

# **Recomendación UIT-R BT.2163-0**

**(11/2023)**

Serie BT: Servicio de radiodifusión (televisión)

**Algoritmo de medición objetiva para  
evaluar el brillo de la televisión de alta  
gama dinámica**



## Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

## Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

### Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <https://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
<b>BO</b>	Distribución por satélite
<b>BR</b>	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
<b>BS</b>	Servicio de radiodifusión (sonora)
<b>BT</b>	<b>Servicio de radiodifusión (televisión)</b>
<b>F</b>	Servicio fijo
<b>M</b>	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
<b>P</b>	Propagación de las ondas radioeléctricas
<b>RA</b>	Radioastronomía
<b>RS</b>	Sistemas de detección a distancia
<b>S</b>	Servicio fijo por satélite
<b>SA</b>	Aplicaciones espaciales y meteorología
<b>SF</b>	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
<b>SM</b>	Gestión del espectro
<b>SNG</b>	Periodismo electrónico por satélite
<b>TF</b>	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
<b>V</b>	Vocabulario y cuestiones afines

*Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.*

Publicación electrónica  
Ginebra, 2024

© UIT 2024

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

## RECOMENDACIÓN UIT-R BT.2163-0

**Algoritmo de medición objetiva para evaluar el brillo de la televisión de alta gama dinámica<sup>1,2</sup>**

(Cuestión UIT-R 142-3/6)

(2023)

**Cometido**

En esta Recomendación se especifica un algoritmo de medición para determinar el nivel de imagen, basado en la luminancia media, que puede ser útil para evaluar el brillo de imágenes individuales. Otras métricas basadas en el nivel de imagen son el nivel de imagen temporal y la respuesta al nivel de imagen, que pueden ser útiles para modelar la respuesta del sistema visual humano a una secuencia de imágenes.

**Palabras clave**

Medición de vídeo, brillo, producción televisiva, alta gama dinámica, HDR, televisión, TV-HDR, intercambio internacional de programas

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que la televisión de alta gama dinámica (TV-HDR) proporciona un rango dinámico de niveles de luminancia de la imagen extremadamente amplio;
- b) que los grandes cambios de brillo pueden resultar inesperados por los telespectadores;
- c) que se puede comprender mejor la experiencia de los telespectadores si se realiza un seguimiento del brillo de la imagen;
- d) que el estado de adaptación del sistema visual humano está condicionado por la secuencia temporal de imágenes;
- e) que la Recomendación UIT-R BT.2100 especifica dos formas de TV-HDR, a saber, la cuantificación perceptiva (PQ) y la transferencia híbrida Log-Gamma (HLG), y que se espera producción en ambos formatos;
- f) que se suele utilizar una luminancia de cresta nominal de 1 000 cd/m<sup>2</sup> para las pantallas de referencia HLG;
- g) que las condiciones del entorno circundante de referencia figuran en el Cuadro 3 de la Recomendación UIT-R BT.2100;
- h) que los métodos de medición de vídeo existentes que se emplean para la producción no proporcionan un valor numérico representativo del brillo de imagen subjetivo;

---

<sup>1</sup> Esta Recomendación no reemplaza las directrices facilitadas en la Recomendación UIT-R BT.1702 para la protección de los sectores vulnerables de la población de telespectadores que padecen epilepsia fotosensible y que, por tanto, son propensos a sufrir convulsiones desencadenadas por la presencia de luces intermitentes, incluidos algunos tipos de imágenes de televisión parpadeantes.

<sup>2</sup> Probablemente será necesario revisar los algoritmos tras probarlos en una variedad más amplia de imágenes en movimiento y una vez testeados en combinación con una especificación de medición que se está elaborando actualmente.

i) que los métodos de medición normalizados resultan útiles para facilitar la evaluación del brillo de vídeo subjetivo de los programas,

*reconociendo*

que la utilización de algoritmos de este tipo complementará, no reemplazará, la comprobación convencional de la forma de onda,

*recomienda*

1 que se utilice el algoritmo de nivel de imagen especificado en la Sección 1 cuando se requiera una medida del brillo subjetivo de una imagen de alta gama dinámica, producida de conformidad con la Recomendación UIT-R BT.2100, para facilitar la producción y el intercambio de programas;

2 que se utilice el algoritmo de medición del nivel de imagen temporal, especificado en el § 2, para valorar la contribución de una secuencia de imágenes a la adaptación de los telespectadores;

3 que se utilice la aproximación a la respuesta del ojo, esto es, la respuesta al nivel de imagen, especificada en el § 3 para valorar la importancia de los cambios de brillo dentro de un programa,

*recomienda además*

1 que no se utilice esta Recomendación como instrumento para la regulación del brillo y que no se apliquen restricciones al operador ni se limite la creación de contenido;

2 que, habida cuenta de la escasa verificación de los algoritmos con imágenes en movimiento, el UIT-R considere en breve la posibilidad, si lo determina conveniente, de actualizar y mejorar esta Recomendación.

## 1 Algoritmo de medición del nivel de imagen

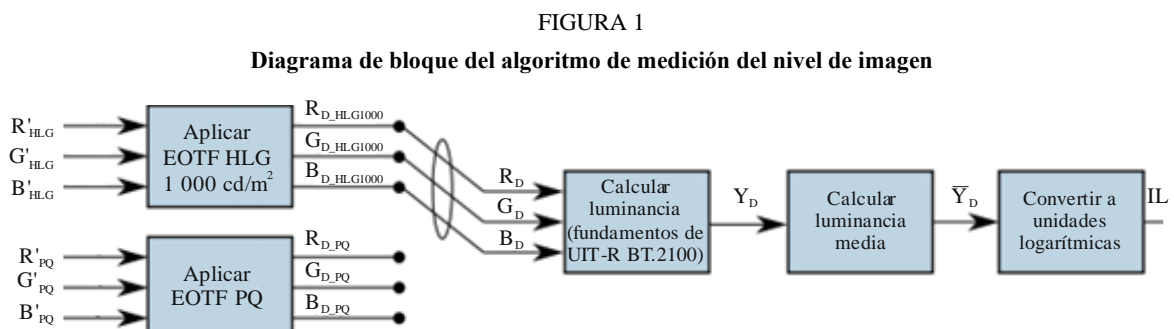
En esta sección se presenta el algoritmo de medición del nivel de imagen (IL), que puede resultar útil para valorar el brillo general de la imagen. El algoritmo de IL constituye la base de las demás métricas indicadas en los § 2 y 3 de la presente Recomendación.

La entrada del algoritmo de medición del IL es una señal PQ o HLG no lineal conforme a la Recomendación UIT-R BT.2100, denominada  $R'G'B'$ , del rango [0:1].

El algoritmo consta de cuatro etapas:

- 1) conversión a luz lineal de pantalla;
- 2) cálculo del componente de luminancia;
- 3) cálculo de la luminancia media de pantalla;
- 4) conversión a unidades logarítmicas.

En la Fig. 1 se muestra un diagrama de bloque del algoritmo.



### 1.1 Conversión a luz lineal de pantalla

En el caso de las señales HLG  $R'G'B'_{\text{HLG}}$ , se aplica la EOTF HLG especificada en el Cuadro 5 de la Recomendación UIT-R BT.2100, utilizando un valor de 1,2 para  $\gamma$ , según se indica en la Nota 5f al Cuadro 5 de la Recomendación UIT-R BT.2100 para las pantallas con luminancia de cresta nominal de 1 000 cd/m<sup>2</sup>. La señal resultante es la luz lineal de pantalla  $R_D G_D B_D_{\text{HLG}}$  en el rango [0:1 000] cd/m<sup>2</sup>.

Para las señales PQ  $R'G'B'_{\text{PQ}}$ , se aplica la EOTF PQ especificada en el Cuadro 4 de la Recomendación UIT-R BT.2100. La señal resultante es la luz lineal de pantalla  $R_D G_D B_D_{\text{PQ}}$  en el rango [0:10 000] cd/m<sup>2</sup>.

En adelante, se hará referencia a la señal de luz lineal de pantalla como  $R_D G_D B_D$ , independientemente de que el origen de la señal fuera HLG o PQ.

### 1.2 Cálculo del componente de luminancia

La señal de luminancia lineal en pantalla  $Y_D$  se calcula con la ecuación siguiente:

$$Y_D = 0,2627R_D + 0,6780G_D + 0,0593B_D$$

En el Anexo 1 se describe un método aproximativo.

### 1.3 Cálculo de la luminancia media de pantalla

A continuación, se calcula la luminancia media de pantalla  $\bar{Y}_D$  de la trama de vídeo, en unidades de cd/m<sup>2</sup>.

$$\bar{Y}_D = \frac{1}{H \times V} \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{v=0}^{V-1} Y_D(h, v)$$

siendo:

$Y_D(h, v)$ : valor de luminancia lineal en pantalla del píxel en posición horizontal  $h$ , posición vertical  $v$

$H$ : número de píxeles horizontales

$V$ : número de píxeles verticales.

### 1.4 Conversión a unidades logarítmicas

La luminancia media de pantalla en cd/m<sup>2</sup> se convierte a unidades logarítmicas de base 2, con un valor de normalización de 1 cd/m<sup>2</sup>.

NOTA – Una luminancia media de pantalla de 1 cd/m<sup>2</sup> produce un valor de IL de cero.

$$IL = \log_2 \frac{\bar{Y}_D}{1}$$

En el Anexo 2 se proporciona una investigación de fondo de este algoritmo.

## 2 Algoritmo de nivel de imagen temporal

La visualización de una secuencia de imágenes influye en el estado de adaptación de un observador humano y, por tanto, en el impacto percibido del IL. El nivel de imagen temporal (TIL)<sup>3</sup> puede resultar útil para calcular el brillo de la imagen a lo largo del tiempo. El TIL se determina como sigue:

$$TIL(t) = \begin{cases} IL(t) & \text{si } t = 0 \\ TIL(t-1) \left(1 - \frac{1}{\tau+1}\right) + IL(t) \left(\frac{1}{\tau+1}\right) & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

donde  $t$  es el número de trama comenzando por el 0 y  $\tau$  es el tiempo típico de deterioro, una constante definida como:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0 \\ IL(t) - TIL(t-1) & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

$$\tau = \begin{cases} 22 \frac{f}{24} & \text{si } p(t) \geq 0 \\ 800 \frac{f}{24} & \text{si } p(t) < 0 \end{cases}$$

siendo:

$f$ : velocidad de trama (en Hz) del vídeo.

En el Anexo 3 se muestra cómo derivar la forma funcional de TIL, y en el Anexo 4 se describen las opciones del valor de tiempo de deterioro.

## 3 Algoritmo de respuesta al nivel de imagen

La respuesta al nivel de imagen (ILR) permite modelar la respuesta del sistema visual humano a la luminancia de una imagen. Puede resultar de utilidad para calcular el nivel de molestia instantánea del telespectador provocada por los cambios en el IL, por ejemplo, en un cambio de escena. No permite simular la disminución de la molestia subjetiva tras un cambio de brillo. Sin embargo, puede aportar datos valiosos para los dispositivos de medición para, llegado el caso y en combinación con otras medidas especificadas, generar un modelo de esa reducción. Depende tanto de la luminancia de la imagen como del nivel de adaptación del ojo. En un entorno de referencia conforme a la Recomendación UIT-R BT.2100, se puede obtener una respuesta aproximada utilizando las cantidades de IL y TIL de la forma siguiente:

$$ILR = \frac{(2^{IL})^{n_c}}{(2^{IL})^{n_c} + (2^{TIL})^{n_c}}$$

siendo:

$ILR$ : respuesta aproximada del sistema visual humano

$n_c$ : constante igual a 0,57.

---

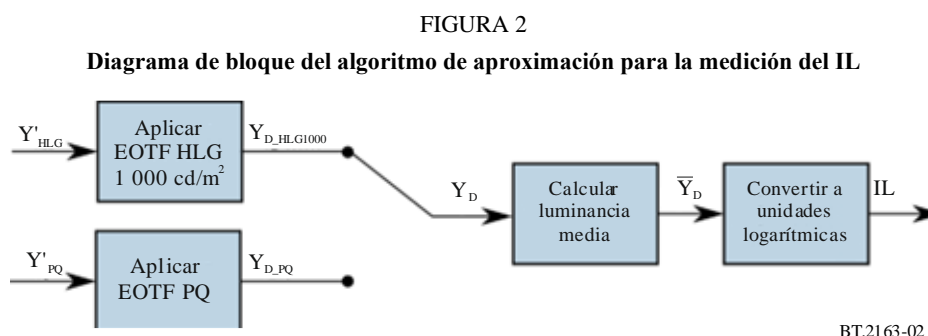
<sup>3</sup> El algoritmo de TIL solo se ha podido verificar en unas condiciones determinadas con contenido de imagen mayoritariamente estático, tal como se describen en el Anexo 4. Posiblemente se tendrá que revisar el algoritmo de TIL tras probarlo en una variedad más amplia de imágenes en movimiento.

## Anexo 1 (informativo)

### Aproximación del cálculo de la luminancia de pantalla en configuraciones de *hardware* simplificadas

En este Anexo se describe un método aproximativo para calcular el componente de luminancia de la pantalla,  $Y_D$ , que simplifica la aplicación del algoritmo de IL descrito en el § 1. Si los recursos de *hardware* son limitados, se podrá aplicar este método en dispositivos utilizados únicamente como ayuda visual. Al utilizar esta aproximación, los colores saturados pueden traducirse en valores de medición más bajos. Los dispositivos que emplean este método no serán adecuados para el análisis numérico de los valores de IL, por lo que no sería necesario registrar los valores de IL.

En la Fig. 2 se presenta un diagrama de bloque del algoritmo de aproximación. Su entrada es una señal luma HLG o PQ no lineal,  $Y'$ , del rango [0:1]. Si la señal es *ICTCP*, se puede utilizar la señal  $I$  en lugar de  $Y'$  en el diagrama que sigue.



#### Conversión a luz lineal de pantalla aproximada<sup>4</sup>

En el caso de las señales HLG  $Y'_{HLG}$ , la EOTF HLG especificada en el Cuadro 5 de la Recomendación UIT-R BT.2100 se aplica directamente en  $Y'_{HLG}$ , utilizando un valor de 1,2 para  $\gamma$  como se especifica en la Nota 5f al Cuadro 5 de dicha Recomendación para las pantallas con luminancia de cresta nominal de 1 000  $\text{cd/m}^2$ . La señal resultante aproxima la luz lineal de pantalla  $Y_{D,HLG}$  en el rango [0:1 000]  $\text{cd/m}^2$ .

Para las señales PQ  $Y'_{PQ}$ , la EOTF PQ especificada en el Cuadro 4 de la Recomendación UIT-R BT.2100 se aplica directamente en  $Y'_{PQ}$ . La señal resultante aproxima la luz lineal de pantalla  $Y_{D,PQ}$  en el rango [0:10 000]  $\text{cd/m}^2$ .

La señal de luz lineal de pantalla aproximada se denomina  $Y_D$ , independientemente de que el origen de la señal sea HLG o PQ.

A continuación, el valor aproximado de  $Y_D$  se utiliza en los demás cálculos, descritos en los § 1.2 y 1.3.

<sup>4</sup> Cabe destacar que, para calcular la luminancia de pantalla con precisión, las EOTF de la Recomendación UIT-R BT.2100 se aplican en los componentes de señal  $R'G'B'$ , no en el componente luma, como se describe en el presente documento.

## **Anexo 2 (informativo)**

### **Métricas objetivas para la medición del brillo en la televisión de alta gama dinámica**

En este Anexo se presenta la investigación de fondo en la que se ha basado la elaboración del algoritmo del nivel de imagen que se describe en el § 1. Tras una breve exposición de los trabajos conexos, se detalla la prueba subjetiva utilizada para establecer los valores que se utilizarán como datos de brillo en un conjunto de imágenes de prueba. A continuación, se utilizan estos valores para probar un conjunto de métricas objetivas que podrían servir para medir el brillo de la imagen.

#### **Trabajos conexos**

Se ha realizado una gran cantidad de trabajo en el ámbito de la percepción y adaptación del brillo, como se describe en el Libro Blanco de la BBC 341 [1].

#### **Experimento para determinar los valores de brillo de las imágenes de prueba**

El término *brillo* hace referencia a «la medida en que una zona parece mostrar luz» ([2], pág. 69). No es lo mismo que *luminosidad*, que se refiere a la reflectancia aparente de un objeto, independientemente de la manera en que está iluminado ([2], pág. 70). El brillo es una cantidad subjetiva que no se puede medir directamente, por lo que se ha elaborado una metodología de prueba subjetiva para crear un conjunto de mediciones del brillo de referencia real. El objetivo es crear una medida de brillo objetiva que coincida con los resultados subjetivos en la medida de lo posible y que se base en los valores de luminancia en pantalla.

Se pidió a los participantes en la prueba que ajustaran el brillo de una pizarra gris hasta que coincidiera con el brillo general percibido de una imagen de prueba. La luminancia de la pizarra gris es un dato conocido que se puede utilizar como valor numérico representativo del brillo de la imagen. Los participantes pudieron alternar libremente entre la imagen de prueba y la pizarra gris durante todo el tiempo que consideraron necesario.

La imagen de prueba y la pizarra gris se proyectaron en una pantalla SIM2 HDR47E con el modo LogLUV calibrado. Los niveles de la pizarra oscilaron entre 0 y 4 000 cd/m<sup>2</sup>, con 400 escalones sujetos a una función exponencial que se traducía en un tamaño de escalón de  $3,9 \times 10^{-10}$  cd/m<sup>2</sup> en el negro y 50 cd/m<sup>2</sup> en el extremo superior. Como todas las pantallas LCD, cuando se visualiza una pantalla completa en un solo color, la SIM2 no puede mostrar con precisión el brillo de entrada, sobre todo cuando los niveles de luminancia son elevados. Antes de presentar los resultados, se registró la luminancia real de la pantalla para los niveles de pizarra de entrada a intervalos de 10 cd/m<sup>2</sup> y se asociaron los valores de pizarra gris previstos con los valores medidos (interpolados en caso necesario). Se iluminó la pared situada detrás de la pantalla con dos luces LED ajustables de tal manera que la luz reflejada de la pared medía el blanco D65 a 5 cd/m<sup>2</sup>. Las luces se ubicaron detrás de la pantalla, dirigidas hacia la pared, para evitar en la medida de lo posible que la luz cayera directamente en la pantalla. No había más fuentes de luz en la habitación. La disposición de la prueba se muestra en la Fig. 3.



FIGURA 3  
Disposición de la sala de prueba



BT.2163-03

FIGURA 4  
Imágenes utilizadas para las pruebas



BT.21 63-04

*Nota a la Fig. 4:* Las imágenes 1 a 12<sup>5</sup> se han tomado de [3]; la imagen 13 procede de [4]<sup>6</sup>; y las imágenes 14 y 15 fueron creadas por I+D de la BBC.

La entrada LogLUV a la pantalla SIM2 no cuenta con control de brillo, por lo que no se puede utilizar una señal PLUGE normal para calibrar el nivel de negro. Por tanto, a la hora de definir la compensación necesaria, se utilizó un conjunto de señales de prueba generadas específicamente para tal fin, entre las que figuraban el subnegro y el supernegro como parte de una gama de niveles de negro, y la compensación del nivel de negro se añadió a las imágenes de prueba antes de mostrarlas. Se determinó una compensación del nivel de negro de 0,005 cd/m<sup>2</sup>, por debajo del valor esperado si las luces se hubieran colocado delante de la pantalla, no detrás de ella.

En este estudio se utilizaron las 15 imágenes que se muestran en la Fig. 4. Las 12 primeras proceden de la encuesta fotográfica (HDR Photographic Survey) de Mark Fairchild [3], y se completaron con una imagen (número 13) de la Universidad Stuttgart Media [4] y dos imágenes creadas por I+D de la BBC (números 14 y 15). Dado que el rango dinámico de las imágenes sin procesar era superior al previsto para la televisión HDR, se han escalado las imágenes para que resultaran agradables desde el punto de vista estético (según la opinión de unos pocos telespectadores expertos) con un rango dinámico más pequeño. Esto equivale a ajustar el iris de la cámara. El conjunto de imágenes de la prueba estaba formado por imágenes tanto brillantes como oscuras, y varias de ellas tenían zonas de luz y sombra. Las imágenes se convirtieron a los colores primarios de las Recomendaciones UIT-R BT.2100/BT.2020 y se muestran con una resolución de 1 920×1 080 píxeles de acuerdo con la resolución máxima de la pantalla.

Cada imagen se visualiza con cuatro niveles de luminancia de cresta de la pantalla (500, 1 000, 2 000 y 4 000 cd/m<sup>2</sup>) y se utiliza un enfoque de escalado de la luminancia con respecto a la escena. Se aplicó una función gamma adecuada a la luminancia de cresta de la pantalla, de acuerdo con la Nota 5f al Cuadro 5 de la Recomendación UIT-R BT.2100. Se trata simplemente de una manera de aumentar el rango de brillos utilizados en la prueba sin limitar la aplicabilidad de los resultados a sistemas relativos a una escena.

Los participantes en la prueba se sentaron a 1,9 m de distancia de la pantalla, esto es, 3,2 veces la altura de la pantalla. Antes de la prueba, se comprobó que todos presentaban una agudeza visual normal, tras lo cual se les facilitaron las instrucciones por escrito. Se presentaron dos imágenes de preparación y se incluyeron tres imágenes «falsas» al inicio de la prueba. Se descartaron los resultados de las imágenes de preparación y falsas. Las imágenes se mostraron en orden aleatorio diferente para cada participante, y se tuvo cuidado en no presentar la misma imagen (con brillo diferente) dos veces consecutivas. Un total de 20 participantes completaron la prueba.

### **Resultados del experimento para establecer los valores de brillo de las imágenes de la prueba**

En la Fig. 5 se muestran las respuestas individuales de los 20 participantes, para cada imagen en cada luminancia de cresta de la pantalla. Conviene señalar que es posible que no todas las imágenes tengan niveles de brillo subjetivo diferentes, incluso con distintos niveles de luminancia de cresta de pantalla. Por ejemplo, la imagen de prueba 1 (véase la Fig. 4) es principalmente oscura, con unas pocas zonas muy resaltadas. Cuando aumenta la luminancia de la pantalla, la diferencia subjetiva más importante está en el brillo percibido de las zonas resaltadas; por lo tanto, es posible que el brillo general de esta imagen no resulte afectado por un cambio en la luminancia de cresta de la imagen si el nivel de una zona pequeña de resaltes no es relevante para la percepción. Se trata exactamente del tipo de efecto que se debe investigar para elaborar una métrica de brillo eficaz. No obstante, los resultados apuntan a que, en general, las imágenes tienden a parecer más brillantes a medida que aumenta la luminancia

---

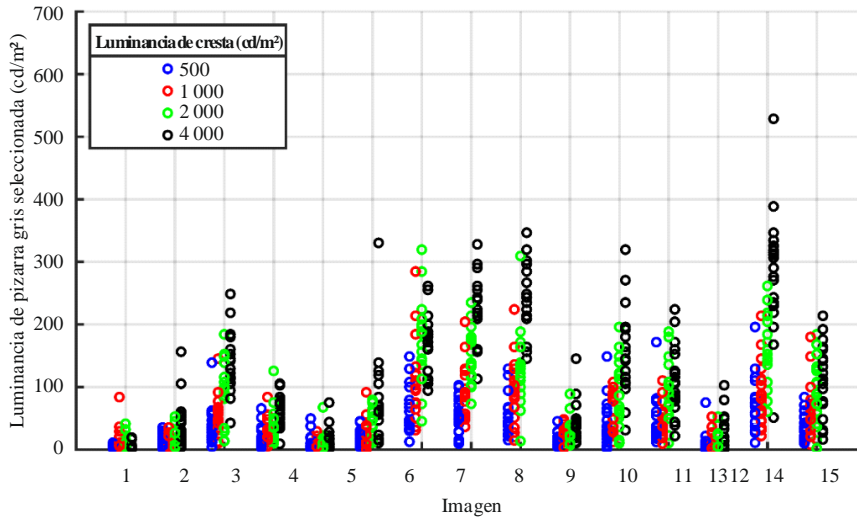
<sup>5</sup> Estas imágenes se reproducen con autorización de Mark Fairchild.

<sup>6</sup> Esta imagen se reproduce con autorización de la Universidad Stuttgart Media.

de cresta de la pantalla y demuestran que el conjunto de imágenes de la prueba contiene una horquilla de imágenes brillantes y oscuras.

FIGURA 5

Niveles de luminancia de pizarra gris seleccionados de forma individualizada para los participantes en la prueba, según la imagen y la luminancia de cresta de la pantalla. Cada círculo se corresponde con la puntuación asignada por un individuo a esa imagen



BT.2163-04

### Métricas objetivas

A efectos del presente estudio, se han desarrollado modelos que relacionan los valores de luminancia de píxel mostrados con los valores de brillo general percibido recopilados en las pruebas subjetivas. En última instancia, para poder ser utilizado con fines de seguimiento de las señales, el modelo tendrá que operar según los valores de señal, en lugar de los niveles de luz en pantalla; sin embargo, en este punto, se mantiene la independencia del modelo respecto del formato de señal a fin de que pueda aplicarse a cualquier imagen HDR.

Las imágenes de la prueba se almacenaron como imágenes Log-Gamma  $Y'C_b'C_r'$  híbridas con submuestreo de colores 4:2:2. Una vez efectuados el muestreo a velocidad superior de los componentes de diferencia de color y su conversión a  $R'G'B'$ , los valores de luminancia en pantalla se calcularon de acuerdo con el Cuadro 5 de la Resolución UIT-R BT.2100. En primer lugar, se elimina la función de transferencia optoelectrónica HLG para detectar las señales de la luz lineal de la escena  $R_S G_S B_S$ ; a continuación, se aplica la función gamma y el escalado de conformidad con la luminancia de cresta de la pantalla a fin de obtener los componentes de color de la pantalla  $R_D G_D B_D$ . Por último, se calculan los valores de luminancia en pantalla a partir de los componentes de color en pantalla por medio de las ecuaciones de color de las Recomendaciones UIT-R BT.2100/BT.2020.

Los modelos siguientes producen un valor numérico para el brillo general a partir de los valores de luminancia de píxel en pantalla de las imágenes de la prueba. La luminancia en pantalla para un píxel concreto se define como  $(Y_D(i, j))$ , donde  $i$  y  $j$  son los índices de píxel con  $i \in 0: M - 1$  y  $j \in 0: N - 1$ . En las imágenes de la prueba,  $M = 1\ 080$  y  $N = 1\ 920$ .

- 1) Luminancia media de pantalla

$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j Y_D(i, j)$ . Como métrica de referencia, calcular la media de todos los valores de luminancia de píxel en pantalla.

- 2) Luminancia media log10 de pantalla  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \log_{10}(Y_D(i, j)).$$
 Según Fechner [5].
- 3) EOTF inversa PQ media de la luminancia de pantalla  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \text{EOTF}^{-1}(Y_D(i, j)),$$
 con la definición de  $\text{EOTF}^{-1}$  que figura en el Cuadro 4 de la Recomendación UIT-R BT.2100.
- 4) Luminancia media de pantalla elevada a una potencia  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j (Y_D(i, j))^p.$$
 Según Stevens [6]. Aquí, se realizan pruebas de los valores desde  $p = 0,2$  hasta  $p = 1$ .
- 5) Luminosidad CIE 1976 media  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j L^*(Y_D(i, j)),$$
 con la definición de  $L^*$  que figura en CIE [7], incluida la sección lineal con niveles de luminancia bajos. Se utilizan los valores de luz en pantalla correspondientes al nivel de señal del 75% como blanco de referencia, ya que este valor se ha definido como el nivel de referencia de los gráficos para HDR Log-Gamma híbrido. Se aplican los niveles 120, 203, 344 y 581 cd/m<sup>2</sup> a los niveles de brillo de la cresta de 500, 1 000, 2 000 y 4 000 cd/m<sup>2</sup> respectivamente.
- 6) Luminancia media de pantalla ponderada  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j Y_D(i, j) \cdot \cos \theta_{ij} / \theta_{ij}^2,$$
 donde  $\theta_{ij}$  es el ángulo subtendido en el ojo entre el píxel  $(i, j)$  y el centro de la pantalla, con un valor mínimo de 0,75°. Esta medida se toma de Moon y Spencer [8]. Tal y como se utiliza aquí, se presupone que el telespectador está fijo en el centro de la pantalla y se aproxima de manera que todos los píxeles subtienden el mismo ángulo en la retina por lo que se omiten las constantes que no influirían en los coeficientes de correlación.
- 7) Media de valores en el centro de la pantalla  

$$\frac{4}{MN} \sum_{i=M/4}^{3M/4} \sum_{j=N/4}^{3N/4} Y_D(i, j).$$
 Una versión simplificada de la ponderación de Moon y Spencer: calcular la luminancia media únicamente de los píxeles situados en el cuadrante central de la pantalla.
- 8) Percentiles  
 El  $n$ ésimo percentil,  $P_n$ , es el nivel de luminancia por debajo del cual se encuentra el  $n\%$  de todos los niveles de luminancia de píxel. Hacen referencia a la distribución de los niveles de luminancia de la pantalla. Se realizan pruebas para los percentiles  $P_{10}$  a  $P_{100}$ .
- 9) Rangos de percentil  
 Calcular el rango intercuartil,  $P_{75} - P_{25}$ , y la diferencia entre el 90° percentil y el 10° percentil,  $P_{90} - P_{10}$ . Describen la distribución de los valores de luminancia en pantalla.
- 10) Media de los valores de un rango específico  
 Calcular la luminancia media de la pantalla únicamente de los valores entre  $P_{25}$  y  $P_{75}$ . También se realizan pruebas del rango  $P_{10}$  a  $P_{90}$ .

Para analizar los modelos, los niveles medios de gris seleccionados para las 60 imágenes de la prueba (15 imágenes con cuatro valores de brillo de la cresta, véase la Fig. 4) se utilizaron como valores de brillo de referencia real. Se informa del coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación del rango de Spearman entre cada modelo y la referencia real.

### Correlación de las métricas objetivas con los resultados subjetivos

En el Cuadro 1 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson y los coeficientes de correlación de rango de Spearman de todas las métricas de brillo estudiadas. Los resultados también se presentan de forma gráfica en las Figs. 6 y 7.

La métrica más sencilla, la luminancia media en pantalla (métrica 1) es una muy buena opción, y su coeficiente de correlación de Pearson es prácticamente de 0,96. Su rendimiento se muestra en la Fig. 8, diagrama de la izquierda. Los diferentes métodos de escalado no lineal de las métricas 2 a 5 solo provocan la desviación de los datos respecto de la línea recta de la métrica 1, como se muestra en el diagrama de la derecha de la Fig. 8 relativa a la métrica 5 con un exponente de 0,33, donde se observa sin lugar a dudas que una línea curva sería una solución más adecuada. La única excepción consiste en elevar los valores de luminancia de píxel a una potencia entre 0,8 y 0,9 antes de calcular el promedio (véase el diagrama de la izquierda de la Fig. 7), lo que conlleva únicamente una mejora muy leve respecto de la métrica 1.

La luminancia media ponderada de la pantalla (métrica 6), que depende del grado de fijación del telespectador, tiene malos resultados, y la media de los valores en el centro de la pantalla (métrica 7) también es mucho menos eficaz que la media de todos los valores. Esto indica que los píxeles próximos al borde de la pantalla representan una parte significativa del brillo general.

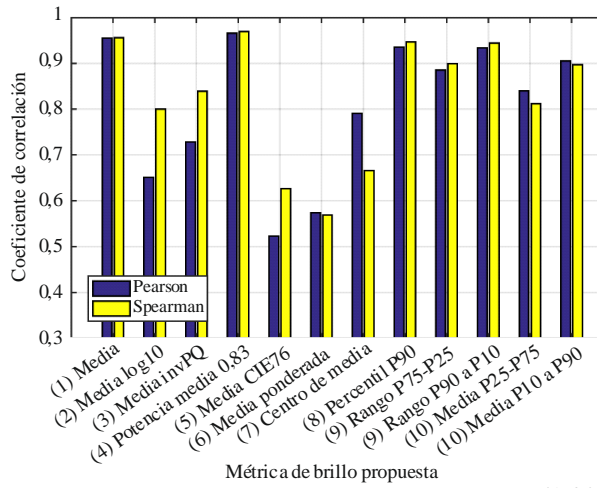
Los percentiles más bajos (métrica 8) tienen muy malos resultados, pero los percentiles más altos se correlacionan bien con los resultados subjetivos de la prueba. Esto sugiere que la distribución de la luminancia en las partes más oscuras de la imagen no es un factor importante para el brillo general percibido, a diferencia del nivel de las zonas más brillantes, que resulta decisivo. La correlación disminuye para los percentiles superiores al 90°, lo que implica que las zonas brillantes muy pequeñas tienen un efecto menor en el brillo general.

Los rangos de percentil (métrica 9) tienen resultados similares al percentil correspondiente al extremo superior del rango, esto es, la correlación para  $P_{90} - P_{10}$  es similar a la de  $P_{90}$  por sí solo y la correlación para  $P_{75} - P_{25}$  se encuentra entre  $P_{70}$  y  $P_{80}$ . Ambos rangos mostraron una correlación relativamente buena con los resultados subjetivos. Todas las imágenes de la prueba contenían algunas regiones oscuras, por lo que, en este caso, los rangos de percentil no proporcionan más información que los percentiles individuales.

Los resultados de la media de los valores de un rango concreto (métrica 10) también son relativamente buenos. La correlación más alta corresponde al rango más amplio, esto es, el rango que es más similar a la métrica 1.

FIGURA 6

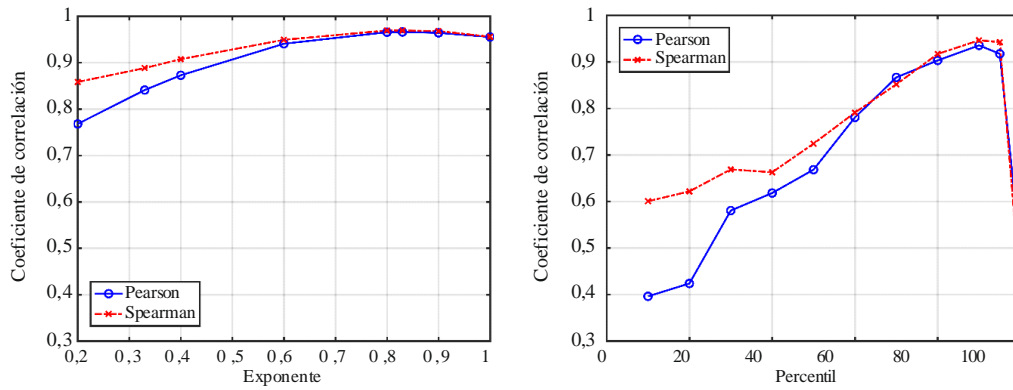
**Coefficientes de correlación de todas las métricas estudiadas**  
**En las métricas 4 y 8 se utilizan los parámetros con más correlación**



BT.21 63-06

FIGURA 7

**Coefficientes de correlación de la métrica 4, los valores medios de luminancia de píxel en pantalla elevados a una potencia, con exponentes entre 0,2 y 1 (izquierda); y coeficiente de correlación de la métrica 8, percentiles 10 a 100 de los valores de luminancia de píxeles en pantalla (derecha)**



BT.21 63-07

CUADRO 1

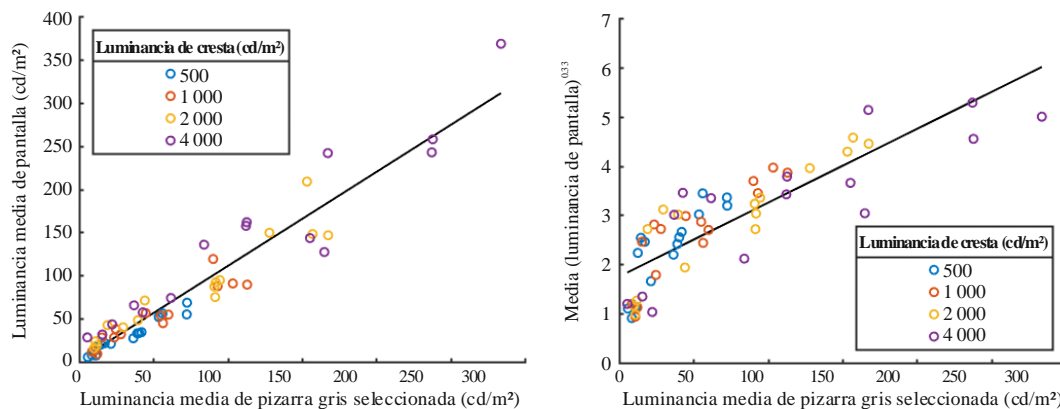
**Coefficientes de correlación de Pearson y de la clasificación de Spearman para las métricas de brillo estudiadas.  
La mejor correlación de cada sección del Cuadro se muestra resaltada en negrita**

Métrica	Valor de parámetro (si procede)	Coefficiente de correlación de Pearson	Coefficiente de correlación de clasificación de Spearman
1) Luminancia media de pantalla	–	<b>0,955378</b>	<b>0,955877</b>
2) Luminancia media log10 de pantalla	–	0,651608	0,800111
3) EOTF inversa PQ media de la luminancia de pantalla	–	0,728708	0,839344
4) Luminosidad CIE 1976 media	–	0,523273	0,626341
5) Luminancia media de pantalla elevada a una potencia	0,2	0,767964	0,858405
	0,33	0,841025	0,888358
	0,4	0,872807	0,907530
	0,6	0,940758	0,949264
	<b>0,8</b>	0,965687	<b>0,969492</b>
	<b>0,83</b>	<b>0,966131</b>	0,969214
	0,9	0,964285	0,968158
6) Luminancia de pantalla media ponderada	–	0,573798	0,568769
7) Media de valores en el centro de la pantalla	–	<b>0,791089</b>	<b>0,666296</b>
8) Percentiles	$P_{10}$	0,395950	0,600389
	$P_{20}$	0,423570	0,621506
	$P_{30}$	0,580292	0,668797
	$P_{40}$	0,617995	0,662573
	$P_{50}$	0,668203	0,724034
	$P_{60}$	0,780425	0,790886
	$P_{70}$	0,866544	0,851570
	$P_{80}$	0,903016	0,916921
	<b><math>P_{90}</math></b>	<b>0,935327</b>	<b>0,946374</b>
	$P_{95}$	0,917317	0,942317
$P_{100}$	0,491586	0,410593	
9) Rangos de percentil	$P_{75} - P_{25}$	0,885345	0,899194
	<b><math>P_{90} - P_{10}</math></b>	<b>0,934097</b>	<b>0,944540</b>
10) Media de los valores de un rango específico	$P_{25}$ a $P_{75}$	0,839611	0,811892
	<b><math>P_{10}</math> a <math>P_{90}</math></b>	<b>0,905243</b>	<b>0,89686</b>



FIGURA 8

Métrica 1, luminancia media de pantalla (izquierda), y métrica 5, luminancia media de pantalla elevada a la potencia de 0,33 (derecha), cada una representada con respecto a la luminancia media de pizarra gris seleccionada (utilizada como medida del brillo subjetivo, véase el Anexo 2 para obtener más información), en cada imagen de la prueba



BT.21 63-08

## Conclusión

Se estudian diez clases de métricas de brillo objetivas que relacionan los valores de luminancia de píxel en pantalla con el brillo general de la imagen. Las mediciones anteriores del brillo general percibido de un conjunto de imágenes HDR determinan los datos de referencia reales para la evaluación de las métricas estudiadas.

La métrica con mejor desempeño eleva los valores de luminancia de píxel en pantalla a una potencia de 0,83 antes de calcular la media, pero los resultados de este procedimiento apenas son mejores que los de una métrica más simple que determina los valores de luminancia media de píxel en pantalla de forma directa. La mejora que conlleva elevar primero los valores a una potencia es mínima, y probablemente esté sujeta a incertidumbre experimental, por lo que se prefiere el método más sencillo para las aplicaciones en tiempo real. La elevada correlación de 0,96 sugiere que esta sencilla métrica constituirá una base eficaz para el control del brillo.

## Referencias

- [1] Noland, K.C., Pindoria M. y Cotton, A., *Modelling Brightness Perception for High Dynamic Range Television*. Research & Development White Paper, 2019, págs. 1, 2. Disponible en <http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP341.pdf>.
- [2] Hunt, R. W. G., *The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television*, 4ª ed. Fountain Press, 1987.
- [3] Fairchild, Mark, The HDR Photographic Survey, sitio web, <http://markfairchild.org/HDR.html>.
- [4] Fröhlich, J., Grandinetti, S., Eberhardt, B., Walter, S., Schilling, A., y Brendel, H., *Creating cinematic wide gamut HDR-video for the evaluation of tone mapping operators and HDR-displays*, Proc. SPIE 9023, Digital Photography X, 90230X, 7 de marzo de 2014. Imágenes disponibles en línea, en <https://www.hdm-stuttgart.de/vmlab/hdm-hdr-2014/>.
- [5] Fechner, G. T., *Elemente der Psychophysik*, Breitkopf und Härtel, 1860.
- [6] Stevens, S. S., *To Honour Fechner and Repeal His Law*, Science, vol. 133, N° 3446, págs. 80-86, 1961.
- [7] Comisión Internacional de Iluminación, *CIE 1976 L\*u\*v\* colour space*, 2014. [en línea] Disponible en <https://cie.co.at/eilv/159>.



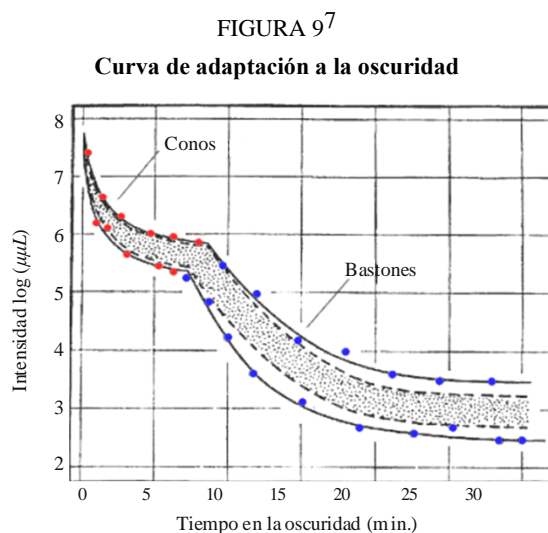
- [8] Moon, P. y Spencer, D. E., *The Visual Effect of Non-Uniform Surrounds*, J. Optical Soc. America, vol. 25, N° 3, págs. 233-248, 1945.

### Anexo 3 (informativo)

#### Información de referencia sobre la forma funcional del nivel de imagen temporal

##### Introducción

La visión humana se adapta con el paso del tiempo al contenido que visualiza. En cierta medida, esta adaptación depende del contenido que ha estado visualizando el observador en el pasado reciente. Se sabe desde hace tiempo que, en lo que respecta a un estímulo presentado con una luminancia fija y durante un periodo fijo, el nivel de adaptación del observador está relacionado con el producto de la luminancia presentada y su duración (esto es, la energía total a la que estuvo expuesto el observador) [1] [2] [3]. Si se elimina el estímulo cuando se ha completado la adaptación a ese nivel de luminancia fija, se inicia la adaptación a la oscuridad, que tarda unos 30 minutos en hacerse efectiva. En la Fig. 9 se presenta la curva de la adaptación a la oscuridad como función del tiempo.



BT.2163-09

*Nota a la Fig. 9:* La zona sombreada representa el 80% del grupo de participantes (datos de Hecht y Mandelbaum tomados de Pirenne M. H., «Dark Adaptation and Night Vision. Chapter 5». Davson, H. (ed), *The Eye*, vol. 2. Londres, Academic Press, 1962).

Se observa que los conos y los bastones se adaptan siguiendo curvas similares, pero en regímenes de luz diferentes. La fovea solo contiene conos, por lo que faltaría la parte de la curva determinada por los bastones. Como se ha señalado anteriormente, las curvas de adaptación a la oscuridad dependen

<sup>7</sup> Figura extraída de <https://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/light-and-dark-adaptation/>.

de la luminancia previa a la adaptación, cuya duración influye además en la adaptación a la oscuridad. Cuanto menos dure la luminancia previa a la adaptación, más rápido se producirá dicha adaptación. Esto sugiere que la exposición a la luminancia durante más tiempo se asocia a un efecto menor sobre el estado de adaptación actual.

Una hipótesis posible es que se puede estimar el estado actual de adaptación de un observador expuesto a contenido de vídeo integrando de forma ponderada la luminancia de las tramas de vídeo anteriores, de manera que las tramas visualizadas hace más tiempo tengan menos peso. En procesamiento de imágenes, esto equivaldría a integrar individualmente cada posición de píxel en un número concreto de tramas previas. Sin embargo, esta integración es análoga a la aplicación de un filtro de paso bajo temporal en cada posición de píxel. Por tanto, en principio sería posible determinar el estado de adaptación del sistema visual de un observador expuesto a vídeo convolucionando un filtro de paso bajo con el propio vídeo.

Una convolución de este tipo conlleva una carga de cálculo importante y, además, se puede estimar el efecto con más eficiencia y de forma más adecuada a la biología. Para ello, se puede modelar la respuesta de las neuronas en el cerebro (humano) con modelos de *leaky integrate-and-fire* (LIF) (generalizados). Las neuronas presentan una relación entre las corrientes de la membrana neuronal en la etapa de entrada y el potencial de membrana en la etapa de salida<sup>8</sup>. Se sabe que las neuronas pierden potencial en función de la resistencia de la membrana, de manera que en el tiempo  $t$  la corriente impulsora  $I(t)$  guarda la relación siguiente con el potencial de membrana  $V_m$ :

$$I(t) = \frac{V_m(t)}{R_m} + C_m \frac{dV_m(t)}{dt}$$

siendo:

$R_m$ : resistencia de la membrana

$C_m$ : capacitancia de la neurona.

Se trata en esencia de un integrador con fugas (*leaky integrator*)<sup>9</sup>. Se puede multiplicar por  $R_m$ , e introducir la constante de tiempo de la membrana  $\tau_m = R_m C_m$  para generar el resultado<sup>10</sup>:

$$\tau_m \frac{dV_m(t)}{dt} = -V_m(t) + R_m I(t)$$

Parece lógico asumir que, cuando  $t = 0$ , el potencial de membrana presenta un valor constante dado, esto es,  $V_m(0) = V$ , y la entrada desaparece en cualquier momento a partir de entonces, esto es,  $I(t) = 0$  para  $t > 0$ . O, lo que es lo mismo, una neurona inicia su adaptación a la ausencia de entrada. En el caso de un fotorreceptor, por ejemplo, se trataría del inicio de la adaptación a la oscuridad, pero cabe destacar que este proceso no es exclusivo de los fotorreceptores. Por lo tanto, la solución cerrada resultante de la ecuación anterior es la siguiente:

$$V_m(t) = V e^{\frac{-t}{\tau_m}} \quad \text{para } t > 0$$

Se observa que esta ecuación genera de hecho un modelo cualitativo de las curvas de adaptación a la oscuridad que se muestran en la Fig. 9. Cabe destacar también que equivale en esencia al modelo propuesto por Crawford en 1947 [4] [5]. Se ha demostrado que la integración con fugas constituye un buen modelo del comportamiento de adaptación de las neuronas implicadas en la visión humana.

<sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Biological\\_neuron\\_model#Leaky\\_integrate-and-fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_neuron_model#Leaky_integrate-and-fire).

<sup>9</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Leaky\\_integrator](https://en.wikipedia.org/wiki/Leaky_integrator).

<sup>10</sup> <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch1.S3.html>.

En cuanto a los valores de  $t$  próximos a 0, la derivada de la función anterior tiende a  $\frac{-V}{\tau_m}$ , de manera que se puede controlar la velocidad de cambio inicial con el parámetro  $\tau_m$ . Para conseguir una formula eficaz desde el punto de vista computacional, se reescribe la ecuación diferencial anterior de la manera siguiente:

$$\tau_m(V_m(t) - V_m(t - 1)) = -V_m(t) + R_m I(t)$$

de manera que:

$$(\tau_m + 1)V_m(t) - \tau_m V_m(t - 1) = R_m I(t)$$

lo que da lugar a su vez a:

$$V_m(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left( V_m(t - 1) + \frac{I(t)}{C_m} \right)$$

La estructura de esta ecuación sugiere que la salida de una neurona  $V_m$  en el tiempo  $t$  es una función de la salida de la neurona en el tiempo  $t - 1$ , así como la entrada  $I$  en el tiempo  $t$ .

A efectos de la aplicación de este modelo como integrador con fugas aplicable a imágenes o valores derivados de imágenes, se puede definir la resistencia de la membrana  $R_m$  en 1, de manera que:

$$V_m(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left( V_m(t - 1) + \frac{I(t)}{\tau_m} \right)$$

Para aplicar este modelo en un contexto de radiodifusión, es preferible utilizar un único nivel de adaptación por trama, en lugar de un nivel de adaptación por píxel. En este sentido, cabe señalar que se puede obtener una aproximación de la adaptación de estado estacionario  $L_a(t)$  de la trama  $t$  con una luminancia media de una trama, por ejemplo, el nivel de imagen ( $IL$ ). Por tanto, el estado de adaptación temporal  $L_T(t)$  se determina de la forma siguiente:

$$L_T(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left( L_T(t - 1) + \frac{L_a(t)}{\tau_m} \right)$$

Al aplicar este método, se obtiene el efecto de un filtro de paso bajo temporal, aunque sin la complejidad de cálculo asociada a las operaciones de dicho filtro. Por tanto, se incluye como medida de la adaptación visual humana a contenido en movimiento.

La ecuación anterior se puede reconfigurar de la manera siguiente:

$$L_T(t) = L_T(t - 1) \left( 1 - \frac{1}{\tau_m + 1} \right) + L_a(t) \left( \frac{1}{\tau_m + 1} \right)$$

## Referencias

- [1] F. A. Mote y A. J. Riopelle. The effect of varying the intensity and the duration of preexposure upon foveal dark adaptation in the human eye. *J. comp. physiol. Psychol.*, págs. 46(1):49-55, 1953.
- [2] Ledda, Patrick, Luis Paulo Santos y Alan Chalmers. A local model of eye adaptation for high dynamic range images. *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*, págs. 151-160. ACM, 2004.
- [3] Mote, F. A., y A. J. Riopelle. The effect of varying the intensity and the duration of preexposure upon foveal dark adaptation in the human eye. *The Journal of general physiology* 34, N° 5 (1951): págs. 657-674.
- [4] Crawford, B. H. Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli. *Proc. R. Soc. Lond. B* 134, N° 875 (1947): págs. 283-302.
- [5] Pianta, Michael J. y Michael Kalloniatis. Characterisation of dark adaptation in human cone pathways: an application of the equivalent background hypothesis. *The Journal of physiology* 528, N° 3 (2000): págs. 591-608.

## Anexo 4 (informativo)

### Verificación de la constante de tiempo en el nivel de imagen temporal

#### Introducción

En este Anexo se presentan las investigaciones realizadas sobre el  $\tau$  adecuado al algoritmo de tiempo de deterioro que figura en el § 2.

#### Pruebas subjetivas

Los laboratorios Dolby desarrollaron un conjunto de pruebas subjetivas, cuya novedad radica en que se estudia la tolerancia subjetiva a los cambios de brillo con cambios de tiempo. Se realizaron dos versiones del experimento para calcular las respuestas visuales a las transiciones brillante-oscuro-brillante y oscuro-brillante-oscuro. En la primera versión del experimento (brillante-oscuro-brillante) se mostró a los observadores una imagen brillante durante diez segundos, tras lo que se cambió a una imagen oscura durante una cantidad de tiempo variable y, finalmente, se volvió a la imagen brillante durante siete segundos. De forma similar, en la segunda versión (oscuro-brillante-oscuro) se mostró a los observadores una imagen oscura durante diez segundos, tras lo cual se cambió a una imagen brillante durante una cantidad de tiempo variable y, finalmente, se volvió a la imagen oscura durante siete segundos. En el Cuadro 2 se muestran las diferentes duraciones de la imagen intermedia para ambas versiones. Antes del experimento, se realizaron varias pruebas beta para determinar las duraciones de tiempo óptimas para cada versión.

CUADRO 2

#### Duraciones del tiempo de adaptación aplicadas en el experimento

Versión del experimento	Duración de la imagen intermedia en segundos
Brillante-oscuro-brillante	0,5, 5, 10, 25, 40, 60, 90, 120, 150
Oscuro-brillante-oscuro	0,5, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60

Tras la transición de interés (de la imagen intermedia a la imagen final), se pidió a los participantes en la prueba que puntuaran su experiencia. En el Cuadro 3 se muestran las puntuaciones y la terminología asociadas a la escala de degradación. Los términos que indican un grado de dolor/molestia tienen cada uno dos valores para añadir gradación. Además, las dos versiones de la prueba utilizan expresiones diferentes para reflejar las sensaciones de los observadores en cada intersección del brillo.

CUADRO 3

#### Escala de degradación utilizada para calificar la intersección del brillo en ambas versiones del experimento

Puntuación(es)	Terminología brillante-oscuro-brillante	Terminología oscuro-brillante-oscuro
1, 1,5	Doloroso	Molesto
2, 2,5	Bastante doloroso	Bastante molesto
3, 3,5	Ligeramente doloroso	Ligeramente molesto
4	Nada doloroso	Nada molesto

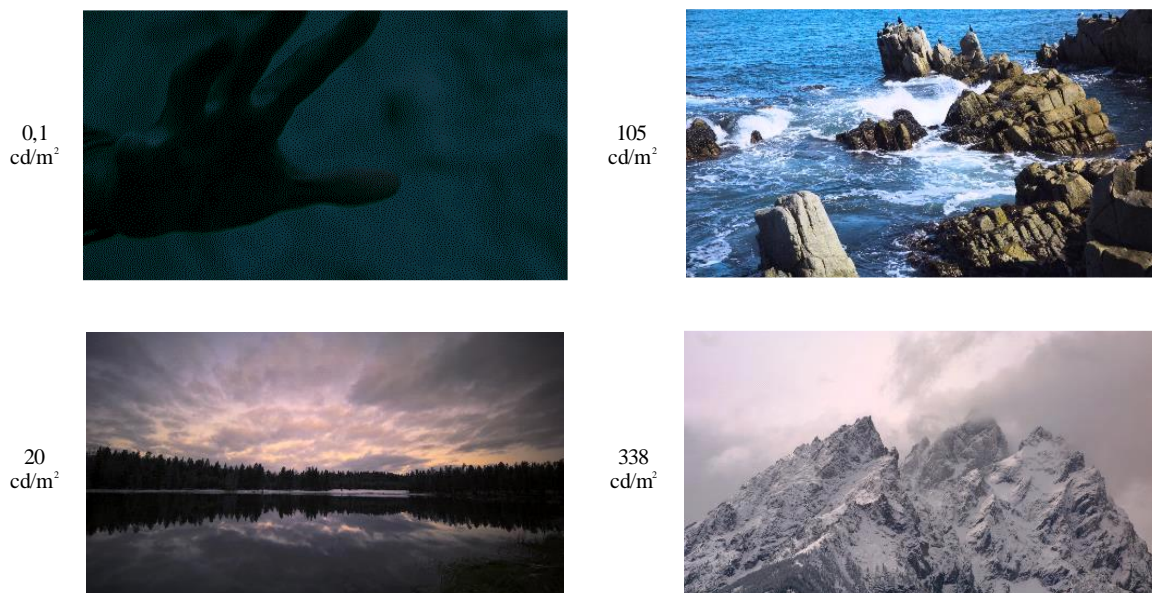
Los participantes subjetivos de este experimento son 17 telespectadores expertos y no expertos. Se utilizó una condición de visualización de la Recomendación UIT-R BT.2100 con un entorno de  $5 \text{ cd/m}^2$  y un sistema de proyector láser Christie 4K 6P. El proyector láser se calibró con una luminancia de cresta de  $1\,000 \text{ cd/m}^2$  y obtuvo un nivel de oscuridad medida de  $0,0004 \text{ cd/m}^2$ . Las imágenes se dispusieron de tal manera que subtendían un ángulo horizontal de  $3,2$  alturas de imagen desde la posición de visualización del observador. Tras ser codificada con la función de transferencia electroóptica PQ, la señal de imagen se envió a través de la interfaz digital normalizada (SDI).

### Imágenes de la prueba

En total, en este estudio se emplearon las cuatro imágenes que se muestran en la Fig. 10. Una de ellas se utilizó como imagen «oscura», mientras que las otras tres representaron diferentes niveles de imagen «brillante». Se repitió el procedimiento de prueba para cada imagen brillante. Se correlacionaron las tonalidades de todas las imágenes para su visualización dentro del rango de luminancia del proyector. Dolby Laboratories, Inc. (Dolby) creó la imagen oscura y recibió la autorización de Spears & Munsil para utilizar las tres imágenes brillantes<sup>11</sup>. En la Fig. 1 se muestran las imágenes y sus valores de luminancia media de pantalla, calculados con el algoritmo de nivel de imagen del § 1.

FIGURA 10

Imágenes de prueba con los valores de luminancia media de pantalla especificados, en el proyector de  $1\,000 \text{ cd/m}^2$



BT.2163-10

### Resultados de la prueba

En las dos versiones del experimento, se evaluaron tres imágenes «brillantes» diferentes para analizar la transición a distintos valores de luminancia media de pantalla. El objetivo era mostrar cómo cambia la puntuación subjetiva media en función de la magnitud del cambio de brillo, y también del paso del tiempo de adaptación.

<sup>11</sup> Spears & Munsil Ultra HD Benchmark (2023). <https://www.biaslighting.com/products/spears-munsil-ultra-hd-benchmark-2023>.

En la Fig. 11 se presentan las puntuaciones medias e intervalos de confianza del 95% para las tres imágenes en las nueve pruebas de tiempo de adaptación. Una puntuación subjetiva media de 4 representa una transición que no conlleva dolor de ojos o molestia subjetiva, mientras que las puntuaciones de 2 e inferiores sugieren un dolor de ojos o una molestia significativos.

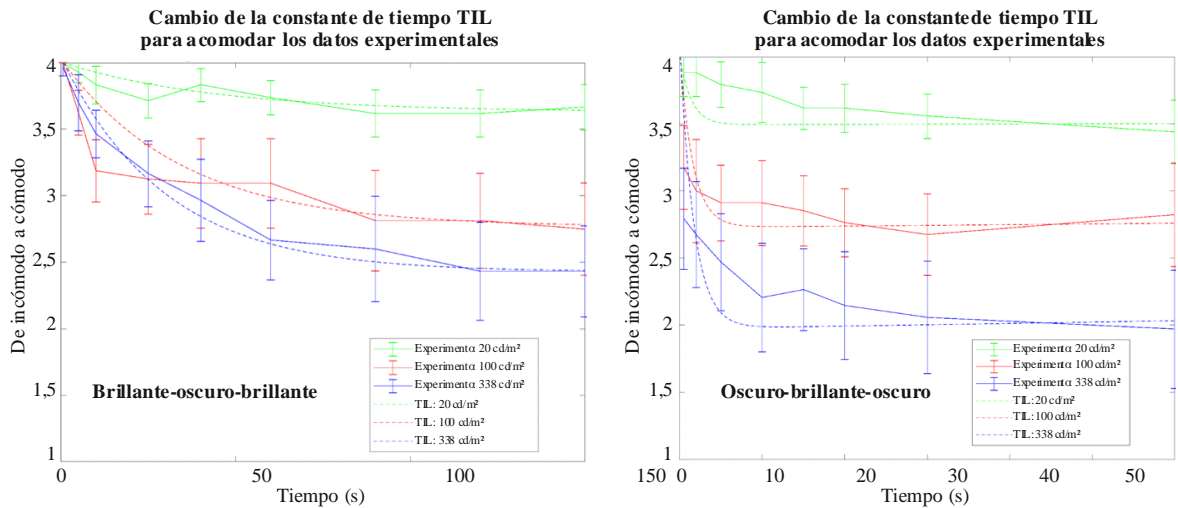
Para acomodar un valor  $\tau$  adecuado a la ecuación de nivel de ruido temporal, hay que relacionar el tiempo de adaptación con los resultados de la puntuación subjetiva media. La respuesta al nivel de imagen del § 3 es una aproximación más ajustada de la experiencia subjetiva.

Por lo tanto, una vez convertida la luminancia media de pantalla al nivel de la imagen, se aplicaron las ecuaciones de TIL con diferentes valores de  $\tau$  para calcular el nivel de adaptación a la imagen oscura tras la exposición inicial de diez segundos a la imagen brillante y los diferentes tiempos de adaptación. Tras generar las estimaciones de TIL para cada combinación de imagen brillante y tiempo de adaptación, se calcularon los valores de respuesta al nivel de imagen. A continuación, se escalaron dichos valores para reflejar el rango de puntuación subjetiva media de sus valores de brillo respectivos. Se utilizó para ello el procedimiento estándar de normalización y escalado de rangos.

En la Fig. 11, estos valores de puntuación subjetiva media resultantes del experimento, con valor óptimo de  $\tau$  y calculados según el TIL, están representados con líneas de puntos, y los datos experimentales se muestran con líneas continuas.

FIGURA 11

Puntuaciones subjetivas medias de transiciones de brillo para diferentes tiempos de adaptación, comparadas para aproximar las puntuaciones subjetivas medias generadas



BT.2163-11

Más abajo se indican los valores óptimos de  $\tau$  para esta forma funcional (dentro de los intervalos de confianza). Para mantener bajos los tiempos de adaptación, en el § 2 se utiliza el extremo inferior del rango de valores óptimos.

$$\tau = \begin{cases} [22 \text{ a } 25] \frac{f}{24} & \text{si } p(t) \geq 0 \\ [800 \text{ a } 2000] \frac{f}{24} & \text{si } p(t) < 0 \end{cases}$$

El tiempo de deterioro sigue más de cerca las tendencias de los datos experimentales de la versión brillante-oscuro-brillante. Se observa una desviación importante para  $100 \text{ cd/m}^2$  a diez segundos. Resultaría útil seguir estudiando este valor atípico. La constante tiempo de deterioro no sigue tan de cerca los datos experimentales en la versión oscuro-brillante-oscuro, debido principalmente a la mayor influencia que supone la magnitud de la intersección del brillo en duraciones cortas. Los observadores detectaron una imagen residual inmediata, incluso con la duración de tiempo más corta de una imagen brillante. La forma funcional actual no permite una disminución inmediata, seguida por una reducción lenta. Sería conveniente continuar analizando este fenómeno.

---