición del positivo durante el revelado (ambas técnicas reflejadas en la Figura 1).



**Figura 1.** a) Gustave Le Gray “The Brig”. Primera fotografía de sus paisajes marinos exhibida [5]. b) W. Eugene Smith “Schweitzer at the Lamp” [6].

Estas técnicas fueron mejorando durante el siglo XX, y tuvieron una gran revolución a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, ya que, con la llegada de la era digital, los negativos y los papeles fotográficos fueron sustituidos por cámaras digitales y pantallas, las cuales permitían una mayor versatilidad y manipulación.

Hoy en día, el HDR no solo se utiliza en el arte, sino también en distintos campos de la ciencia y la tecnología. En astrofotografía, por ejemplo, el HDR es necesario ya que las fotos de objetos en el espacio tienen un alto rango dinámico y los tiempos de exposición son elevados. En la Figura 2 se puede ver como para representar en una misma imagen la cara visible y la cara oculta de la luna se ha empleado este método. Otro campo donde se utiliza el HDR es en medicina. Las cámaras que se utilizan durante una endoscopia o durante una cirugía se ven beneficiadas del proceso de HDR para ofrecer un mayor detalle en zonas que de otro modo estarían saturadas o demasiado oscuras.



**Figura 2.** a) foto de la luna tras aplicar un proceso de HDR y mapeo tonal [7]. b) foto de un procedimiento medico con y sin HDR [8].

En nuestro caso, vamos a utilizar el método de HDR descrito en [1] y el mapeo tonal tal y como se describe en [2], ya que son métodos lo bastante sencillos como para que alguien inexperto en la materia pueda utilizarlos, pero a la vez lo bastante eficientes como para obtener resultados satisfactorios.

**Nota:** como en este trabajo se utiliza vocabulario del ámbito “fotográfico” con el que el lector puede no estar familiarizado, hay un pequeño diccionario con vocabulario que puede resultar de utilidad en el Anexo I.

## 2. Recuperación de la curva de respuesta de la cámara y construcción del mapa de radiancia de alto rango dinámico.

### 2.1. Recuperación de la curva de respuesta.

Basándonos en [1], vamos a proceder a describir un algoritmo que se pueda implementar en Matlab para obtener la curva de respuesta de nuestra cámara fotográfica. Definamos primero la exposición  $X$  como el producto de la irradiancia  $E$  que percibe la cámara por el tiempo de exposición  $\Delta t$ . Para cada pixel, obtenemos un valor de brillo  $Z$ , el cual viene dado por una función no lineal que depende de la exposición  $X$ . Esta función, a la que llamaremos  $f$ , es la curva de respuesta de nuestra cámara, y será el objetivo a conseguir por nuestro algoritmo. Una vez la recuperemos, y suponiendo que  $f$  es monótona y creciente y por lo tanto invertible, podremos calcular la exposición de cada pixel como  $X = f^{-1}(Z)$ .

Para este proceso, supondremos que las distintas fotos, tomadas cada una con un tiempo de exposición  $\Delta t_j$ , se realizan en un periodo de tiempo lo suficientemente corto como para que no haya cambios en la iluminación de la escena. De este modo, podremos suponer que los valores de irradiancia  $E_i$  para cada pixel son constantes. Describiremos por tanto el valor del pixel como:

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \quad (1)$$

Donde el índice  $i$  denota el pixel que está siendo evaluado y el índice  $j$  la foto que se está utilizando para evaluarlo. Reescribimos la ecuación para trabajar con la función inversa:

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j$$

Aplicamos logaritmos neperianos a ambos lados de la ecuación (si bien podríamos utilizar el logaritmo en base 10 para posteriormente expresar los resultados en potencias de 10, hemos decidido respetar el formato original, ya que tanto en [1] como en el código que usaremos de [3] se utilizan logaritmos neperianos):

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j$$

Por último, vamos a definir  $g = \ln f^{-1}$  para simplificar la notación, obteniendo así el siguiente sistema de ecuaciones:

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (2)$$

Esta función  $g$  es la que queremos recuperar, así como los valores de irradiancia  $E_i$ . Como el dominio de  $Z$  es finito (toma valores enteros entre 0 y 255), recuperar la función  $g$  consistirá en obtener el número finito de valores que  $g(Z)$  puede tomar. Llamando

$Z_{min}$  y  $Z_{max}$  a los valores mínimo y máximo para  $Z$ ,  $N$  al número de píxeles y  $P$  el número de fotografías, buscaremos minimizar la siguiente función objetivo:

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 \quad (3)$$

donde el segundo término sirve para asegurarse de que la función  $g$  sea suave. Para este problema se ha utilizado la función  $g''(z) = g(z-1) - 2g(z) + g(z+1)$ , la cual sirve para unir los distintos valores de  $g(z)$  al recrear la función. El valor de  $\lambda$  sirve para ponderar el termino de suavizado, y debe ser elegido en función del ruido esperado en las medidas de  $Z_{ij}$ .

Vamos ahora a introducir una función de ponderación  $w(z)$  en el algoritmo, anticipándonos a la pronunciada pendiente que esta función  $g(z)$  presenta en sus extremos. Para ello empezaremos por definir una ligadura para nuestro sistema lineal de ecuaciones de la siguiente manera:

$$Z_{mid} = \frac{(Z_{max} + Z_{min})}{2}$$

$$g(Z_{mid}) = 0$$

Ahora, escogemos una función que de más peso a los valores que están alejados de los extremos. Es suficiente con escoger una función triangular de la siguiente manera:

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{para } z \leq Z_{mid} \\ Z_{max} - z & \text{para } z > Z_{mid} \end{cases} \quad (4)$$

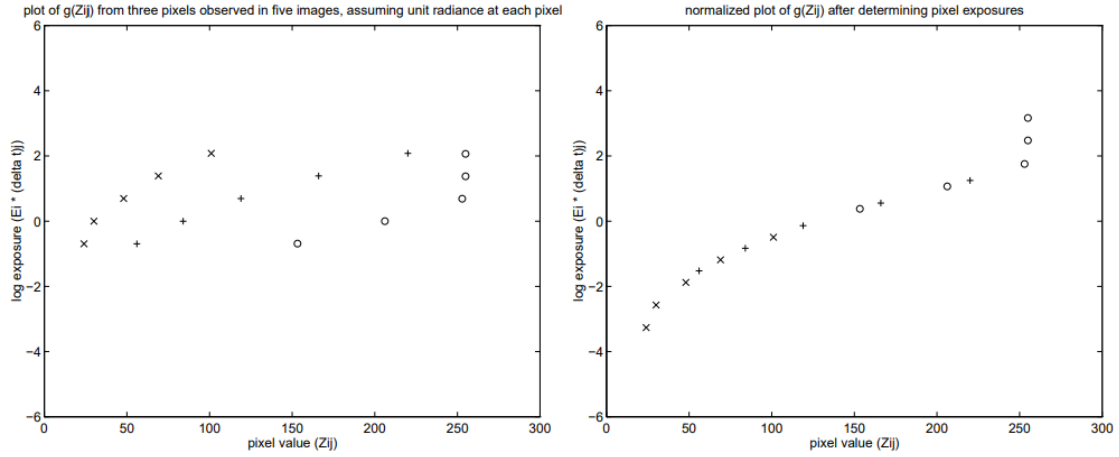
Por lo que la ecuación 3 queda de la siguiente manera:

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{w(Z_{ij})|g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j|\}^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} |w(z)g''(z)|^2 \quad (5)$$

Para resolver este sistema de ecuaciones lineales se utilizará el método de descomposición en valores singulares.

En la Figura 3 se muestra una explicación visual del procedimiento global. Cada símbolo ("x", "+" y "o") representa una muestra de  $g$  para un pixel diferente y cada uno de los cinco valores de un mismo símbolo están tomados con un tiempo de exposición  $\Delta t_j$  diferente. En la figura de la izquierda se ha supuesto que el valor de la irradiancia  $E_i$  es igual a uno. Vemos que la tendencia de cada grupo de símbolos es similar, pero que no están alineadas en el eje vertical como deberían a causa de haber escogido una irradiancia arbitraria e igual para todos los valores. En la imagen de la derecha, sin embargo, se representa como debería quedar la curva  $g$  una vez han sido calculados los valores apropiados de la irradiancia  $E_i$ , con una curvatura suave y monótona creciente.

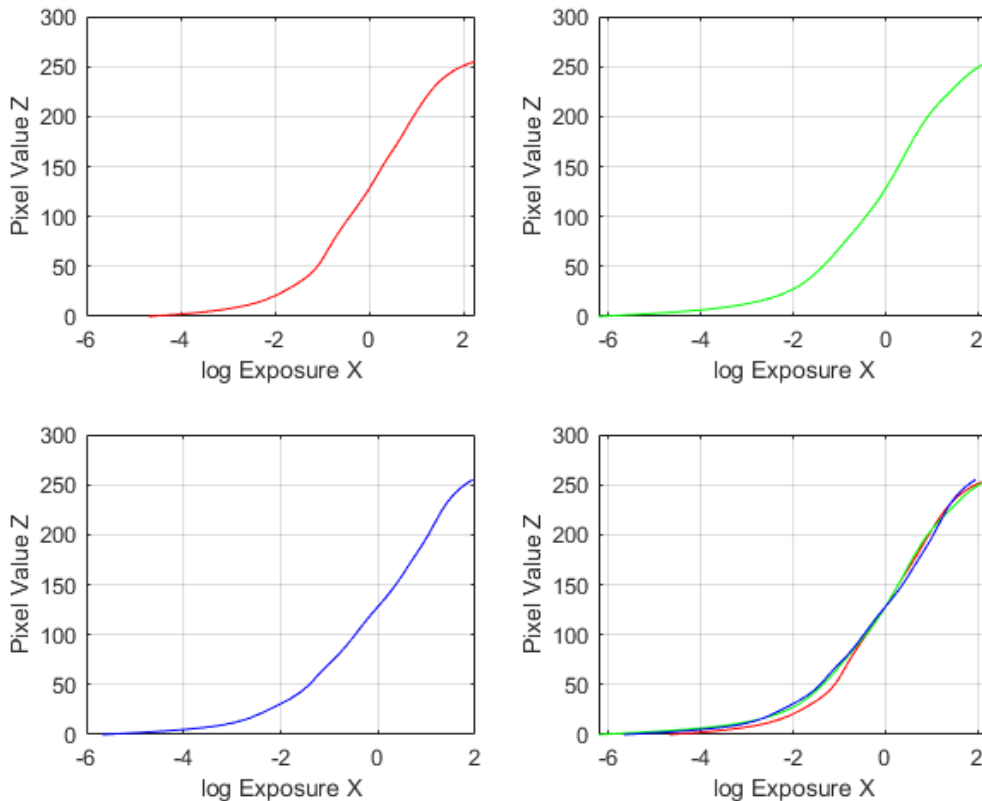




**Figura 3.** Ejemplo visual del proceso de obtención de la curva de respuesta  $g(z)$  [1].

El sistema de ecuaciones (4) tiene un número de ecuaciones del orden de  $N \cdot P + Z_{max} - Z_{min}$ . No será necesario resolverlas todas, ya que como hemos mencionado con anterioridad, solo buscamos obtener  $Z_{max} - Z_{min}$  valores de  $g$ . Para asegurarnos de que esta condición se cumpla, en [1] se recomienda analizar un número de píxeles  $N$  tal que  $N(P - 1) > (Z_{max} - Z_{min})$ . Sin embargo, en el código de Matlab proporcionado por [3],  $N$  se escoge directamente como  $N = (255 \cdot 2)/(P - 1)$ .

Para poner a prueba este método vamos a calcular las curvas de respuesta para las fotos proporcionadas por [3]. Tal y como podemos observar en la Figura 4, las curvas recuperadas tienen el aspecto deseado, es decir, son monótonas crecientes y tienen forma de “s”.



**Figura 4.** Curvas de respuesta por color para las fotos en [3]. En nuestro caso se ha escogido un factor de suavizado  $\lambda = 75$  para obtener unas curvas aún más suaves.

## 2.2. Construcción del mapa de radiancia.

Ahora que hemos obtenido la curva de respuesta  $g$ , podemos proceder a recrear el mapa de radiancia de nuestra escena. Para calcular los valores de radiancia  $E_i$ , asociados a los valores de los píxeles  $Z$ , utilizando la información disponible en todas las fotos con distintos tiempos de exposición  $\Delta t_j$ , emplearemos la siguiente función:

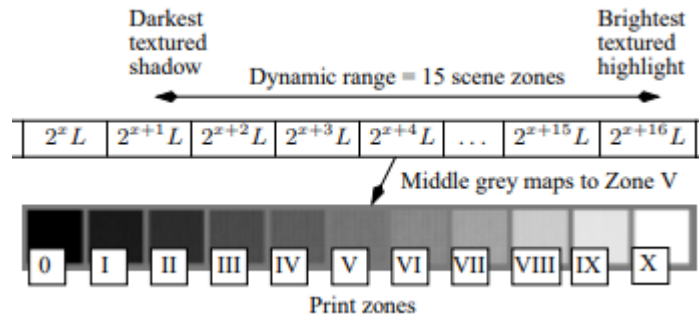
$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j]}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (6)$$

Que es básicamente la ecuación (2), pero aplicándole la ecuación de ponderación (4), de manera que los valores de los píxeles que estén más cerca de la parte media de la curva de respuesta influyan más en el valor final de la radiancia  $E_i$  calculada. El hecho de utilizar la información que nos dan las distintas imágenes a distintos tiempos de exposición nos permite reducir el ruido en los valores de la radiancia  $E_i$ , mientras que, al utilizar la función de ponderación, que ignora los valores de los píxeles saturados, evitaremos el impacto de los artefactos tipo “blooming” en nuestros valores de radiancia obtenidos.

## 3. Mapeo tonal.

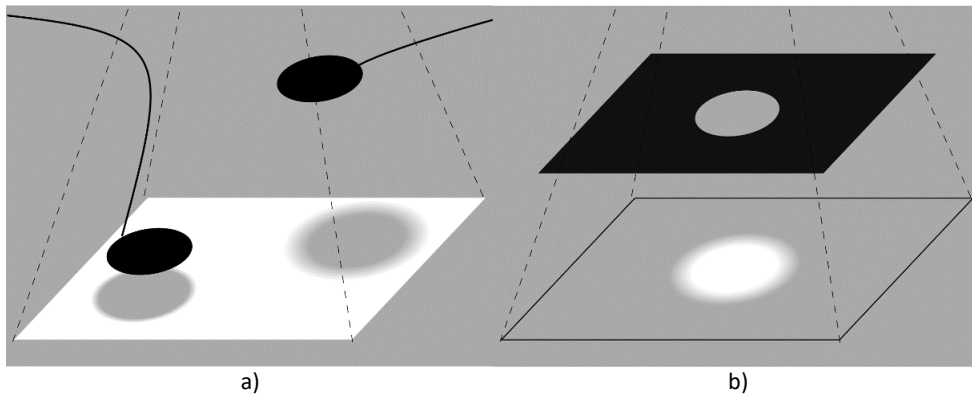
Una vez recreado el mapa de radiancia de alto rango dinámico, nos centraremos en el proceso de mapeo tonal. Como ya hemos mencionado antes, la función del mapeo tonal es comprimir el alto rango dinámico de iluminación obtenido en el apartado anterior en un rango lumínico que nuestro monitor sea capaz de reproducir. Para esta técnica hemos escogido el algoritmo descrito en [2].

Vamos a empezar por describir el sistema de zonas desarrollado por Ansel Adams, ya que servirá como base para la explicación de nuestro algoritmo. En este sistema se divide el rango lumínico de impresión de nuestra imagen (ya sea en papel o en una pantalla) en 11 zonas numeradas con números romanos. La zona 0 se corresponde al negro puro, mientras que la zona X se corresponde con el blanco puro. Ahora se dividirá el rango lumínico de la escena en zonas, para después asignarle la zona más oscura de la escena a la zona 0 de impresión y la zona con mayor brillo a la zona X.



**Figura 5.** Representación de las zonas de la escena y de las zonas de impresión [2].

En ocasiones, en lugar de las zonas más oscuras y más claras, se hará el matiz de escoger las zonas más claras y más oscuras que quieren verse con detalle en la imagen. Una elección que debe de hacer el fotógrafo es decidir cuál es la parte de la escena que tiene un brillo medio (gris medio) para asignarla así a la zona V de impresión. Esto puede variar según la clave de la escena, la cual se escoge también de manera subjetiva, y hace referencia a la iluminación general de una escena. Una escena que consista en una habitación pintada de blanco e iluminada será de clave alta mientras que una escena de una habitación a oscuras sería de clave baja. Esta serie de decisiones subjetivas que se deben tomar es en parte lo que complica la automatización de este proceso. Por último, cabe mencionar la técnica de “dodge and burn”, que ya fue mencionada en la introducción de este trabajo, y que consiste en modificar de manera local el brillo de una imagen, tal y como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Proceso de “dodging” en a) y “burning” en b) [9].

### 3.1. Operador global.

Ahora que hemos establecido el sistema de zonas como marco de referencia, vamos a explicar el algoritmo que emplearemos para el mapeo tonal. Empezaremos por obtener una aproximación de la clave de la escena, para lo cual usaremos la media logarítmica de la luminancia<sup>1</sup>,  $\bar{L}_w$  que definiremos a partir del número total de píxeles en la imagen  $N$  y de la luminancia de cada píxel  $L_w(x, y)$ :

<sup>1</sup> Nótese que durante esta parte del trabajo hablaremos de luminancia mientras que en la parte anterior hablábamos de radiancia. El motivo es respetar el vocabulario usado por [1] y [2].

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} e^{\{\sum_{x,y} \log[\delta + L_w(x,y)]\}} \quad (7)$$

Nótese que hemos introducido un pequeño valor  $\delta$  para evitar la singularidad que produciría tener un pixel completamente negro ( $L_w(x,y) = 0$ ). Para escalar esta luminancia usaremos la siguiente ecuación:

$$L(x,y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x,y) \quad (8)$$

Donde  $a$  es un factor de escala que tomará el valor de 0,18 para escenas con clave normal, y  $L(x,y)$  es nuestra luminancia escalada. Si nuestra escena es de clave alta o de clave baja se deberá entonces cambiar el factor  $a$ , que de ahora en adelante llamaremos valor clave. Un problema que seguimos teniendo a pesar de la ecuación (8), es que la mayoría de las escenas tienen un rango dinámico normal, pero con unos picos de alta luminancia en algunas regiones. Para solucionar esto, se busca un operador de mapeo tonal que comprima las luminancias altas, por ejemplo:

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y)}{1 + L(x,y)} \quad (9)$$

El cual equivale a escalar las luminancias altas con un factor de  $1/L$  y las luminancias bajas con un factor de 1. Este operador asegura que se puedan mostrar todas las luminancias, sin embargo, eso no siempre es lo deseado, por lo que se puede establecer un mejor operador que permita que las altas luminancias se quemen de un modo controlable:

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y) \left[ 1 + \frac{L(x,y)}{L_{white}^2} \right]}{1 + L(x,y)} \quad (10)$$

donde los valores de luminancia iguales o superiores a  $L_{white}$  son los mapeados a blanco puro. Este es el que conoceremos de ahora en adelante como operador global de Reinhard. Para la mayoría de las imágenes con alto rango dinámico, este operador parece ser lo bastante bueno como para que se puedan apreciar detalles en las zonas de bajo contraste. Sin embargo, para imágenes con un muy alto rango dinámico, es necesario aplicar un operador de mapeo tonal local, que aplique la técnica del “dodging and burning”.

### 3.2. Operador local.

Para construir dicho operador local, primero necesitamos construir una función que nos identifique el tamaño de lo que será una zona local. Para este cometido se utilizarán perfiles gaussianos circularmente simétricos:

$$R_i(x, y, s) = \frac{1}{\pi(\alpha_i s)^2} e^{\left[-\frac{x^2+y^2}{(\alpha_i s)^2}\right]} \quad (11)$$

donde “s” indica la escala a la que operan dichos perfiles. Utilizaremos estos perfiles para realizar una convolución que nos dé como respuesta un valor  $V_i$ :

$$V_i(x, y, s) = L(x, y) \otimes R_i(x, y, s). \quad (12)$$

donde  $\otimes$  representa el producto de convolución. Creamos así nuestra función centro-alrededor:

$$V(x, y, s) = \frac{V_1(x, y, s) - V_2(x, y, s)}{a \frac{2\phi}{s^2} + V_1(x, y, s)} \quad (53)$$

donde el centro  $V_1$  y el alrededor  $V_2$  son respuestas derivadas de las ecuaciones (11) y (12),  $a$  es nuestro valor clave y  $\phi$  es un parámetro de nitidez.

El objetivo de la ecuación 13 es definir una medida de localidad para cada pixel, lo que equivale a encontrar una escala  $s_m$  de tamaño apropiado. La ecuación 13 se evalúa para distintos valores de  $s$ , dando una media local de la luminancia entorno a un punto  $(x, y)$  de radio  $s$ . Buscamos encontrar una escala  $s_m$  que mantenga la diferencia entre los valores de  $V_1$  y  $V_2$  lo bastante pequeños, de manera que la luminancia entre ambas regiones sea parecida. Definimos para ello un límite  $\epsilon$  tal que:

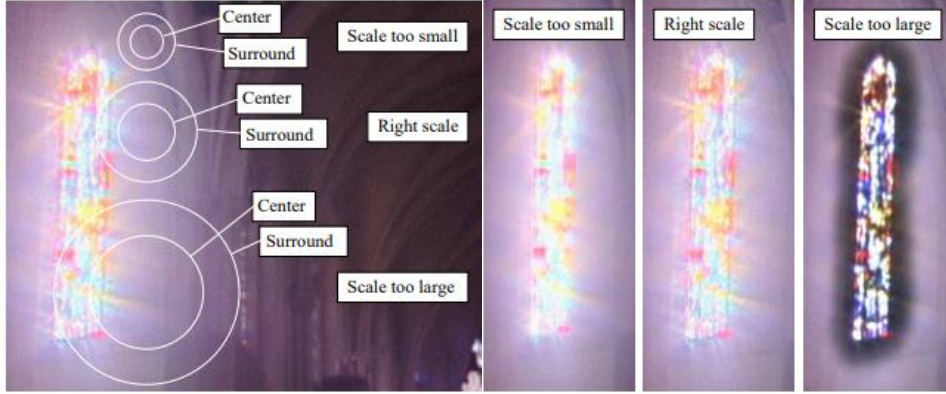
$$|V(x, y, s_m)| < \epsilon \quad (14)$$

donde  $s_m$  es la escala más grande (y no la primera) que cumple esta condición, tal y como se indica en la corrección de [3]. Utilizando  $V_1(x, y, s_m)$  como media local de la luminancia de ese pixel en la ecuación (9), obtenemos el operador local que buscábamos:

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + V_1[x, y, s_m(x, y)]} \quad (15)$$

Este operador equivaldrá a emplear la técnica del “dodging and burning” para cada pixel, donde la elección de “dodge” o “burn” se realizará para cada pixel en función de la

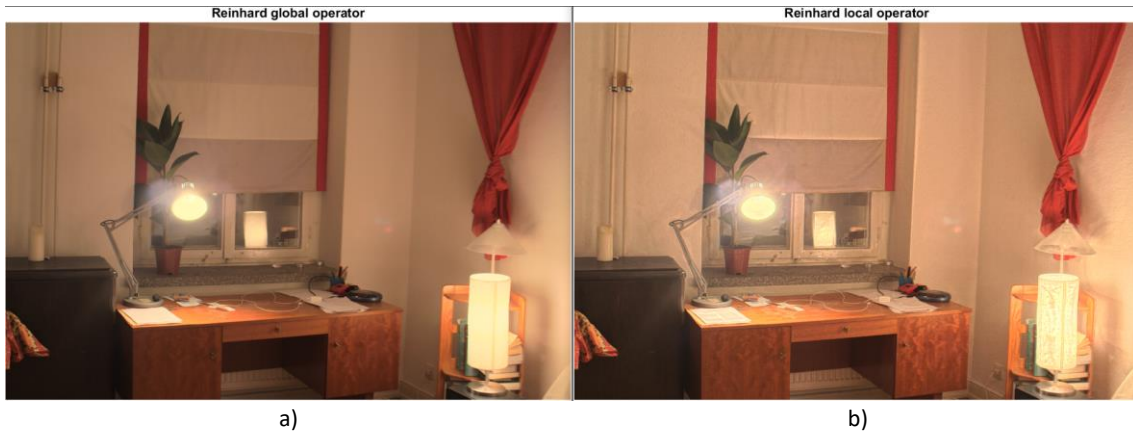
luminancia de los pixeles que se encuentren a su alrededor. De ahí que el valor que se escoja para los distintos parámetros que poseen las ecuaciones 13 y 14 sea crucial en la aplicación de esta técnica, ya que tener un “centro” y un “alrededor” del tamaño adecuado es lo que proporcionará una buena calidad de imagen, tal y como se indica en la Figura 7.



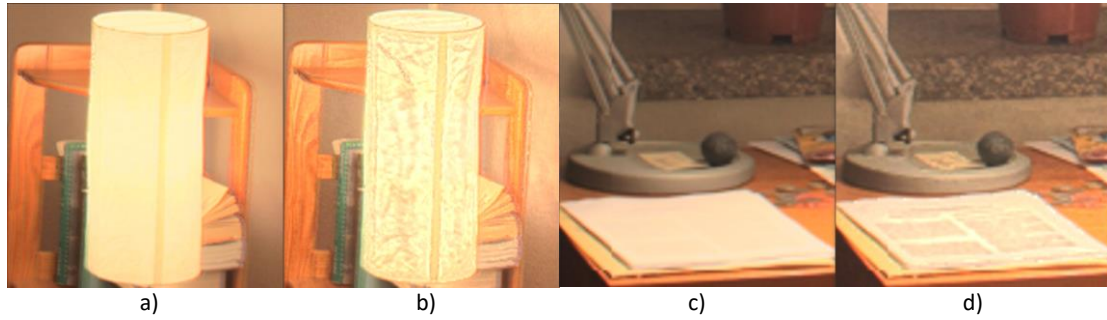
**Figura 7.** Ejemplo de lo que ocurre al escoger diferentes escalas. Una escala muy pequeña implica una pérdida de detalle en la imagen, mientras que una escala demasiado grande creará unos anillos negros en los cambios pronunciados de luminancia [2].

Una última diferencia en nuestro algoritmo con respecto a [2] es que los valores que usaremos para obtener las luminancias de cada color serán  $L = 0,2125 \cdot R + 0,7154 \cdot G + 0,0721 \cdot B$  tal y como se usa en [3], donde RGB será la intensidad lumínica de los canales de color rojo, verde y azul respectivamente.

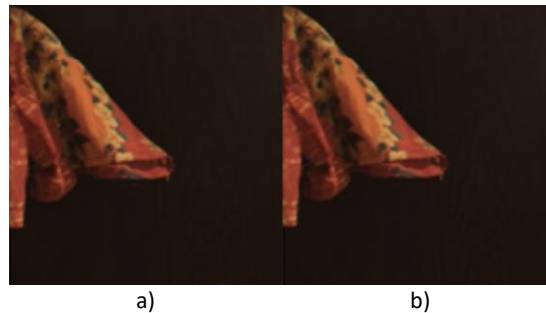
Vamos a ejemplificar estos operadores con las fotos proporcionadas por [3]. Los parámetros utilizados son:  $\lambda = 100$ ,  $\alpha = 0,72$ ,  $\epsilon = 0,05$ ,  $\phi = 8$ ,  $\text{saturation} = 0.6$  y  $\alpha = \frac{1}{2\sqrt{2}}$ .



**Figura 8.** a) Operador global. b) Operador local. Fotos finales obtenidas tras usar ambos operadores tonales en las imágenes proporcionadas por [3]. Se puede observar que las fotos producidas por el operador local tienen un mayor detalle en las zonas muy iluminadas.



**Figura 9.** Zooms en zonas muy iluminadas de las fotos proporcionadas en la Figura 7, a) y c) con el operador global b) y d) con el operador local. Se puede ver claramente como el patrón de la lámpara y el texto del folio son solo visibles en las fotos que nos devuelve el operador local.



**Figura 10.** a) Operador global. b) Operador local. Zoom de una zona menos iluminada de la Figura 8. Vemos como el patrón de la tela es prácticamente el mismo en ambos casos.

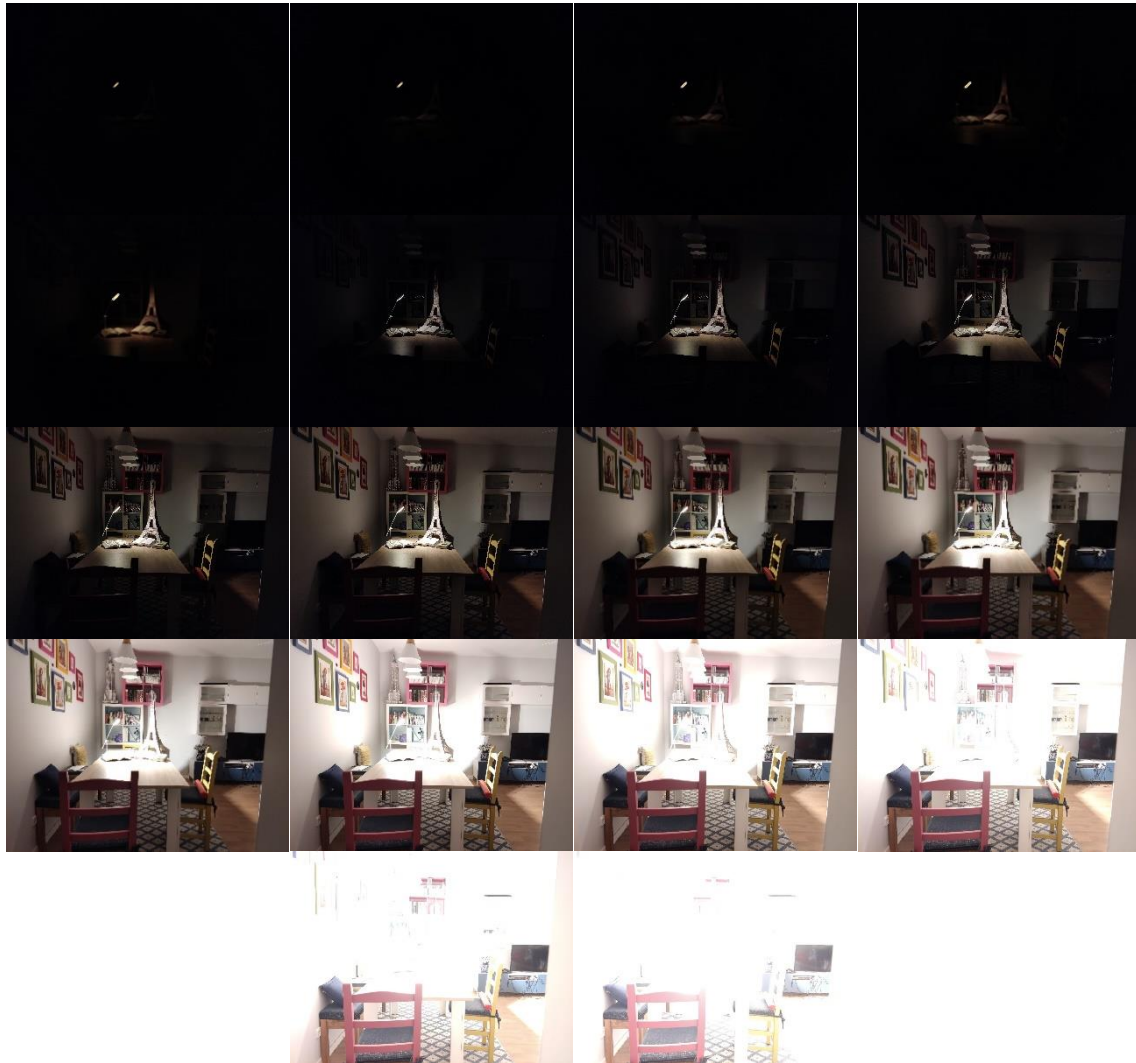
## 4. Resultados.

En este apartado vamos a proceder a realizar nuestras propias fotografías y someterlas al proceso de HDR y de mapeo tonal descritos en este trabajo. Para ello, utilizaremos el código de Matlab proporcionado por [3]. La cámara utilizada durante todo este apartado será la de mi móvil y tendrá las siguientes especificaciones:

- **Modelo de móvil:** POCO X3 Pro
- **Fabricante:** Xiaomi
- **Modelo de cámara:** M2102J20SG
- **Punto F:** f/1.8
- **Velocidad ISO:** ISO-100
- **Compensación de exposición:** 0 paso
- **Distancia focal:** 5 mm
- **Apertura máxima:** 1.67

Las imágenes tienen un tamaño de 4000x3000 píxeles y una resolución de 72 ppp.

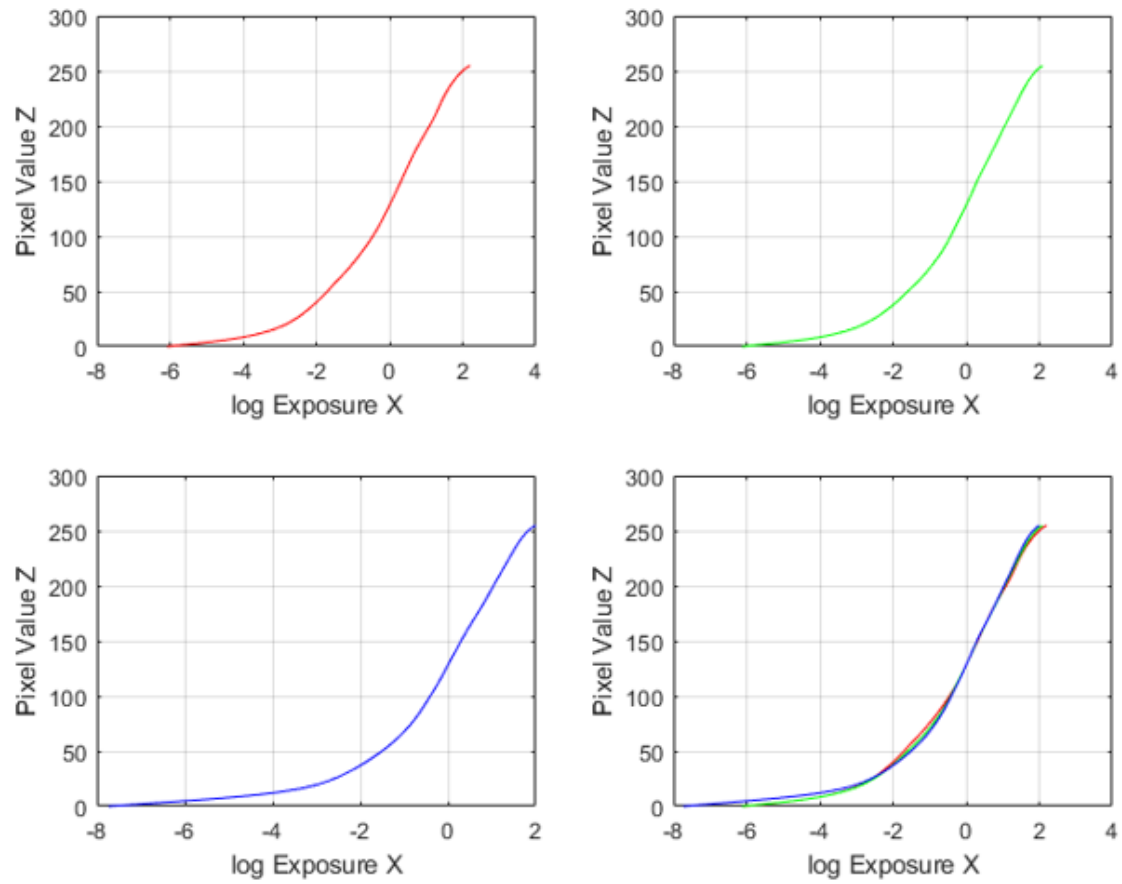




**Figura 11.** Fotografías tomadas con tiempos de exposición en segundos:  $1/4000$ ,  $1/2000$ ,  $1/1000$ ,  $1/500$ ,  $1/250$ ,  $1/125$ ,  $1/60$ ,  $1/30$ ,  $1/15$ ,  $1/8$ ,  $1/4$ ,  $1/2$ ,  $1$ ,  $2$ ,  $4$ ,  $8$ ,  $15$  y  $30$ .

En primer lugar, obtenemos la curva de respuesta de la cámara, tal y como se muestra en la Figura 12. La curva de respuesta obtenida es muy similar a las obtenidas por [3] y [1].





**Figura 12.** Curva de respuesta por colores de la cámara empleada para tomar las fotos de la Figura 11. Para estas curvas se ha utilizado un factor de suavizado  $\lambda = 100$ .

Ahora aplicaremos el proceso de mapeo tonal, empleando los operadores global y local de Reinhard para obtener dos imágenes HDR. Los parámetros utilizados en este caso son:  $\lambda = 100$ ,  $a = 0,72$ ,  $\epsilon = 0,05$ ,  $\phi = 8$ ,  $\text{saturation} = 0.6$ ,  $\alpha = \frac{1}{2\sqrt{2}}$ .

Reinhard global operator



a)

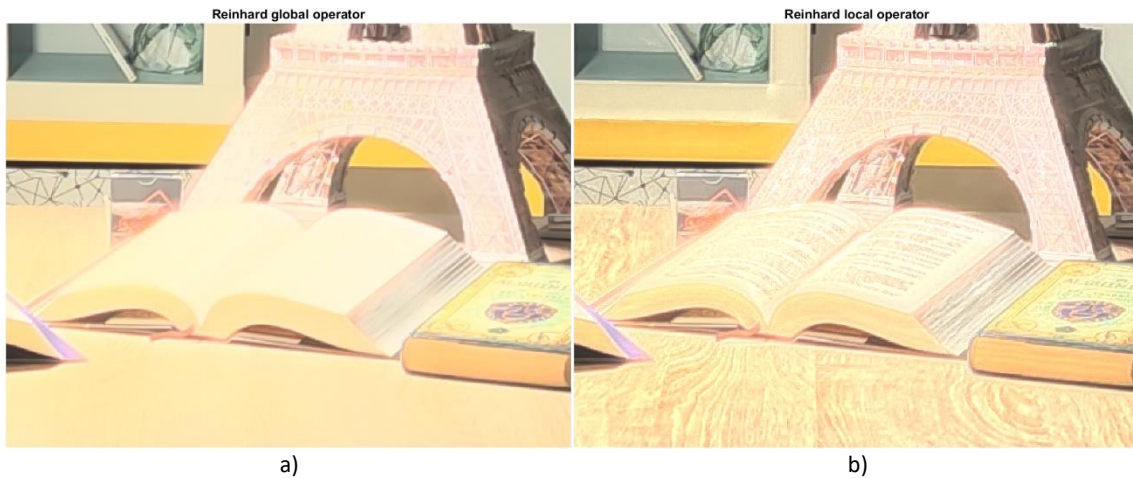
Reinhard local operator



b)

**Figura 13.** Imágenes HDR obtenidas como resultado final, a) con el operador global y b) con el local.

Para poder observar algunas diferencias vamos a ver algunas zonas ampliadas:



**Figura 14.** Zoom de una de las zonas más iluminadas de las imágenes en la Figura 13, a) con el operador global y b) con el local.

En la Figura 14 se puede apreciar las diferencias entre ambos operadores. Al ser una zona altamente iluminada por un foco, tanto el texto del libro abierto, como el patrón de la madera de la mesa, son solo apreciables en la imagen producida por el operador local.



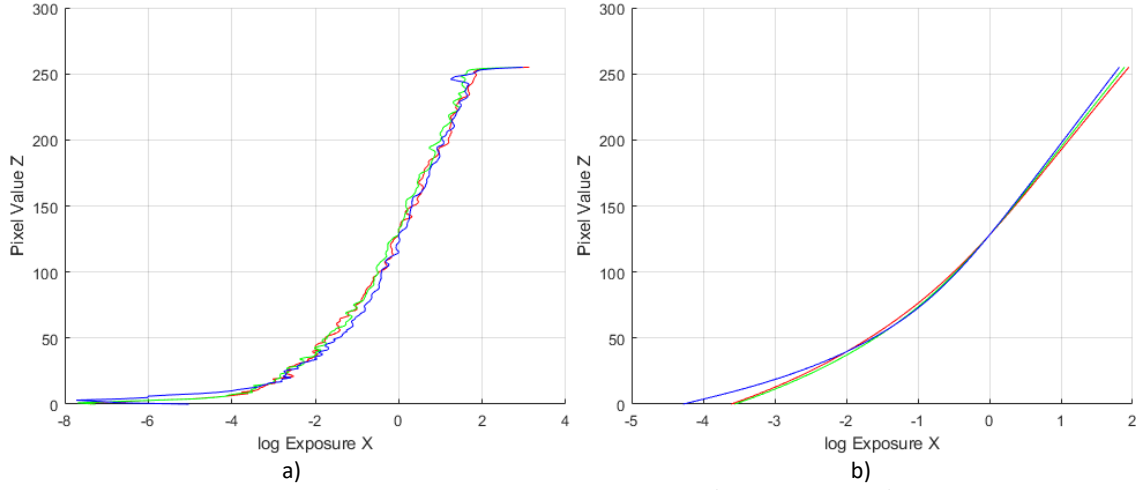
**Figura 15.** Zoom de una zona más oscura de las imágenes en la Figura 13, a) con el operador global y b) con el local.

En la Figura 15, que muestra una zona más oscura de las imágenes de la Figura 13, se puede apreciar en las imágenes creadas por ambos operadores el texto negro sobre fondo blanco. Esto era lo que esperábamos, ya que la funcionalidad del operador local es precisamente la de mostrar más detalle en imágenes con un muy alto rango dinámico, por lo que hemos conseguido replicar con éxito los resultados obtenidos por [2].

Vamos ahora a mostrar los ajustes que nos permite hacer este método mediante el cambio de los distintos parámetros mencionados con anterioridad.

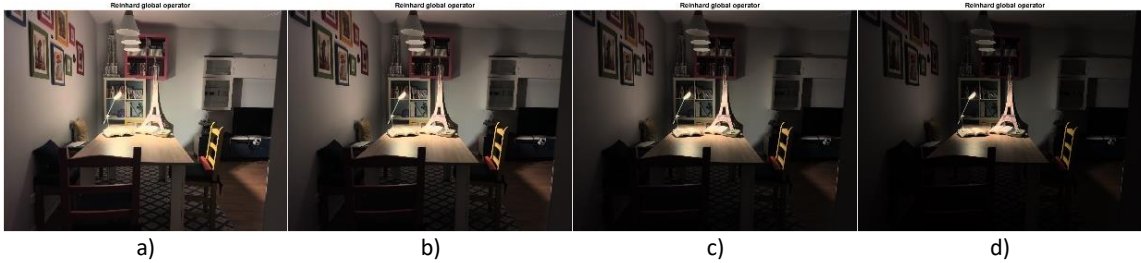
En primer lugar, el parámetro  $\lambda$ , que aparece en la ecuación (5) y que sirve para suavizar la curva de respuesta de la cámara. En mi experiencia, conviene dejarlo en un

valor entre 50 y 200, de modo que la curva de respuesta quede lo bastante suavizada pero no se acerque demasiado a una recta. Sin embargo, a la hora de hablar de la imagen final producida, no es un parámetro que produzca mucho cambio en ella al variarlo sino es llevándolo a niveles que no respeten la forma deseada de la curva de respuesta.



**Figura 16.** Curvas de respuesta de las imágenes en la Figura 11, en a) con  $\lambda = 1$  y en b) con  $\lambda = 1000$  que representan dos extremos para los valores de este parámetro.

El parámetro  $\alpha$ , que aparece en las ecuaciones (8) y (13) para los operadores global y local respectivamente, representa la clave de la imagen y sirve para modificar la iluminación final de ésta. En [2] se nos recomienda usar como valor por defecto de  $\alpha$  0,18, sin embargo, para producir imágenes más iluminadas se puede subir a 0.36 ó 0.72, mientras que para obtener imágenes más oscuras se puede bajar a 0,09 ó 0,045.



**Figura 17.** Imágenes con distintos valores de  $\alpha$ : a) 0.36, b) 0.18, c) 0.09 y d) 0.045.

El parámetro  $\phi$ , que aparece en la ecuación (13), nos permite controlar la nitidez de la imagen. Aumentar este valor nos puede permitir ver ciertas zonas de la imagen con mayor detalle, sin embargo, produce auras negras entorno a los saltos de luminancia.



**Figura 18.** Las imágenes a) y b) tienen un valor de  $\phi = 10$  mientras c) y d) tienen un  $\phi = 20$ .



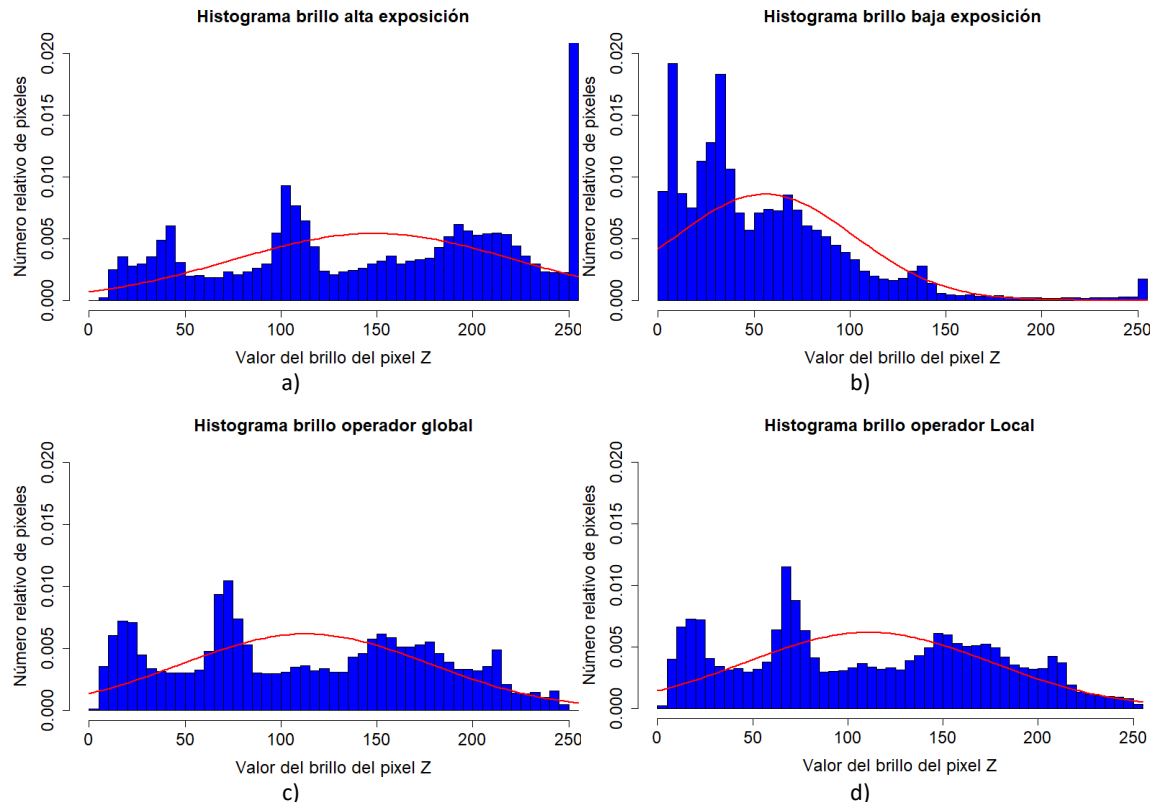
El parámetro “saturation”, que no aparece como tal en las ecuaciones utilizadas en este trabajo, sino que se implementa en el código de Matlab proporcionado por [3], sirve para cambiar la saturación de la imagen, como su propio nombre indica.



**Figura 19.** Imágenes con saturación a) 0.2, b) 0.5 y c) 0.8.

Por último, faltarían los parámetros  $\alpha$  y  $\epsilon$ , pertenecientes a las ecuaciones (11) y (14), pero estos no producen resultados tan interesantes al variarlos, sino que su variación más bien induce a que aparezcan artefactos fotográficos en la imagen.

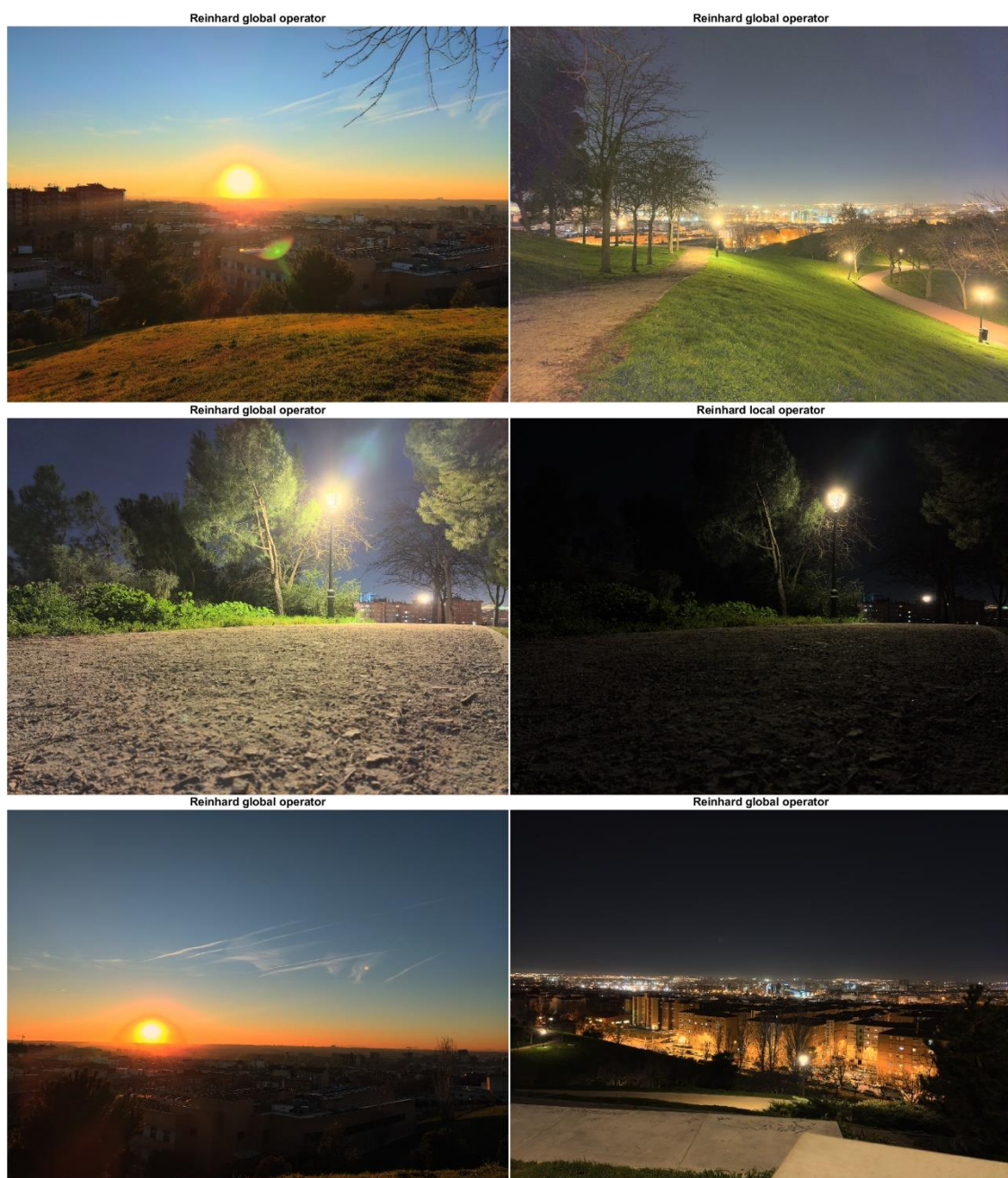
Decidir que valores asignar a estos parámetros es algo puramente subjetivo, ya que así lo es juzgar que una foto sea “mejor” que otra. Para aportar una visión objetiva y cuantitativa del proceso que hemos realizado, vamos a construir un histograma con el valor del brillo de cada pixel en distintas fotografías:



**Figura 20.** Histogramas del valor de los pixeles para imágenes de la Figura 11 con tiempo de exposición en a) de 2 segundos, 1/4 en b) y para las imágenes de la Figura 12 en c) y d). La línea roja representa una distribución normal con media y desviación típica las de los propios conjuntos de valores de los pixeles. El análisis estadístico de estos datos se ha realizado en R.

En el histograma de la Figura 20 a) encontramos una predominancia del valor 255, lo que indica que se están empezando ya a saturar una gran cantidad de píxeles debido al tiempo de exposición. En el histograma de la Figura 20 b), sin embargo, al ser un tiempo de exposición menor, la mayoría de los píxeles tienen un brillo bajo, obteniendo un bajo rango dinámico de la imagen. En las Figuras 20 c) y d), que representan a las imágenes obtenidas por los operadores global y local, obtenemos tal y como esperábamos una distribución bastante homogénea del brillo de los píxeles, lo cual se puede asociar a una imagen de alto rango dinámico.

Para finalizar el apartado de resultados, vamos a añadir unas imágenes obtenidas empleando estos operadores en fotografías propias para escenas de distintos tipos de iluminación:



**Figura 21.** Batería de imágenes obtenidas con los operadores global y local.

Todas las fotografías realizadas por mí que han sido utilizadas en este trabajo se pueden consultar en la referencia [10] si se desea una mejor visualización.

## 5. Conclusiones

Como hemos visto en el apartado anterior, hemos conseguido, en primer lugar, replicar con éxito los resultados obtenidos tanto por [1] como por [2] gracias a la ayuda del código de Matlab proporcionado por [3]. En segundo lugar, hemos visto que estas técnicas de HDR y mapeo tonal son un método sencillo y eficiente de obtener imágenes de alto rango dinámico que permitan observar detalles en imágenes con grados muy diferentes de iluminación. En tercer lugar, hemos hecho un análisis cualitativo sobre la influencia que tiene en las imágenes finales la variación de los distintos parámetros que usa nuestro código. En cuarto y último lugar, hemos establecido un método cuantitativo para medir el rango dinámico que posee una imagen y hemos comprobado que nuestros operadores, tanto el global como el local, sirven para mejorar dicho rango dinámico.

Por último, cabe decir también que estos métodos de HDR y mapeo tonal me han parecido una vía muy cómoda para introducirse en el mundo de la fotografía computacional. Recalcar también que una de las ventajas de trabajar con estos métodos es que al estar trabajando directamente con el código de MatLab, proporcionado por [3], podríamos plantearnos implementar mejoras en un futuro, mientras que, si trabajáramos con un programa de edición de imagen, como por ejemplo Adobe Photoshop, estaríamos restringidos por las opciones que tuviera el programa.

## Anexo

En este anexo se incluye un vocabulario con términos relacionados con el arte de la fotografía, la fotografía computacional, la fotometría y la radiometría con los que el lector podría no estar familiarizado:

**Artefactos:** En fotografía hace referencia a cualquier distorsión no aleatoria de la imagen, como por ejemplo distorsión geométrica, aberración cromática, viñeteo, etc.

**Blooming:** Es un efecto que se suele utilizar en el proceso de renderizado para simular un artefacto que sufren las cámaras reales. Consiste en permitir que el brillo de las zonas muy brillantes se esparza un poco más allá de sus bordes.

**Clave de la escena:** Valor que sirve para indicar de manera subjetiva si una escena es oscura o muy iluminada.

**Curva de respuesta de la cámara:** es la función que relaciona la información de la luz que entra en el objetivo de la cámara con la información que refleja la fotografía.

**Dodging and burning:** Es una técnica que se realiza durante el revelado de una fotografía para aumentar de manera artificial su tiempo de exposición en distintas zonas locales de la misma.

**Exposición:** Cantidad de luz por unidad de área que recibe el sensor de la cámara.

**Flujo luminoso:** Es la medida de la potencia luminosa percibida ajustada para reflejar la sensibilidad del ojo humano a diferentes longitudes de onda.

**Fotometría:** Es la ciencia que se encarga de estudiar la luz en términos del brillo percibido por el ojo humano.

**HDR:** Siglas de High Dynamic Range, se utiliza tanto para referirse al alto rango dinámico que puede tener una fotografía como a la técnica que se utiliza para conseguirlas.

**Iluminancia:** Es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área

**Irradiancia:** Término empleado en radiometría que se utiliza para describir la potencia incidente por unidad de superficie.

**Luminancia:** Medida utilizada en fotometría que sirve para medir la cantidad de luz que es emitida por un área determinada y percibida por un ángulo sólido.

**Mapeo tonal:** Técnica que consiste en representar una imagen de alto rango dinámico en un papel o pantalla que solo es capaz de mostrar un bajo rango dinámico.

**Nitidez:** Medida utilizada en fotografía para indicar la cantidad de detalles bien definidos que se pueden apreciar en una foto.

**Radiancia:** Es una medida utilizada en radiometría para la cantidad de energía radiante emitida, reflejada o transmitida por una superficie en una dirección específica.

**Radiometría:** Es la ciencia que estudia la medición de la radiación electromagnética.

**Rango lumínico/dinámico:** Es la diferencia entre el nivel más brillante y el más oscuro que un sistema de visualización puede percibir o reproducir.

**Saturación:** Hace referencia a la intensidad de los colores de una imagen.

**Tiempo de exposición:** Tiempo durante el cual el objetivo de la cámara capta fotones.



## Bibliografía:

- [1] DEBEVEC, P. E., AND MALIK, J. 1997. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings* (pp. 369–378).
- [2] Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P., & Ferwerda, J. (2002, July). Photographic tone reproduction for digital images. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 267-276).
- [3] <http://cybertron.cg.tu-berlin.de/eitz/hdr/#downloads>
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-exposure\\_HDR\\_capture#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-exposure_HDR_capture#History)
- [5] <http://www.vam.ac.uk/content/articles/s/gustave-le-grey-exhibition>
- [6] <https://www.artnet.com/artists/w-eugene-smith/schweitzer-with-lamp-at-his-desk-gH0CRvqJPzfaRFPqYgLM4Q2>
- [7] <http://www.easyhdr.com/documentation/hdr-astrophotography/>
- [8] [https://pro.sony/en\\_DK/healthcare/imaging-innovations-insights/hdr-benefits-surgical-imaging](https://pro.sony/en_DK/healthcare/imaging-innovations-insights/hdr-benefits-surgical-imaging)
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Dodging\\_and\\_burning](https://en.wikipedia.org/wiki/Dodging_and_burning)
- [10] <https://github.com/Rafael-Garcia-Fis/TFG-HDR>