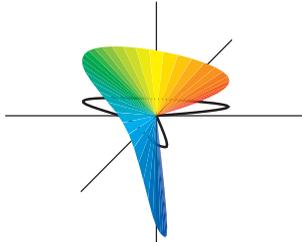


Color, visión del color, y colores elementales en la tecnología de la información en color



Autor:
Prof. Dr. Klaus Richter

Impresión especial para la exposición **El Color y la Visión del Color**

en el Departamento de Tecnología de la Iluminación
de la Universidad Técnica de Berlín (TU)

Einsteinufer 19

10587 Berlín, Alemania

Véase <http://www.li.tu-berlin.de>

Esta publicación (SP15.PDF) tiene versiones diferentes
para monitor (S), offset (L), y salida por impresora (P); además está
en alemán (G), inglés (E), español (S), francés (F), italiano (I), y noruego (N),
ver

<http://farbe.li.tu-berlin.de/color> y

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/color>

Contenido

01 Métrica del color	4
02 Color y visión del color	4
03 Multiplicidad del color	5
04 Sólido de color	9
05 Colores elementales	11
06 Círculo de tono simétrico	14
07 Colores con croma máximo	18
08 Atributos del color: croma y claridad	19
09 Atributos del color: brillantez y blancura	20
10 Colores del espectro y colores elementales	22
11 Aparato para mezclar colores espectrales y reflexión	27
12 Fluorescencia	29
13 Retrorreflexión	31
14 Mezcla de color	32
15 Radiación espectral	43
16 Contraste	48
17 Estandarización del valor del color y medida del color	53
18 Propiedades especiales de la visión del color	60
19 Colores elementales y tecnología de la información en color	69
20 Colores elementales de salida independientes del dispositivo	72
21 Reproducción afin del color	73
22 Referencias	74
23 Agradecimientos	75
24 Test charts and technical remarks	77

Comentarios a las cartas de prueba

Las **cartas de prueba números 1 a 3 para rendimiento de color** (PS13, PS23, PS33) se usan en iluminación y en tecnología de la imagen. Con ellas se pueden hacer las siguientes evaluaciones visuales y especificaciones colorimétricas entre fuentes de luz reales y de referencia (D65, D50, P4000, A), o entre la reproducción real y la deseada:

Fidelidad de color: Diferencia de color (CIELAB ΔE^*_{ab}) de la reproducción.

Localización de tono elemental: Localización de los cuatro tonos elementales (CIELAB Δh_{ab}) en la reproducción real y deseada.

Escala de tono: Cambio de los tonos (CIELAB Δh_{ab}) dentro de cada sector de tono.

Colores metámeros: Diferencia de color (CIELAB ΔE^*_{ab}) entre fuente de luz real y de referencia (D65, D50, P4000, A), o entre escáner real e ideal (colorimétrico).

Preferencia de color: Diferencia de color (CIELAB ΔE^*_{ab}) con el incremento deseado en claridad L^* y/o croma C^*_{ab} .

Los **estándares internacionales** ISO/IEC 15775 e ISO 9241-306 así como las series estándar DIN 33866-1 a -5, y DIN 33872-1 a -6 usan para entrada y salida series de color de 5 y 16 pasos visualmente equidistantes. La igualdad de las diferencias se realiza usualmente de forma visual. La especificación colorimétrica permite calcular diferencias de color entre muestras reales y los colores de salida deseados, conforme con CIELAB (ISO 11644-4).

Se da información para lograr los colores deseados de salida, mediante una descripción técnica con una tabla en la cubierta de las dos páginas interiores.

1 Métrica del color

La métrica del color estudia la definición y medida del color y de las diferencias de color. La métrica del color se basa en la aplicación de la publicación CIE 15 *Colorimetría de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE)*.

2 Color y visión del color

La descripción de la calidad de la reproducción del color sólo es posible sobre la base de un buen conocimiento de las propiedades de la visión humana del color. Por tanto, es esencial ampliar los conocimientos básicos mediante la investigación en visión. Con el apoyo de la *Fundación Alemana de Investigación (DFG = Deutsche Forschungsgemeinschaft)* K. Richter (1979, 1985) ha publicado ya dos informes de investigación en el BAM. Hay otras muchas publicaciones en el campo de las escalas de color, umbrales de color y tonos elementales.

La ordenación psicológica de los colores a partir de la percepción humana es una parte separada e importante del *Color y la Visión del Color*. La descripción psicofísica del sistema visual humano se basa tanto en la medida física como en la percepción.

En las secciones siguientes se presentan las propiedades básicas del *Color y la Visión de Color*:

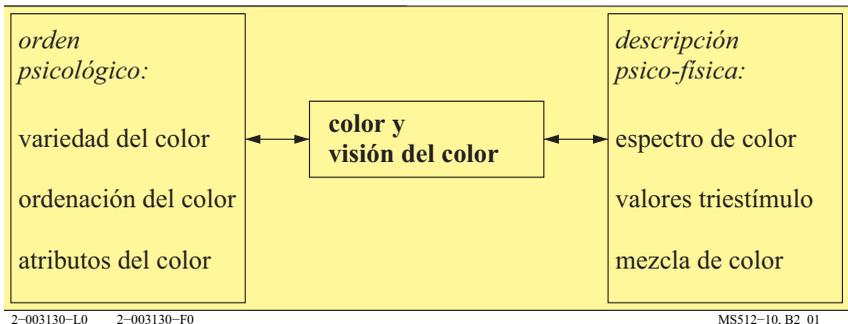


Fig. 1: Apartados dentro del color y la visión del color.

La Figura 1 muestra distintos campos importantes del color y la visión en color, que se describirán seguidamente por medio de numerosas figuras.

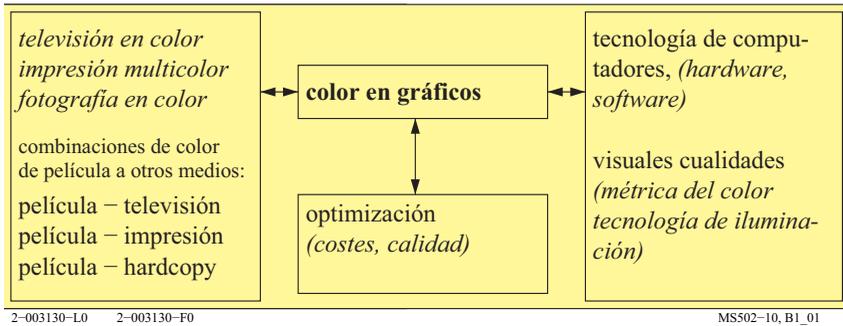


Fig. 2: Color en gráficos como aplicación de las propiedades de la visión del color.

La Figura 2 muestra el campo del color en gráficos, que se basa esencialmente en las propiedades de la visión del color. Además, para optimizar las numerosas aplicaciones, hay que tener también en cuenta las propiedades de la reproducción del color y la tecnología de computadores.

3 Multiplicidad del color

Todo lo que vemos tiene color. Los colores son elementos de nuestras sensaciones visuales. Los materiales y procesos que producen los colores son algo diferente de dichas sensaciones. Seguidamente ordenaremos la multiplicidad de colores existentes. Esto nos llevará a discernir los colores que tienen unos mismos atributos.

Según *Judd y Wyszecki (1975)*, las personas con visión normal del color pueden distinguir alrededor de 10 millones de colores diferentes. Por tanto, para ordenar estos múltiples colores, es necesaria una clasificación basada en atributos comunes.



Fig. 3: Multiplicidad del color.

La Figura 3 muestra un conjunto aleatorio de muestras de color que, en primer

lugar, se pueden distribuir en dos grupos: colores acromáticos y colores cromáticos.

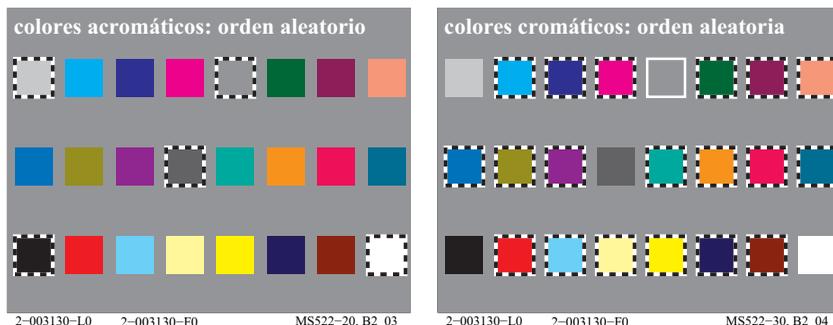


Fig. 4: Colores acromáticos y cromáticos.

En la Figura 4, aparte de la ordenación aleatoria de los colores, se ha señalado el grupo de colores acromáticos (*izquierda*) y el de colores cromáticos (*derecha*).

colores acromáticos, colores intermedios	colores cromáticos, colores elementales	colores cromáticos, colores de dispositivo
5 colores acromáticos:	colores "ni-ni"	TV, impresión (PR), foto (PH)
<i>N</i> negro (noir francés)	4 colores elementales (e):	seis colores de dispositivo (d):
<i>D</i> gris oscuro	$R = R_e$ rojo	$C = C_d$ cian azul (cian)
<i>Z</i> gris intermedio	<i>ni amarillento ni azulado</i>	$M = M_d$ magenta rojo (magenta)
<i>H</i> gris claro	$G = G_e$ verde	$Y = Y_d$ amarillo
<i>W</i> blanco	<i>ni verdoso ni rojizo</i>	$O = R_d$ rojo anaranjado (rojo)
dos colores intermedios:	$B = B_e$ azul	$L = G_d$ verde hoja (verde)
$C_e = G50B_e$ azul-verdoso	<i>ni verdoso ni rojizo</i>	$V = B_d$ violeta azulado (azul)
$M_e = B50R_e$ rojo-azulado	$J = Y_e$ amarillo (jaune francés)	
	<i>ni verdoso ni rojizo</i>	
2-003130-L0 2-003130-F0		MS582-10

Tabla 1: Colores elementales y de dispositivo en tecnología de la información.

La Tabla 1 muestra la definición de los colores elementales (subíndice e) y los colores de dispositivo (subíndice d) usados en tecnología de la información. Hay cuatro colores elementales $RGBY_e$, y seis colores de dispositivo $RGB-CMY_d$. En algunas aplicaciones, a los cuatro colores elementales se añaden (Tabla 1, parte inferior izquierda) los colores visualmente intermedios C_e (azul verdoso) y M_e (rojo azulado), lo que genera un total de seis colores. La Tabla 1 incluye también 5 colores acromáticos $NDZHW$, que van desde el negro N (negro francés) al blanco W , pasando por el gris intermedio Z . Todos los demás son colores cromáticos.

Los nombres O , L , y V se utilizan en muchos documentos estándar, (por ejemplo, ISO/IEC 15775, ISO/IEC 24705, ISO 9241-306, DIN 33866-1 a -5 y DIN 33872-1 a -6). Los nombres O , L , y V tienen la ventaja de ser cortos y representar la apariencia. Sin embargo, tienen la desventaja de no ser utilizados en muchas aplicaciones. Además, la letra L se utiliza también para designar la luminancia en todos los estándares de tecnología de la iluminación (por ejemplo, ISO/IEC/CIE 8589).

Por tanto, en lo sucesivo se usarán R_d , G_d y B_d en lugar de los nombres O , L y V . En la Tabla 1 los colores de dispositivo (subíndice d) rojo R_d , verde G_d y azul B_d , son diferentes de los colores elementales (subíndice e) rojo R_e , verde G_e y azul B_e . Para colores cualesquiera no definidos, rojo, verde y azul, emplearemos la designación $R_$, $G_$ y $B_$ (guión bajo $_$), respectivamente. Generalmente los colores $RGB_$ no son idénticos ni a los colores de dispositivo R_d , G_d y B_d , ni a los colores elementales R_e , G_e y B_e . La gran ventaja de los colores elementales, rojo R_e , verde G_e y azul B_e , es su definición visual, y el hecho de ser independientes del dispositivo, conforme a CIE R1-47:2009 *Ángulos de tono de los colores elementales*.

Hoy en día, en la tecnología de la imagen en color, la especificación de los colores se realiza digitalmente. El número mínimo de colores empleados es de 4096. Para cada uno de los tres colores de dispositivo (subíndice d), R_d (color rojo), G_d (color verde) y B_d (color azul), existen 16 pasos. En las pantallas y proyectores, la mezcla aditiva de estos tres colores produce 4096 ($=16 \times 16 \times 16$) colores.

Normalmente los tres colores de dispositivo se codifican en el sistema hexadecimal. Por lo tanto, los 16 pasos, que en el sistema decimal van desde 0 hasta 15, son codificados en hexadecimal como 0 a 9, mas las letras A a F, que designan los valores decimales de 10 a 15.

En la Figura 5 se muestran las especificaciones de diferentes colores en el sistema hexadecimal. Estas especificaciones corresponden a colores RGB_d . Según su apariencia, los tres colores básicos son denominados $R_d=O$ (rojo anaranjado), $G_d=L$ (verde hoja) y $B_d=V$ (violeta azulado).

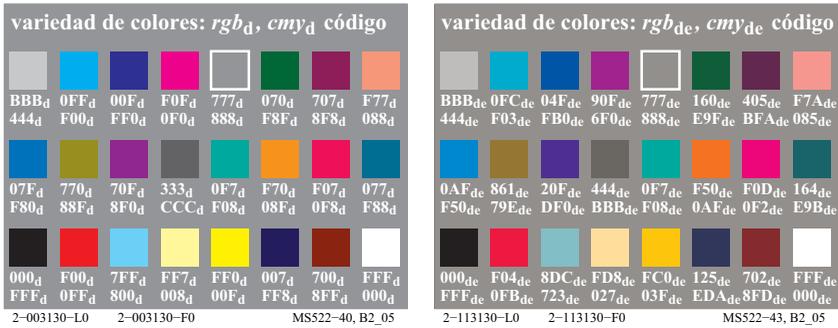


Fig. 5: Códigos de color rgb_d y cmy_d , así como rgb_{de} y cmy_{de} .

En la Figura 5 (*izquierda*) los colores acromáticos de dispositivo (subíndice d = dispositivo) tienen los tres dígitos hexadecimales iguales. En cambio, para los colores cromáticos al menos dos de los tres dígitos son diferentes. Para la salida de dispositivos en color, los colores de dispositivo rgb_d y cmy_d se transforman entre sí mediante la regla de *diferencia a 1*. Por ejemplo, el código rgb_d correspondiente al azul es $00F_d$, y se transforma en cmy_d a $FF0_d$. Si en un fichero de datos de color se usan simultáneamente estas dos especificaciones colorimétricas, se pueden generar salidas iguales o diferentes. Mediante un fichero conforme con DIN 33872-4 se puede comprobar la igualdad de la salida para ambas especificaciones, véase

<http://www.ps.bam.de/De14/10L/L14e00NP.PDF>

La Figura 5 (*derecha*) muestra los códigos rgb_{de} y cmy_{de} para la salida en color elemental (subíndice de = de dispositivo a datos elementales), mediante tres dígitos hexadecimales. De nuevo, los datos rgb_{de} se transforman en cmy_{de} según la regla de *diferencia a 1*.

For example device Blue B_d (first row, third colour) is in Fig. 5 (*left*) defined by the hex number $00F_d$. Fig. 5 (*right*) shows for the elementary Blue B_e the hex digits $09F_{de}$ for the *sRGB* monitor output, $06F_{de}$ for the standard offset output, and $04F_{de}$ for a laser printer output. The device blue B_d and the elementary blue B_e look different. Visually B_d is reddish for all three outputs, and B_e is always neither reddish nor **greenish**.

Sin embargo, por poner un ejemplo, en la Figura 5 (*derecha*), el azul (tercer color de la primera fila) se designa ahora con el número hexadecimal $06F_{de}$ en vez de $00F_d$. El azul de la Figura 5 (*derecha*) es el azul de dispositivo B_d , mientras que el azul de la Figura 5 (*izquierda*) es el azul elemental B_e . Ambos azules son diferentes, y así, mientras que B_d parece rojizo, B_e no es ni verdoso ni

rojizo. Para la producción del azul B_e , en el estándar $sRGB$ de monitor y en el estándar de impresión offset, los números hexadecimales son diferentes.

En escalas de color en las que se pretende lograr muestras visualmente equiespaciadas, como, por ejemplo, una escala de grises con 16 pasos de la misma magnitud, se usa el símbolo * (estrella) para las correspondientes coordenadas de color. Por ejemplo, para el atributo visual de claridad L^* se usa el símbolo "*" (estrella), mientras que dicho símbolo no se usa para designar la magnitud física luminancia L . Análogamente se puede añadir a los datos rgb_e el símbolo "*" (estrella), y llamarlos datos rgb^*_e . La interpretación del símbolo "*" implica que, por ejemplo, la serie de datos hexadecimales $rgb^*_e = 000, 111, 222, \dots, EEE, FFF$, se corresponde con una escala de grises *visualmente equiespaciados*. En lugar de datos hexadecimales también se pueden utilizar números comprendidos entre 0,0 y 1,0. Por ejemplo, el número hexadecimal 5 es igual a 0,3333 ($=5/F = 5/15$). En la tecnología de la información se utilizan en vez de los 16 pasos que hay entre 0 y 9 más las letras A a la F, los 256 pasos que hay entre 00 y 9F más los que hay desde A0 a FF. También se pueden transformar estos números hexadecimales en números decimales. Por ejemplo, el número hexadecimal 55 es igual al número decimal 0,3333 ($=55/FF = 85/255$).

En la salida correspondiente a los datos colorimétricos equivalentes rgb y $cmy0$ se producen muchos problemas en las distintas aplicaciones. Así, la salida en monitor del equivalente rgb y $cmy0$ con productos de software como *Adobe Acrobat* (todas las versiones por encima de la 3 para *Mac* y *Windows*) es diferente, mientras que con *Adobe FrameMaker* (*Versión 8, Windows, 2011*) la salida es idéntica. Por ejemplo, las impresoras en color *Postscript* producen a menudo salidas diferentes, mientras que en impresoras *Postscript*-negro-blanco las salidas son iguales. Mediante ficheros de prueba conformes con DIN 33872-4 y -2 se puede comprobar la igualdad de la salida, véase <http://www.ps.bam.de/33872E>

4 Sólido de color

Leonardo da Vinci (fallecido en 1519) ordenó los múltiples colores seleccionando seis colores *elementales*: un par neutral o acromático (blanco-negro), más dos pares cromáticos: rojo-verde y amarillo-azul. El doble cono de la Figura 6 es un modelo simplificado que sirve para ilustrar sus ideas. El eje vertical corresponde a la serie de colores acromáticos o neutros (desde el blanco al negro), mientras que la circunferencia ecuatorial corresponde a los colores cromáticos puros.

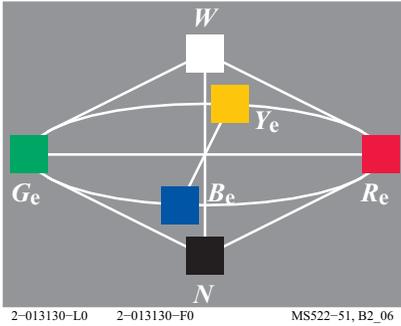


Fig. 6: Doble cono de color.

La Figura 6 muestra un doble cono con los seis colores *simples*. En la Figura 6 las letras significan:

- | | | |
|------------------|-------------|-----------|
| W Blanco | Ye amarillo | Re rojo |
| N Negro (= noir) | Be azul | Ge verde. |

Los seis colores *simples* son aquí los seis colores *elementales* (subíndice e).

El Comité Técnico ISO TC 159/WG2/SC4, *Ergonomía, Requisitos de Pantallas de Visualización* ha recomendado generar los cuatro colores elementales $RYGB_e$ con los siguientes cuatro datos de entrada rgb^*_e : 100, 110, 010, y 001 (véase CIE R1-47). Por lo menos hay tres métodos para calcular los datos rgb_{de} (sibíndice de = de dispositivo a colores elementales) para el dispositivo de salida: a partir del fabricante del dispositivo, mediante software de tecnología de la imagen, o con un archivo marco. El método del archivo marco se ha utilizado para cambiar todos los datos rgb de las figuras de esta publicación conforme al dispositivo de salida ($sRGB$ o impresión offset). El archivo marco incluye 729 (=9x9x9) datos rgb y CIELAB (datos de medida de color) del dispositivo de salida.

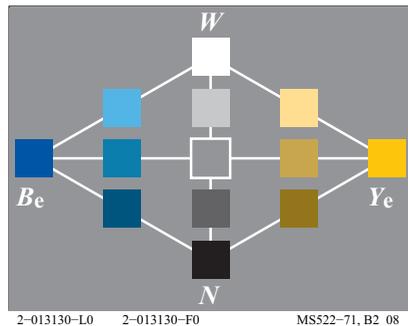
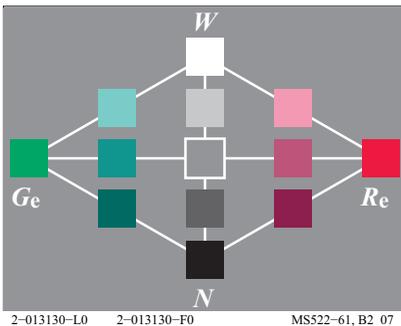


Fig. 7: Cortes correspondientes a los planos de tono RG_e y YB_e .

La Figura 7 muestra cortes verticales rojo-verde (*izquierda*) y amarillo-azul (*derecha*) del doble cono de color, incluyendo varios colores intermedios. El eje acromático (blanco-negro) está situado en el centro.

5 Colores elementales

En cualquier círculo de tono podemos distinguir cuatro colores cromáticos que son perceptualmente simples (ver Tabla 1 de la página 6). A estos colores les llamamos colores elementales: el rojo, amarillo, verde y azul elementales.

Experimentalmente, una selección sobre un círculo de tono nos permite una determinación sencilla del amarillo elemental. Se dice que el amarillo elemental es un color *ni-ni* (o sea, *ni rojizo ni verdoso*), a diferencia de lo que podríamos llamar un color *tanto-como*, como es el amarillo verdoso (o sea, *tanto amarillo como verde*) de un círculo de tono. Los colores *ni-ni* se llaman también en la literatura tonos *únicos*.

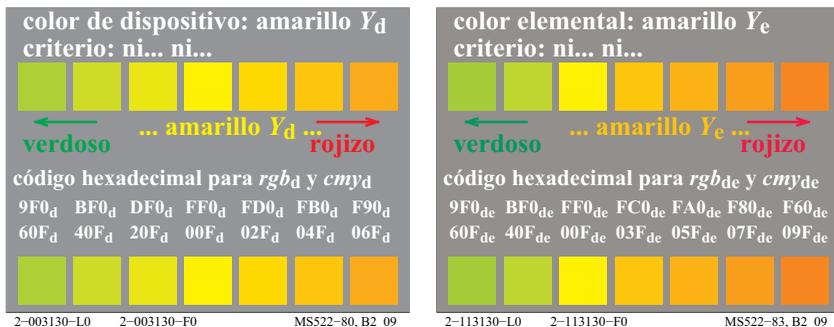


Fig. 8: Colores de dispositivo y elementales con el criterio de selección del amarillo elemental Y_e .

La Figura 8 muestra el criterio para la determinación del color amarillo elemental Y_e , a partir de una parte del círculo de tono en la zona de los amarillos. Con los datos de entrada $rgb_d(1, 1, 0)$ ó $FF0_d$ generalmente se obtiene el color de dispositivo amarillo, Y_d .

The intended elementary yellow Y_e with the visual property neither greenish nor reddish is produced with the rgb_{de} -input data $(1\ 0,86\ 0)_{de} = FD0_{de}$ for the standard *sRGB* monitor, $(1\ 0,86\ 0)_{de} = FD0_{de}$ for the standard offset device, and $(1\ 0,79\ 0)_{de} = FC0_{de}$ for a laser printer. The hue difference between the device yellow Y_d and the elementary yellow Y_e is largest for a **laser printer**.

Aproximadamente, se cumple aquí (*izquierda*) el criterio de que el amarillo elemental es un color que no es *ni verdoso ni rojizo*. Los datos de entrada $rgb_{de}(1, 0.86, 0) = FD0_{de}$ generan el amarillo elemental deseado Y_e , con la propiedad visual de ser un color *ni verdoso ni rojizo*. Se muestra aquí (*derecha*) un ejemplo para impresión offset estándar. La diferencia entre el amarillo de dispositivo Y_d y el amarillo elemental Y_e es pequeña en impresión offset. Sin embargo, para el azul esta diferencia es grande.

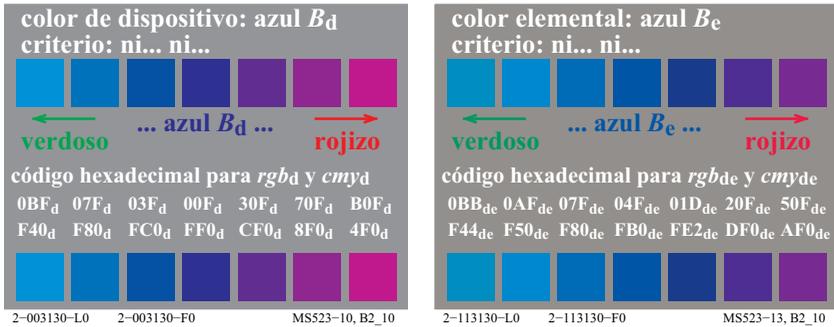


Fig. 9: Colores de dispositivo y elementales con el criterio de selección del azul elemental B_e .

La Figura 9 muestra el criterio para la determinación del color azul elemental B_e , a partir de una parte del círculo de tono en la zona de los azules. Con los datos de entrada $rgb_d(0, 0, 1)$ ó 00F_d generalmente se obtiene el color de dispositivo azul, B_d .

The intended elementary blue B_e with the visual property *neither greenish nor reddish* is produced with the rgb_{de} -input data $(0, 0.60, 1)_{de} = 09F_{de}$ for the standard *sRGB* monitor, $(0, 0.40, 1)_{de} = 06F_{de}$ for the standard offset device, and $(0, 0.27, 1)_{de} = 04F_{de}$ for a laser printer. The hue difference between the device blue B_d and the elementary blue B_e is smallest for a laser printer.

No se cumple aquí (*izquierda*) el criterio de que el azul elemental es un color que no es *ni verdoso ni rojizo*. Los datos de entrada $rgb_{de}(1, 0.40, 0) = 06F_{de}$ generan el azul elemental B_e , con la propiedad visual de ser un color *ni verdoso ni rojizo*, en el ejemplo de impresión offset estándar (*derecha*).

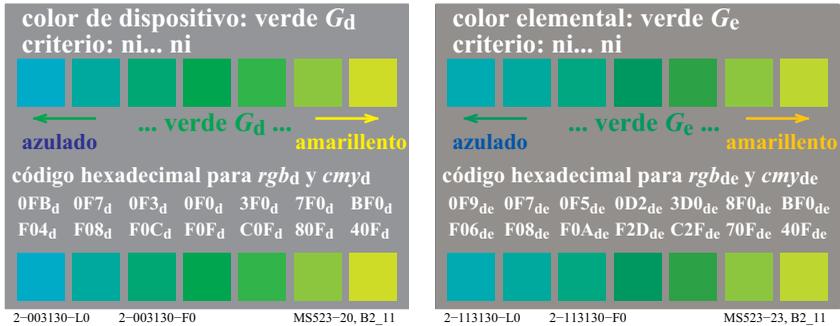


Fig. 10: Colores de dispositivo y elementales con el criterio de selección del verde elemental G_e .

La Figura 10 muestra el criterio para la determinación del color verde elemental G_e , a partir de una parte del círculo de tono en la zona de los verdes. Con los datos de entrada rgb_d (0 1 0) ó $0F0_d$ generalmente se obtiene el color de dispositivo verde, G_d .

The intended elementary green G_e with the visual property *neither bluish nor yellowish* is produced with the rgb_{de} -input data $(0\ 1\ 0,67)_{de} = 0FB_{de}$ for the standard $sRGB$ monitor, $(0\ 1\ 0,07)_{de} = 0F1_{de}$ for the standard offset device, and $(0\ 0,87\ 0,13)_{de} = 0D2_{de}$ for a laser printer. The hue difference between the device green G_d and the elementary green G_e is smallest for **offset print**.

No se cumple aquí (*izquierda*) el criterio de que el verde elemental es un color que no es *ni azulado ni amarillento*. Los datos de entrada rgb_{de} $(0\ 1\ 0,06) = 0F1_{de}$ generan el verde elemental deseado G_e , con la propiedad visual de ser un color *ni azulado ni amarillento*. Se muestra aquí (*derecha*) un ejemplo para impresión offset estándar. La diferencia entre el verde de dispositivo G_d y el verde elemental G_e es mas pequeña que la existente para el azul en impresión offset.

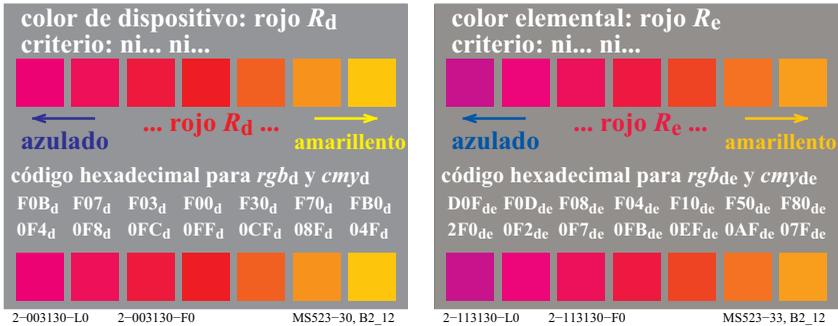


Fig. 11: Colores de dispositivo y elementales con el criterio de selección del rojo elemental R_e .

La Figura 11 muestra el criterio para la determinación del color rojo elemental R_e , a partir de una parte del círculo de tono en la zona de los rojos. Con los datos de entrada rgb_d (1 0 0) ó $F00_d$ generalmente se obtiene el color de dispositivo rojo, R_d .

The intended elementary red R_e with the visual property *neither bluish nor yellowish* is produced with the rgb_{de} -input data $(1\ 0\ 0,27)_{de} = F04_{de}$ for the standard *sRGB* monitor, $(1\ 0\ 0,20)_{de} = F03_{de}$ for the standard offset device, and $(1\ 0\ 0,27)_{de} = F04_{de}$ for a laser printer. The hue difference between the device red R_d and the elementary red R_e is smallest for *offset print*.

No se cumple aquí (*izquierda*) el criterio de que el rojo elemental es un color que no es *ni azulado ni amarillento*. Los datos de entrada rgb_{de} (1 0 0,20) = $F03_{de}$ generan el rojo elemental deseado R_e , con la propiedad visual de ser *ni azulado ni amarillento*, en el ejemplo para impresión offset estándar (*derecha*).

Bajo luz día y con la participación de 28 observadores, *K. Miescher* (1948) determinó experimentalmente los colores elementales a partir de un círculo de tono con 400 pasos. La desviación típica fue de 4 pasos para R_e , Y_e y G_e (1% = 4 pasos de 400) y de 8 pasos (2%) para B_e (véase CIE R1-47). El círculo de tono tenía un croma alto comparado con el de los colores de prueba CIE número 9 al 12 (véase Figura 52 de la página 58).

6 Círculo de tono simétrico

Los colores situados a cada uno de los lados de los dos ejes perpendiculares correspondientes a los tonos elementales R_e - G_e y Y_e - B_e , son cada vez más ama-

rillentos o azulados, o cada vez más rojizos o verdosos, respectivamente, siempre y cuando estén situados lejos del color central acromático.

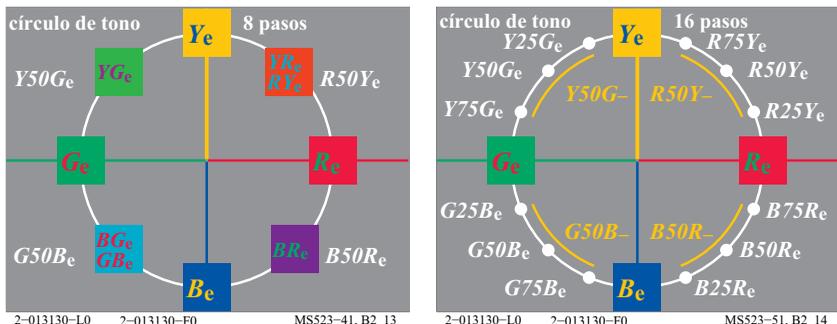


Fig. 12: Círculo de tono simétrico y nombres de los colores intermedios.

La Figura 12 muestra el círculo de tono simétrico con los colores elementales opuestos rojo-verde y amarillo-azul, además de los colores intermedios.

En la mayoría de los idiomas (por ejemplo, alemán, inglés y francés) para los nombres de colores combinados se usa en primer lugar el amarillo y el azul; por ejemplo, amarillo-rojo YR , amarillo-verde YG , azul-verde BG y azul-rojo BR . Esta nomenclatura preferida en dichos idiomas se utiliza en la Figura 12 (*izquierda*). En la Figura 12 (*derecha*) se usa la nomenclatura continua: RY_e , YG_e , GB_e y BR_e .

Además, en el sistema de color CIELAB (ISO 11664-4/CIE 014-4), para designar el tono se usa el ángulo matemático h_{ab} . Dicho ángulo es de 0 grados para R_e , 90 grados para Y_e , 180 grados para G_e y 270 grados para B_e .

En el sistema de color CIELAB hay 100 pasos entre el blanco y el negro. También hay 100 pasos de tono entre cada dos colores elementales contiguos, lo que genera en la Figura 12 los nombres de los colores intermedios. La tecnología de la información recomienda para el tono salidas que van cambiando un 25%, 50% y 75% desde R_e hacia Y_e . En muchos dispositivos esto produce tonos de salida no bien definidos, todos ellos situados a lo largo de un amplio rango comprendido entre R_e y Y_e .

En la tecnología del color en la información se recomienda conseguir el color visualmente intermedio de tono $R50Y_e$. Sin embargo, para muchos de los dispositivos de salida, los tonos correspondientes a $R50Y_e$ están distribuidos en un amplio rango dependiente del dispositivo $R50Y_e$ (zona de amarillos), sucediendo algo similar para los restantes tonos intermedios: $Y50G_e$, $G50B_e$ y $B50R_e$.

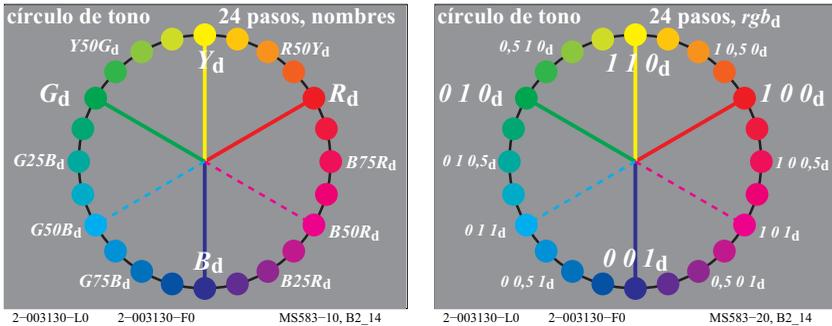


Fig. 13: Círculo de tono de dispositivo con 24 pasos que se usa en tecnología de la información.

La Figura 13 nos muestra un círculo de tono de dispositivo con 24 pasos, que se emplea en la tecnología de la información. Se dan, por ejemplo, los colores de dispositivo RGB_d (izquierda) con sus correspondientes datos rgb de entrada (derecha): $(1\ 0\ 0)_d$, $(0\ 1\ 0)_d$, $(0\ 0\ 1)_d$. Los tonos intermedios de dispositivo Y_d , $G50B_d$ y $B50R_d$ tienen como datos rgb de entrada $(1\ 1\ 0)_d$, $(0\ 1\ 1)_d$, $(1\ 0\ 1)_d$.

En aplicaciones tecnológicas, diseño y arte, la gama de los colores *más claros*, que van desde el rojo hasta el verde pasando por el amarillo, es más importante que la gama de colores *más oscuros*, que van desde el verde hasta el rojo pasando por el azul. Además, en la zona de los amarillos el rango del cromatismo CIELAB C^*_{ab} de los objetos de color es aproximadamente dos veces más grande que el rango existente en la zona de los azules (véanse los datos de C^*_{ab} para 48 tonos que aparecen en la parte posterior de la cubierta del final). Por lo tanto, para una misma diferencia angular, las diferencias visuales de tono son dos veces más grandes en la zona de los amarillos que en la zona de los azules. Por estas dos razones, se aumenta el rango entre el rojo y el verde a través del amarillo, de 120 grados a 180 grados, a la vez que se disminuye el rango entre el verde y el rojo a través del azul, de 240 grados a 180 grados.

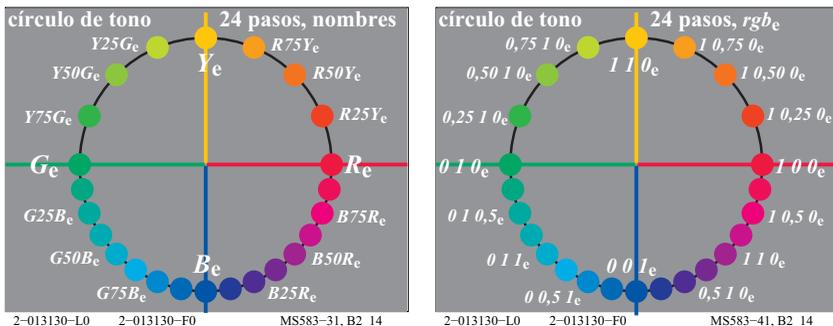


Fig. 14: Círculo de tono elemental de 24 pasos usado en tecnología de la información.

La Figura 14 muestra la relación existente entre los tonos elementales $RYGB_e$ (izquierda) y los datos de entrada rgb^*_e (derecha), para un círculo de tono de 24 pasos, empleado en tecnología de la información. En la Figura 14 se generan los tonos elementales $RYGB_e$ para los datos de entrada rgb^*_e $(1,0,0)_e$, $(1,1,0)_e$, $(0,1,0)_e$ y $(0,0,1)_e$. El archivo de salida debe generar datos rgb_{de} para la salida de los tonos elementales deseados. En el caso más sencillo, el fabricante del dispositivo puede implementar la transformación dentro de su dispositivo. DIN 33872-5 incluye una carta de prueba en los formatos PDF y PS (PostScript). Normalmente, la propiedad de los *tonos elementales* en la salida se comprueba visualmente. Además, también puede comprobarse mediante colorimetría.

Como consecuencia de la peor discriminación del tono de los objetos de color situados en la zona *más oscura*, que va desde el verde hasta el rojo pasando por los azules, se recomienda usar 2 pasos en lugar de 1 en esta zona *más oscura*.

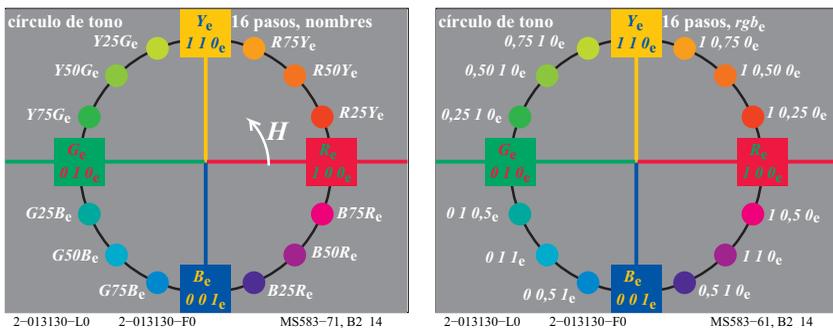


Fig. 15: Círculo de tono elemental de 16 pasos usado en tecnología de la información.

La Figura 15 muestra la relación existente entre los tonos elementales $RYGB_e$ (izquierda) y los datos de entrada rgb^*_e (derecha), para un círculo de tono de 16 pasos, empleado en tecnología de la información. Los tonos elementales $RYGB_e$ se generan para los datos de entrada $rgb_e (1,0,0)_e, (1,1,0)_e, (0,1,0)_e$ y $(0,0,1)_e$. El tono va cambiando con el ángulo de tono de forma similar a como sucede con el ángulo de tono h_{ab} del sistema de color CIELAB (ISO 11564-4). Según CIE R1-47, los ángulos de tono para los tonos elementales en el sistema de color CIELAB son $h_{ab} = 26, 92, 162,$ y 272 grados. En especial, el rojo R_e y el verde G_e no están situados en el eje horizontal en el sistema de color CIELAB.

7 Colores con croma máximo

En una serie de colores obtenidos con distintas cantidades de colorante, yendo desde los colores mas blancos a los colores más negros a través de los colores cromáticos, existe un color en el que percibimos un croma máximo.

Una selección permite escoger el color rojo *más rojo* de esta serie de colores. Esta selección se realiza conforme al criterio de si un color es más acromático o más cromático que los otros, así como de si dicho color es más blanco o más negro que los otros colores de la serie.

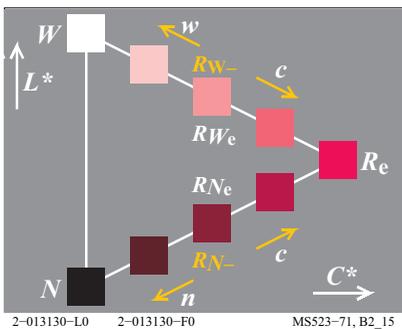


Fig. 16: Croma máximo.

En la Figura 16 se puede determinar fácilmente el color rojo más cromático. Se muestran los criterios para determinar el color de croma máximo, a partir de series de colores obtenidos con diferentes cantidades de material colorante. Los símbolos significan:

- | | | |
|-------------------|-----------------|--------------------|
| R_e rojo | W blanco | N negro (= noir) |
| c más cromático | w más blanco | n más negro |
| C^* croma | L^* claridad. | |

En tecnología de la información, generalmente, para un tono cualquiera, el color más cromático (color de croma máximo C^*_{ab} en el sistema de color CIE-LAB) se mezcla con blanco W y con negro N . Para la mezcla del color más cromático R_c con el blanco W , la diferencia de cromaticidad CIE disminuye continuamente, mientras que para la mezcla de R_c con el negro N la diferencia de cromaticidad se mantiene aproximadamente constante. La mezcla de color aditiva que se produce en un monitor (pantalla) en color, y la frecuente mezcla de color sustractiva que se produce en la impresión offset, serán estudiadas en la sección 20 de la página 72.

En la Figura 16, los colores visualmente intermedios RW_c y RN_c se situarán en el punto medio de los segmentos que unen R_c con W y N , respectivamente. De forma similar a lo que sucedía en la Figura 10 de la página 13, generalmente los colores de salida que se generan tienen un amplio rango de variación que es dependiente del dispositivo (zona de los verdes).

8 Atributos del color: croma y claridad

Perceptivamente, son tres los atributos que permiten especificar un determinado color. La mayoría de los sistemas de color escogen el tono como el primer atributo del color; por ejemplo, así lo hacen los sistemas de color *Munsell*, DIN 6164 y NCS. En cambio estos tres sistemas de color difieren en su elección de los otros dos atributos del color. Para poder comparar los distintos sistemas de color necesitamos un sistema de coordenadas semejante. En colorimetría se usa un corte del sólido de color por un plano de tono constante. En ese plano, situamos en el eje de abscisas el croma C^* y en el de ordenadas la claridad L^* .

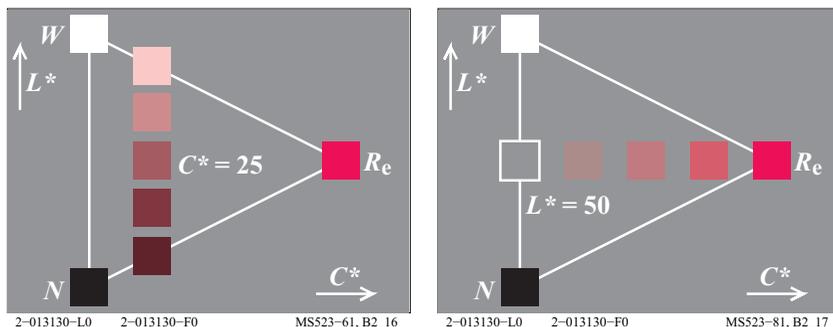


Fig. 17: Igual croma C^* e igual claridad L^* .

La Figura 17 (*izquierda*) muestra colores de tono constante y croma $C^* = 25$. Los colores del mismo croma se sitúan en series verticales paralelas al eje de grises. En colorimetría, para el rojo más cromático R_c , se puede conseguir un

chroma $C^* = 100$. Así, en la Figura 17 (*izquierda*) tenemos una serie de chroma $C^* = 25$.

La Figura 17 (*derecha*) muestra una serie de colores de tono constante y con claridad $L^* = 50$. Los colores con claridad constante se sitúan en filas horizontales perpendiculares al eje de grises. En colorimetría, al blanco W se le asigna una claridad $L^* = 100$. Por tanto, en la Figura 17 (*derecha*) tenemos una serie de colores con claridad $L^* = 50$.

Inicialmente, en el sistema de color *Munsell* se eligieron escalas de color de tono constante, en las que aparecen escalas de chroma constante y de claridad constante. Este sistema incluye muestras de color con 40 tonos diferentes. Actualmente, en colorimetría los espacios de color ISO 11564-4 y -5 definen las coordenadas chroma C^* (designadas como C^*_{ab} en CIELAB y C^*_{uv} en CIE-LUV) y claridad L^* .

En el sistema de ordenación del color *RAL-Design* las muestras de color se distribuyen en 36 tonos CIELAB ($h_{ab} = 0, 10$, hasta 350 grados), en cada uno de los cuales sobre una cuadrícula las diferencias de chroma y claridad son $\Delta C^*_{ab} = 10$ y $\Delta L^* = 10$, respectivamente.

9 Atributos del color: brillantez y blancura

Existen más de los 3 atributos del color ya mencionados: tono, chroma y claridad. En un plano de tono constante, hay una relación lineal del chroma y la claridad con atributos de color adicionales, como son la negrura (blackness), opuesta a brillantez (brilliance), y la blancura (whiteness), opuesta a profundidad de color (colour deepness).

Los atributos de negrura y brillantez describen la misma propiedad. Sin embargo, los valores de estos dos atributos cambian en direcciones opuestas, similarmente a como ocurre entre claridad y oscuridad. Asimismo, la blancura y la profundidad de color también cambian en direcciones opuestas. La negrura (blackness) es un atributo del color importante en el *Sistema de Color Natural* sueco (*NCS*). El sistema de color *NCS* escoge como atributos del color el tono (hue), la negrura (blackness) y el chroma (denominado chromaticness). El atributo claridad del sistema de color *Munsell* no se usa en el *NCS*.

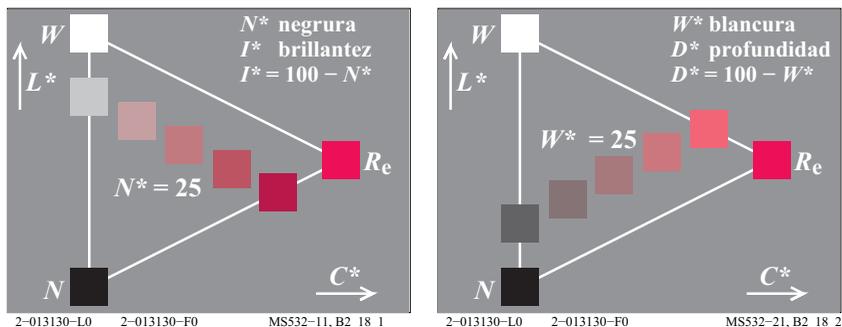


Fig. 18: Igual negrura (blackness) N^* y blancura (whiteness) W^* .

La Figura 18 (*izquierda*) muestra colores con la misma negrura $N^* = 25$, y con la misma blancura (*derecha*) $W^* = 25$. Se puede usar en lugar de la negrura N^* el atributo brillantez $I^* = 100 - N^*$. Análogamente, en lugar de la blancura W^* se puede usar la profundidad de color $D^* = 100 - W^*$.

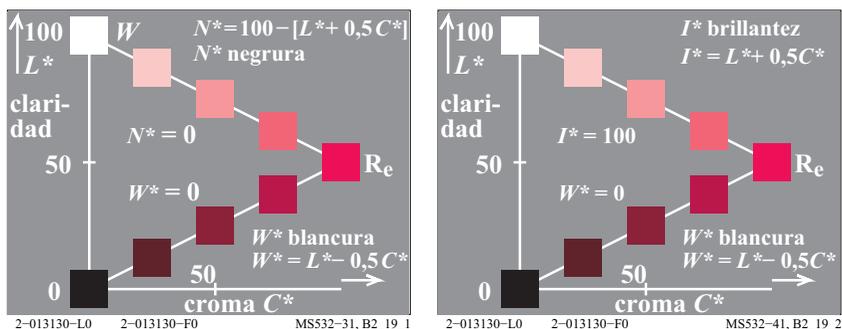


Fig. 19: Negrura (blackness) N^* , blancura (whiteness) W^* y brillantez (brilliance) I^* .

La Figura 19 muestra la relación de los tres atributos del color, negrura N^* , blancura W^* y brillantez I^* , con los dos atributos del color denominados claridad L^* y cromía C^* . La Figura 19 muestra esas relaciones por medio de ecuaciones lineales.

Es de esperar que estas relaciones lineales estén conectadas con las señales fisiológicas acromáticas y cromáticas de la Figura 54, y con los valores cromáticos de la Figura 58 de la página 69 (parte inferior izquierda).

10 Colores del espectro y colores elementales

10.1 Valencia luminosa y claridad

Los colores espectrales de la luz día, que pueden producirse con un prisma, y que fueron estudiados por Newton (fallecido en 1727), incluyen la radiación luminosa comprendida entre las cortas longitudes de onda del violeta-azul (aproximadamente $R60B_e$) y las largas longitudes de onda del rojo-amarillento (aproximadamente $Y90R_e$). Las distintas luces de color difieren entre sí en la distribución de potencia espectral de la radiación que emiten. La distribución espectral de la radiación luminosa que finalmente llegará a nuestros ojos se ve modificada al reflejarse en las superficies de los objetos coloreados (por ejemplo, por el uso de los pigmentos disponibles en la industria química) que observamos.

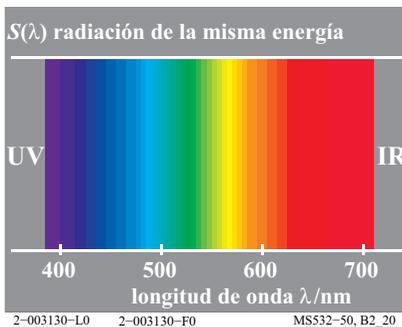


Fig. 20: Región espectral visible.

La Figura 20 muestra esquemáticamente la parte de la radiación luminosa con longitudes de onda λ dentro del espectro visible, que abarca aproximadamente desde $\lambda = 380$ nm a $\lambda = 720$ nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) en el vacío. Las radiaciones más allá de estos límites son denominadas *ultravioleta* (UV) e *infrarrojo* (IR). La Figura 20 nos muestra un espectro que puede ser producido por un filtro interferencial continuo situado en el plano de las diapositivas de un proyector. El filtro interferencial tiene la propiedad de dejar pasar la radiación luminosa visible (i.e. radiación comprendida entre aproximadamente 380 nm y 720 nm en el vacío) de un espectro continuo.

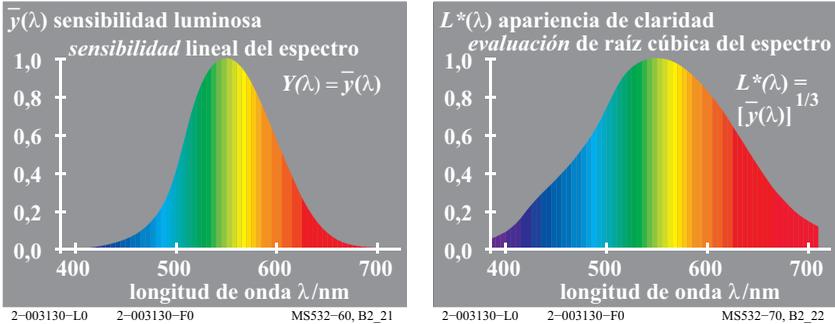


Fig. 21: Sensibilidad luminosa espectral y apariencia de claridad.

En la Figura 21 (*izquierda*) vemos cómo la sensibilidad luminosa $Y(\lambda)$ de las luces del espectro disminuye cuando nos movemos desde la región central amarillo-verde hacia cada uno de los dos extremos del espectro. Esta propiedad es una consecuencia de la forma de la curva de eficiencia luminosa espectral del ojo humano, $Y(\lambda) = V(\lambda) = y_q(\lambda)$. Dicha eficiencia tiene un máximo cerca de los 555 nm, y desde ahí decrece hasta valer menos del 1% alrededor de 400 nm y 700 nm. La función de eficiencia luminosa espectral relativa $y_q(\lambda)$ nos da la valencia (valores o pesos) de los colores espectrales en una mezcla de colores como, por ejemplo, una radiación luminosa equienergética con ancho de banda de 10 nm. Por lo tanto, cada valor de $y_q(\lambda)$ puede denominarse también valor luminoso o valencia luminosa.

En la publicación CIE 15 *Colorimetría* se define el valor triestímulo Y con la normalización $Y_w = 100$ para el blanco de referencia W (véase sección 17 de la página 53).

Distinta de la función *lineal* $Y(\lambda)$ es la función *no lineal* $L^*(\lambda)$, que describe la apariencia de claridad de los colores espectrales de la radiación equienergética. Esta función no lineal disminuye desde el centro del espectro hacia ambos lados, siguiendo aproximadamente una función que es cúbica para fondo gris y cuadrática para fondo blanco (véase sección 16 de la página 48).

La Figura 21 (*derecha*) muestra la apariencia de claridad $L^*(\lambda)$. Comparada con la función $Y(\lambda)$ (*izquierda*), vemos que la función $L^*(\lambda)$ (*derecha*) presenta un decrecimiento más suave.

Nota: La publicación CIE 15 define la relación siguiente entre la claridad L^* y el valor triestímulo Y :

$$L^* = 116 [Y/100]^{1/3} - 16 \quad (Y > 0,8).$$

Aproximaciones a dicha ecuación son las relaciones:

$$L^* = 100 [Y/100]^{1/3} \quad \text{y} \quad L^* = Y^{1/3}$$

que se ha utilizado para los colores espectrales de la Figura 21.

10.2 Valor (valencia) cromático y croma

En las mezclas de color las componentes espectrales se ponderan por sus *valores luminosos* y también por sus *cromáticos valores*.

El espectro visible está formado por una serie continua de tonos, en la que podemos reconocer los tres colores elementales espectrales. Aproximadamente, los colores elementales espectrales se sitúan en 475 nm para el azul elemental B_e , 503 nm para el verde elemental G_e y 574 nm para el amarillo elemental Y_e .

El rojo elemental se sitúa fuera del espectro visible, pudiendo obtenerse, por ejemplo, mediante una mezcla en cantidades apropiadas de los colores con longitudes de onda de 400 nm y 700 nm. Los colores púrpuras que se generan por este procedimiento se especifican mediante sus longitudes de onda complementarias respecto del iluminante E (radiación equienergética). Para el rojo elemental R_e , el resultado es una longitud de onda dominante $\lambda_{d,E} = 494\text{c nm}$ (véase Figura 50 de la página 53).

En ambos extremos del espectro, los valores cromáticos rojo-verde y amarillo-azul cambian el signo de negativo a positivo o al revés.

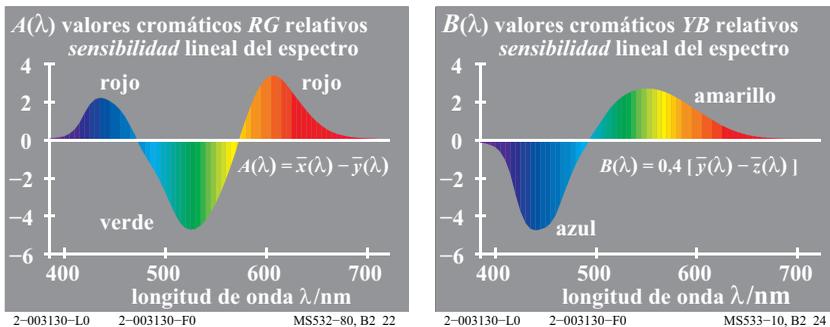


Fig. 22: Valores cromáticos RG y YB.

La Figura 22 (*izquierda*) muestra los valores cromáticos rojo-verde $A(\lambda)$, en función de la longitud de onda, que se corresponden con las valencias (valores o pesos) rojo-verde en una mezcla de color. Los ceros de la función $A(\lambda)$ están próximos a 475 nm y 574 nm, que se corresponden con los colores elementales espectrales, azul B_e y amarillo Y_e , respectivamente.

La Figura 22 (*derecha*) muestra los valores cromáticos amarillo-azul $B(\lambda)$, que son también las valencias (valores o pesos) amarillo-azul en una mezcla de color, en función de la longitud de onda. El cero de la función $B(\lambda)$ está cerca de 503 nm, que especifica el color elemental espectral verde G_e .

Para los colores espectrales de igual energía (equienergéticos), el valor luminoso más los valores cromáticos rojo-verde y amarillo-azul, producen un total de tres números (un vector) para cualquier longitud de onda λ (por ejemplo, con una anchura de banda de 10 nm, comprendida entre 380 nm y 720 nm). En el espacio tridimensional se genera un punto a partir de las coordenadas correspondientes al valor cromático rojo-verde A , el valor cromático amarillo-azul B , y el valor luminoso o valor triestímulo Y , para una longitud de onda cualquiera. En la Figura 23 los puntos correspondientes a todos los colores espectrales están situados sobre una curva tridimensional.

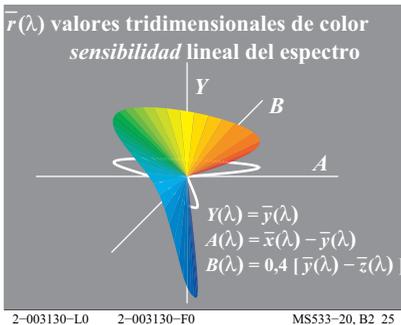


Fig. 23: Valores de color tridimensionales.

La Figura 23 muestra los valores de color tridimensionales, en el espacio de color (A, B, Y) , así como su proyección en el plano (A, B) (línea blanca). La curva tridimensional corta al plano (B, Y) cerca de 475 nm (azul elemental, B_e) y de 574 nm (amarillo elemental, Y_e). También hay un corte con el plano (A, Y) cerca de 503 nm (verde elemental, G_e). En la Figura 23 se indica también la relación lineal existente entre los valores cromáticos y luminoso, $Y(\lambda)$, $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, a partir de los valores triestímulo CIE: $x_q(\lambda)$, $y_q(\lambda)$ y $z_q(\lambda)$.

Hay una diferencia entre el valor cromático (o valencia en una mezcla de colores) y el croma, que es similar a la diferencia existente entre el valor luminoso y la claridad.

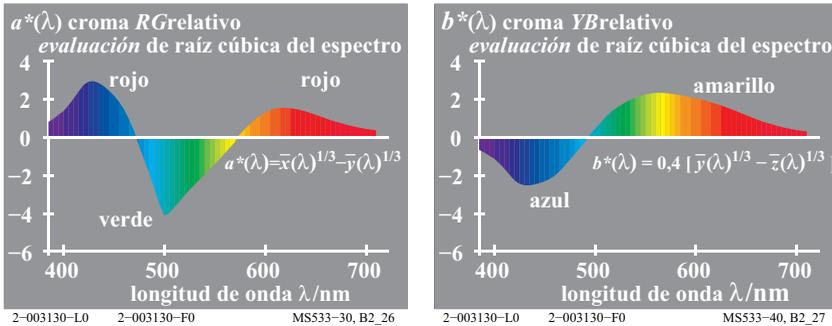


Fig. 24: Cromas RG e YB

La Figura 24 (*izquierda*) muestra el croma rojo-verde $a^*(\lambda)$, que describe la apariencia cromática de los colores espectrales rojizos y verdosos. Los ceros de esta función están cerca de 475 nm y 574 nm, y especifican los colores elementales espectrales azul B_e y amarillo Y_e , respectivamente.

La Figura 24 (*derecha*) muestra el croma amarillo-azul $B(\lambda)$, que describe la apariencia cromática de los colores espectrales amarillentos y azulados. El cero de la función $B(\lambda)$ está cerca de 503 nm, y especifica el color elemental espectral verde, G_e .

Para los colores espectrales de una misma energía (equienergéticos), la claridad, el croma rojo-verde y el croma amarillo-azul, constituyen en total tres números (un vector), para una longitud de onda λ cualquiera (por ejemplo, una luz con ancho de banda de 10 nm, comprendida entre 380 nm y 720 nm). En el espacio tridimensional, para cada longitud de onda se genera un punto a partir de la coordenada cromática rojo-verde a^* , la coordenada cromática amarillo-azul b^* , y la claridad L^* . En la Figura 25 los puntos correspondientes a todos los colores espectrales están situados sobre una curva tridimensional.

Es útil definir el conjunto de términos de color percibido (en alemán *Farbheit*), que incluye los términos claridad, croma rojo-verde, croma amarillo-azul, blancura, negrura, profundidad, y otros atributos visuales del color. En vez del término croma (*chroma*) también se usa el término cromatismo (*chromaticness*); por ejemplo, en el sistema de color *NCS*.

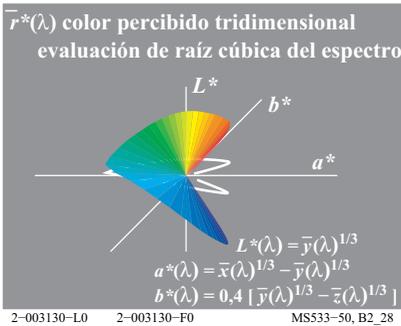


Fig. 25: Color percibido tridimensional.

La Figura 25 muestra los datos de color percibido L^* , a^* , b^* en el espacio de color tridimensional (a^* , b^* , L^*), así como su proyección en el plano (a^* , b^*) (curva blanca). La curva tridimensional corta al plano (b^* , L^*) cerca de 475 nm (azul elemental, B_e) y 574 nm (amarillo elemental, Y_e). También corta al plano (a^* , L^*) cerca de 503 nm (verde elemental, G_e).

En la Figura 25, la proyección de la curva tridimensional sobre el plano (a^* , b^*) viene indicada por una curva blanca. En la Figura 25 se incluye también la relación no lineal que da los valores espectrales de claridad yromaticidad $L^*(\lambda)$, $a^*(\lambda)$ y $b^*(\lambda)$, a partir de los valores triestímulo espectrales $x_q(\lambda)$, $y_q(\lambda)$ y $z_q(\lambda)$.

11 Aparato para mezclar colores espectrales y reflexión

Mediante un espectrofotómetro se puede medir, en cada longitud de onda, la parte de radiación reflejada correspondiente a la radiación incidente sobre una superficie. Por comparación de la luz reflejada por una superficie de color con la luz reflejada por una superficie blanca estándar, se obtiene normalmente una curva de reflexión espectral cuyos valores numéricos están comprendidos entre 0,0 y 1,0 para cada longitud de onda.

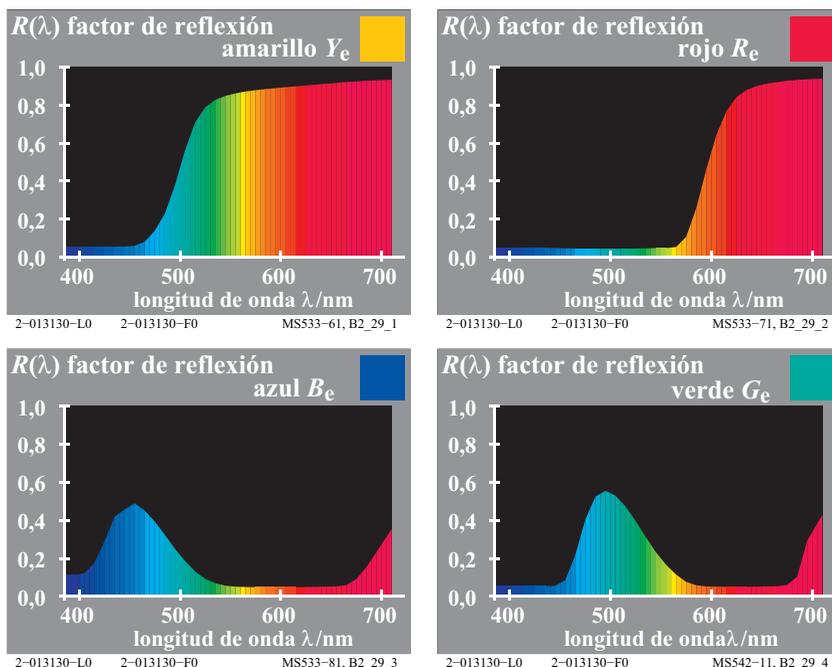


Fig. 26: Factores de reflectancia espectral de los cuatro colores elementales $RYGB_e$.

La Figura 26 muestra los factores de reflectancia espectral que se transfieren a las máscaras como los factores de transmisión correspondientes. Mediante un aparato para mezclar colores espectrales se pueden generar ópticamente los colores elementales $RYGB_e$.

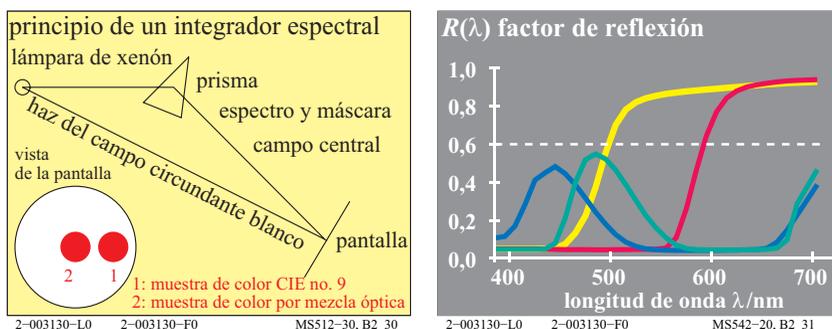


Fig. 27: Aparato para mezclar colores espectrales y factores de reflexión de las máscaras.

La Figura 27 (*izquierda*) muestra el esquema de un aparato para mezclar colores espectrales. A partir de una lámpara de arco de xenón blanca, se generan dos haces luminosos diferentes.

Uno de los haces genera sobre la pantalla de proyección un campo circundante circular blanco.

El otro haz de luz blanca se descompone mediante un prisma, produciéndose un espectro. Las luces de dicho espectro se mezclan ópticamente produciéndose un campo circular y central blanco. En la pantalla de proyección, la luz blanca de este campo central y la del campo circundante son iguales.

Con la ayuda de máscaras situadas en la posición del espectro, se pueden cancelar total o parcialmente algunos de los colores espectrales. Los colores espectrales restantes se mezclan ópticamente. Distintas máscaras generan diferentes colores en el campo central; por ejemplo, el color de prueba CIE número 9 (rojo elemental R_e , según CIE R1-47).

La Figura 27 (*derecha*) muestra las máscaras para obtener los colores elementales $RYGB_e$. Estas máscaras son producidas conforme a los factores de reflexión espectral $R(\lambda)$ de los colores de prueba CIE números 9 (rojo, R_e), 10 (amarillo, Y_e), 11 (verde, G_e) y 12 (azul B_e). Según la publicación CIE 13.3, éstos y otros colores de prueba CIE se utilizan para la especificación de las propiedades de rendimiento de color de las fuentes de luz. Además, la Figura 27 (*derecha*) muestra un factor de reflexión constante $R(\lambda) = 0,6$ correspondiente a un color gris claro (línea discontinua).

12 Fluorescencia

En la fluorescencia se absorben longitudes de onda cortas y se transforman en radiaciones de mayor longitud de onda. Los blanqueadores ópticos utilizan este fenómeno. Mediante los blanqueadores ópticos la ropa y el papel nos parecen más blancos y también las pinturas nos parecen más luminosas. El color rojo luminoso se usa como símbolo de advertencia o peligro. Las pinturas luminosas o con colores fluorescentes permiten obtener una extensión de la gama usual de colores, producida por superficies coloreadas no-fluorescentes.

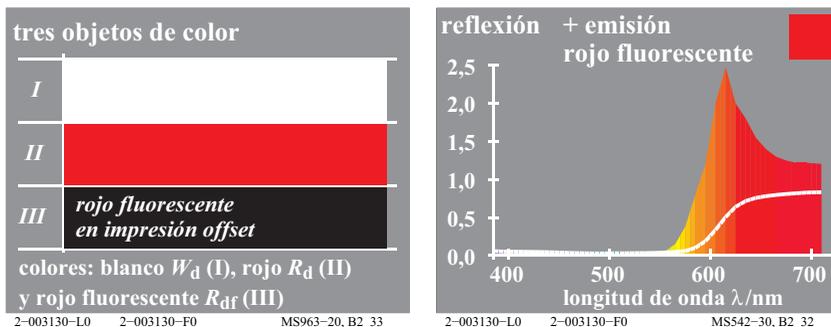


Fig. 28: Objetos de color y factores de reflexión y emisión correspondientes a un color fluorescente.

La Figura 28 (*izquierda*) nos muestra tres objetos de color, blanco W_d (I), rojo R_d (II) y rojo fluorescente R_{df} (III), mientras que en la Figura 28 (*derecha*) tenemos las curvas de reflexión y emisión del color fluorescente rojo, R_{df} . Los colores fluorescentes reflejan más luz en las longitudes de onda largas (de apariencia roja) que la producida por reflexión difusa en una superficie roja convencional. En la Figura 28 (*derecha*) vemos que, para el color fluorescente rojo, la suma de la luz emitida y reflejada difusamente es superior a 1,0 en la zona de las largas longitudes de onda. Este objeto de color nos parece un rojo especialmente luminoso. Por lo tanto, llamamos a este tipo de color un color luminoso.

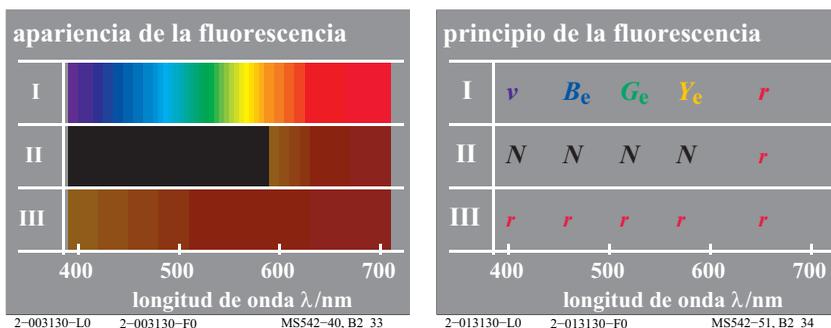


Fig. 29: Apariciencia espectral y principio de la fluorescencia.

La Figura 29 muestra la apariencia (*izquierda*) y el principio de la fluorescencia (*derecha*). Observamos que el espectro es muy diferente (*izquierda*) sobre una superficie blanca (I), una superficie roja corriente (II) y una superficie roja fluorescente (III).

El cambio de apariencia de color del espectro se puede observar en el color de las distintas áreas. Se genera un espectro con un filtro interferencial continuo. Dicho espectro se proyecta sobre las tres áreas de distinto color, I a III:

- El espectro sobre la superficie blanca (I) nos aparece como la serie de color usual, que va cambiando desde el violeta-azul v , azul B_e , verde G_e , amarillo Y_e , hasta llegar al rojo r (*izquierda*). Esto se indica por medio de letras acordes con los colores en la Figura 29 (*derecha*).
- El espectro sobre la superficie roja (II) nos aparece oscuro en la zona que va desde el violeta-azul v hasta el amarillo Y_e , pero refleja en la región de los rojos de modo semejante a como lo hace la superficie blanca (*izquierda*). La letra N (=negro) indica absorción en la zona que va del violeta-azul v hasta el amarillo Y_e , mientras que la letra r indica reflexión en la Figura 29 (*derecha*).
- El espectro en la superficie roja fluorescente (III) aparece rojo r en todo el rango espectral que va desde el violeta-azul v hasta el rojo r (*izquierda*). En la Figura 29 (*derecha*), la letra r en todo el espectro indica esta propiedad de la luz reflejada.

13 Retroreflexión

Los materiales retroreflejantes parece que tienen colores especialmente cromáticos y luminosos, bajo determinadas condiciones de iluminación y observación. En ellos el color es generado por la fuente de luz, una superficie de material acromático (con apariencia blanca) con especiales propiedades geométricas de reflexión y una capa de color transparente que actúa a modo de filtro de color. Este filtro de color tiene diferentes factores de transmisión según su coloración.

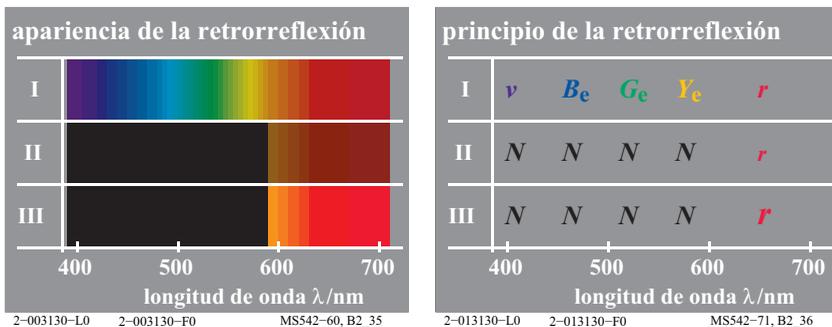


Fig. 30: Apariencia espectral y principio de la retroreflexión.

La Figura 30 muestra la apariencia (*izquierda*) y el principio de la retrorreflexión (*derecha*). Observamos que el espectro es muy diferente (*izquierda*) sobre una superficie blanca (I), una superficies roja corriente (II) y una superficie roja retrorreflejante (III).

El cambio de apariencia de color del espectro se puede observar en las distintas áreas coloreadas. Se genera un espectro con un filtro interferencial continuo. Dicho espectro se proyecta sobre las tres áreas de distinto color, I a III:

- El espectro sobre la superficie blanca (I) y sobre la superficie roja convencional (II) se ha descrito ya en la Figura 29.
- El espectro sobre la superficie de material retrorreflectante (III) aparece oscuro en toda la zona que va desde el violeta-azul v hasta el amarillo Y_e , y, en la zona de los rojos, se refleja más luz que la que se refleja en la superficie blanca (*izquierda*). La letra N (=negro) indica absorción en la zona que va desde el violeta-azul v hasta el amarillo Y_e , mientras que la letra r de tamaño más grande indica un aumento de la luz reflejada en la zona de los rojos (*derecha*). Esta luz reflejada alcanza un máximo cuando la dirección de iluminación y observación son idénticas.

14 Mezcla de color

14.1 Mezcla de color aditiva dicromática

Miescher ha llamado a la mezcla aditiva de dos colores mezcla de color *dicromática*. Análogamente, a la mezcla aditiva de tres colores se le puede llamar mezcla de color *tricromática*. Según *Miescher* (1961, 1965), la mezcla de dos colores compensatorios, que puede dar como resultado un color acromático, se denomina mezcla de color *anticromática*.

Los colores correspondientes a una distribución espectral cualquiera pueden generarse mediante mezcla aditiva, usando un aparato para mezcla aditiva de colores como el que se mostró en la Figura 27 de la página 28. Incluso es posible obtener como los llamados *colores óptimos*, que representan los límites posibles para objetos de color. Entre los colores óptimos, los colores *más cromáticos* como, por ejemplo, el más rojo de todos los posibles rojos, son de gran importancia en tecnología de la imagen (véase sección 19 de la página 69).

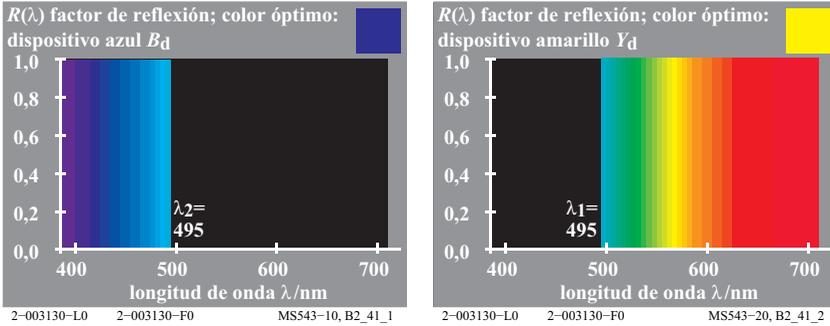


Fig. 31: Colores óptimos B_d e Y_d para mezcla aditiva dicromática.

La Figura 31 muestra la mezcla dicromática que produce el blanco. El blanco W se produce mediante la mezcla aditiva de cualquier par de colores óptimos compensatorios (o complementarios) como, por ejemplo, el azul B_d y el amarillo Y_d . En los procesos de reproducción del color y en lo que sigue, se usa generalmente un amarillo verdoso, que llamamos amarillo de dispositivo Y_d (Y = amarillo, d = dispositivo), y un azul rojizo B_d .

En la Figura 31 (*izquierda*), la curva de reflexión del color azul óptimo B_d presenta una transición brusca entre los valores 1,0 y 0,0 en la longitud de onda de 490 nm. Concretamente, la curva de reflexión tiene el valor 1,0 entre 380 nm y 490 nm, y el valor 0,0 entre 490 nm y 720 nm.

En la Figura 31 (*derecha*) se observa que la curva de reflexión para el color amarillo óptimo Y_d tiene el valor 0,0 entre 380 nm y 490 nm, con una subida brusca en 490 nm. Entre 490 nm y 720 nm el valor de la curva es 1,0.

La mezcla aditiva de ambos colores óptimos B_d e Y_d da como resultado un color acromático, con una curva de reflectancia espectral $R(\lambda)$ de valor 1,0 en todo el espectro, que nos aparece como blanco.

En la Figura 31 tenemos dos colores de dispositivo, amarillo Y_d y azul B_d , que son diferentes de los colores elementales, amarillo Y_e y azul B_e .

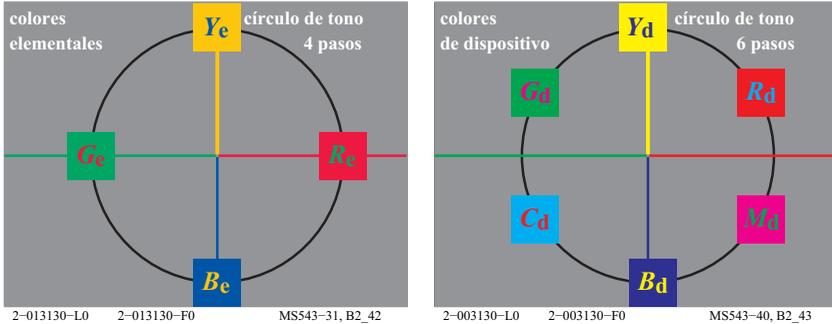


Fig. 32: Los cuatro colores elementales $RYGB_e$ y los seis colores de dispositivo $RYGCBM_d$.

La Figura 32 (*izquierda*) muestra los cuatro colores elementales, rojo R_e , amarillo Y_e , verde G_e , y azul B_e , sobre un círculo de colores elementales simétricos.

La Figura 32 (*derecha*) muestra los seis colores cromáticos $RYGCBM_d$ sobre un círculo de tonos de 6 pasos, que sirve de base para la reproducción en color. Según su localización en el círculo simétrico de tono, el amarillo Y_d es ligeramente verdoso en comparación con el amarillo elemental Y_e , y el azul B_d es rojizo en comparación con el azul elemental B_e .

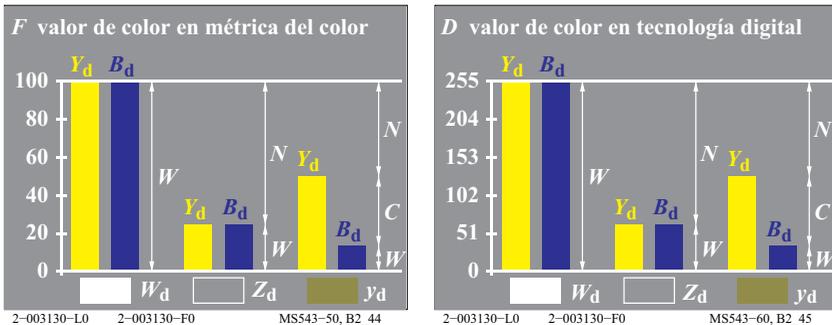


Fig. 33: Valor de color dicromático en colorimetría y tecnología digital.

La Figura 33 muestra el valor de color F de la colorimetría (*izquierda*), y el valor de color D de la tecnología digital (*derecha*). En colorimetría se usan 100 pasos, mientras que en la tecnología digital se usan 255 pasos.

La Figura 33 muestra (abajo derecha) el color resultante de la mezcla de un color dominante amarillo Y_d y su color azul compensatorio B_d : un blanco W_d , un gris intermedio Z_d , y un color amarillo y_d .

Si utilizamos el 100% tanto del color dominante Y_d como del color compensatorio B_d , entonces la mezcla dicromática es el color blanco W_d , que tiene un factor de reflectancia espectral igual a 1,0 a lo largo de todo el espectro. En la parte izquierda de la Figura 33 tenemos: valor blanco $W = 100$, valor negro $N = 0$ y valor cromático $C = 0$. El color resultante de la mezcla es W_d (abajo, izquierda).

Si utilizamos sólo un 25% tanto del color dominante Y_d como del color azul compensatorio B_d , entonces la mezcla dicromática es un color gris intermedio Z_d . En el aparato para mezclas espectrales las máscaras pueden tener sólo dos saltos entre 0,0 y 0,25. Para el gris intermedio Z_d , en la parte central de la Figura 33 tenemos: valor blanco $W = 25$, valor negro $N = 75$ y valor cromático $C = 0$.

Si la cantidad del color dominante Y_d es más grande que la del color azul compensatorio B_d , entonces se produce un color cromático con el tono correspondiente al color dominante. En la parte derecha de la Figura 33 tenemos: valor blanco $W = B_d = 15$, valor negro $N = 100 - Y_d = 50$ y valor cromático $C = Y_d - B_d = 35$.

La tecnología de la imagen permite la reproducción de series de color equiespaciadas para cada uno de los atributos del color. Por ejemplo, una serie equiespaciada en claridad, en la que $\Delta L^* = \text{constante}$, puede generarse sobre un fondo blanco considerando la raíz cuadrada de los valores de color. Por ejemplo, con valores del valor triestímulo Y de la CIE tales como $Y = 1, 4, 9, 16, \dots, 81, 100$, se producen una serie de estímulos equiespaciados en claridad: $L^* = 10, 20, 30, \dots, 90, 100$.

Las coordenadas de los atributos de color son el color percibido F^* en colorimetría, o el color percibido D^* en tecnología digital. El término grupal *color percibido* incluye los atributos de color: claridad, negrura, blancura, profundidad, etc. El término grupal *valores de color* incluye el valor blanco, valor negro, valor cromático, etc. A menudo hay una relación no lineal (raíz cuadrada) entre ambos grupos de términos; por ejemplo, entre la claridad L^* y el valor triestímulo Y de una muestra situada sobre un fondo blanco (papel blanco o pantalla en blanco).

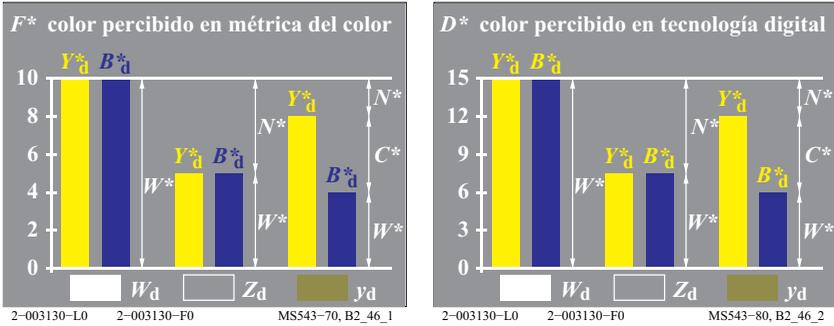


Fig. 34: Color percibido en colorimetría y tecnología digital.

La Figura 34 (*izquierda*) muestra el color percibido $F^* = Y^*_d$ o B^*_d usado en colorimetría, con valores entre 0 y 10 (*izquierda*). En el sistema de color *Munsell* se emplean 10 pasos. La Figura 34 (*derecha*) muestra el color percibido D^* usado en tecnología digital, con valores comprendidos entre 0 y 15. El estándar Europeo *CEPT* para Videotexto (*Btx*) usa 15 pasos.

14.2 Mezcla de color aditiva tricromática

Se puede generar el blanco W_d por mezcla aditiva de tres colores óptimos: rojo R_d (o rojo-anaranjado, *O*), verde G_d (o verde hoja, *L*) y azul B_d (o azul-violáceo, *V*). *Miescher* llamó a esta mezcla de los tres colores básicos una mezcla tricromática.

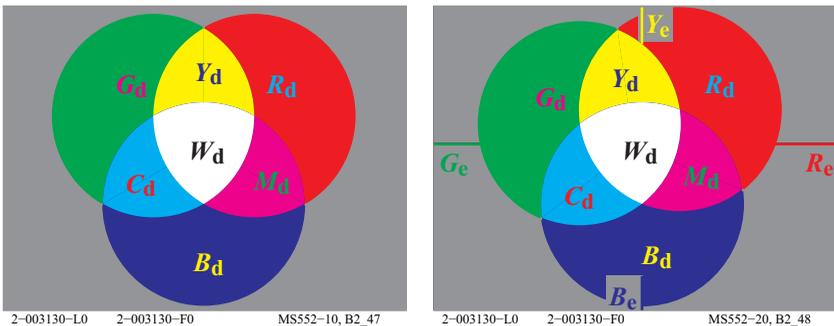


Fig. 35: Mezcla de color aditiva tricromática y localización de los colores elementales.

La Figura 35 (*izquierda*) muestra la mezcla aditiva de color de los tres colores básicos: rojo R_d (o rojo-anaranjado, *O*), verde G_d (o verde hoja, *L*) y azul B_d (o

azul-violáceo, V). Hay también en la Figura 35 tres mezclas aditivas dicromáticas, que producen los colores: amarillo Y_d , azul-cian C_d , y magenta-rojo M_d . El blanco W_d es el color resultante de la mezcla tricromática de los tres colores básicos.

La Figura 35 (*derecha*) muestra la localización de los colores básicos aditivos, de las mezclas dicromáticas de color que producen CMY_d , y del color resultante de la mezcla tricromática W_d , en relación con las posiciones de los cuatro colores elementales $RYGB_e$. Es necesario considerar la diferencia existente entre R_d y R_e , y entre G_d y G_e .

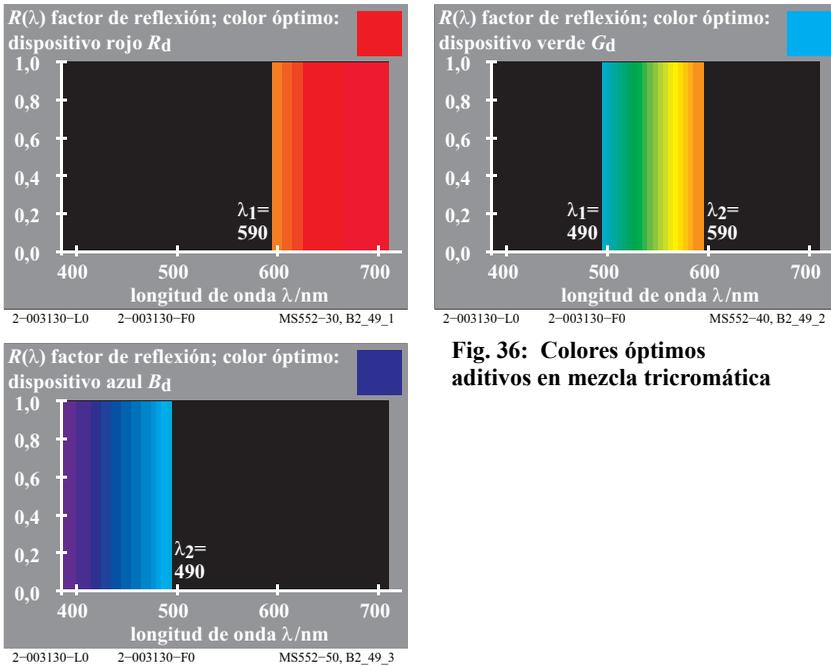


Fig. 36: Colores óptimos aditivos en mezcla tricromática

La Figura 36 muestra los tres colores óptimos, rojo R_d , verde G_d y azul B_d , que al mezclarse aditivamente producen el blanco. Es también importante la mezcla aditiva con diferentes valores (cantidades) de los tres colores básicos, rojo R_d , verde G_d y azul B_d .

En la Figura 37, los tres valores de color de los colores de dispositivo, rojo R_d , verde G_d , y azul B_d , están ordenados según sus valores; en este ejemplo, $R_d > G_d > B_d$.

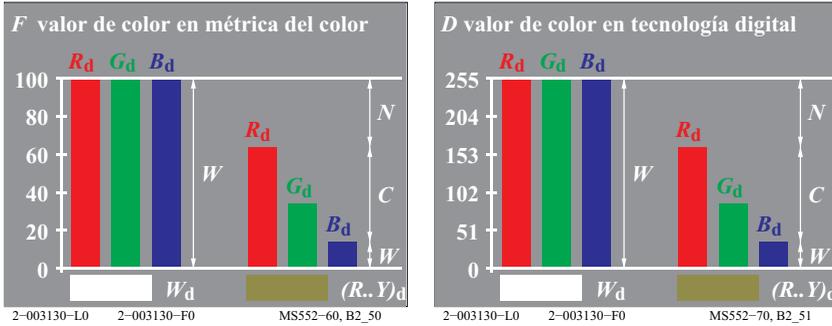


Fig. 37: Valores tricromáticos de color RGB_d en colorimetría y en tecnología digital.

La Figura 37 muestra los valores de color $F = R_d, G_d, \text{ y } B_d$, comprendidos entre 0 y 100 en colorimetría (*izquierda*), y los valores de color $F = R_d, G_d, \text{ y } B_d$, comprendidos entre 0 y 255 en tecnología digital (*derecha*).

Se muestra también la relación de los colores con el valor negro N , el valor blanco W y el valor cromático C .

Atributos del color en métricas de color baja y alta	Tipo de mezcla de color	
	dicromática	tricromática
<i>métrica de color baja o de valencia</i>	(para $Y_d \geq B_d$)	(para $R_d \geq G_d \geq B_d$)
valor blanco W	B_d	B_d
valor negro N	$100 - Y_d$	$100 - R_d$
valor cromático C	$Y_d - B_d$	$R_d - B_d$
<i>métrica de color alta o de sensaciones</i>	(para $Y^*_d \geq B^*_d$)	(para $R^*_d \geq G^*_d \geq B^*_d$)
blancura W^*	B^*_d	B^*_d
negrura N^*	$100 - Y^*_d$	$100 - R^*_d$
cromaticidad C^*	$Y^*_d - B^*_d$	$R^*_d - B^*_d$

Tabla 2: Modo de mezcla de color, valor de color y color percibido en colorimetría.

La Tabla 2 muestra los dos modos de mezcla de color. Se indica la relación existente entre los atributos de color y los valores de color Y_d y B_d en la mezcla dicromática de color, y los valores de color $R_d, G_d, \text{ y } B_d$ en la mezcla tricromática de color.

Para los atributos de color de la métrica de color alta se usa el grupo de términos asociados al *color percibido* (o sea, blancura, negrura y croma). En la Tabla 2, el *color percibido* se especifica por el símbolo * (estrella); por ejemplo, para la blancura $W^* = B^*_d$.

Las abreviaturas de la Figura 33 de la página 34, de la Figura 37 de la página 38 y de la Tabla 2 tienen el siguiente significado:

En la Figura 33 de la página 34 con $Y_d \geq B_d$:

Y_d color dominante B_d color compensatorio
 W blanco Z gris intermedio y_d amarillo claro

En la Figura 37 de la página 38 con $R_d \geq G_d \geq B_d$:

R_d rojo G_d verde
 B_d azul $(Y..R)_d$ amarillo-rojo

En la Tabla 2 hay una relación sencilla entre los valores de color del color dominante amarillo Y_d y el color compensatorio azul B_d , o los tres colores básicos rojo R_d , verde G_d , y azul B_d , con respecto a los atributos de color: el valor blanco relativo w , valor negro relativo n , y el valor cromático relativo c de *Ostwald*.

En la Figura 33 de la página 34, y en la Figura 37 de la página 38 se cumple:

valor blanco relativo $w = \text{valor blanco}/100 = W/100$
 valor negro relativo $n = \text{valor negro}/100 = N/100$
 valor cromático relativo $c = \text{valor cromático}/100 = C/100$

Los tres valores de color RGB_d de la colorimetría, o los correspondientes de la tecnología digital, pueden utilizarse para calcular el valor blanco W , el valor negro N , y el valor cromático C . Sobre la base de la relación no lineal existente entre valor de color y color percibido, tenemos que los cocientes valor blanco / valor negro y blancura / negrura son diferentes.

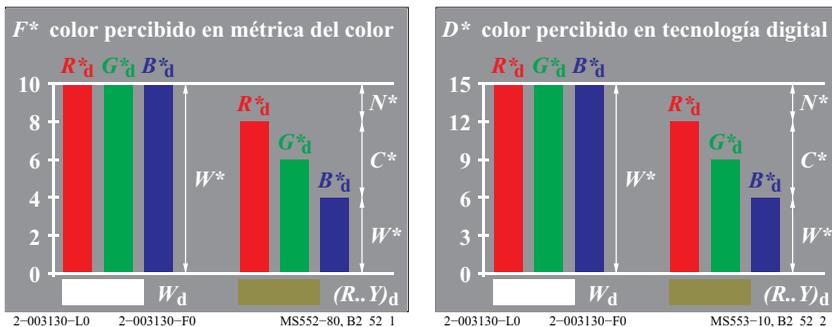


Fig. 38: Color percibido RGB_d^* en colorimetría y tecnología digital.

La Figura 38 muestra que los colores percibidos R_d^* , G_d^* o B_d^* varían entre 0 y 10 en colorimetría (*izquierda*) y entre 0 y 15 en tecnología digital (*derecha*). Se

da también la relación de los colores con la negrura N^* , la blancura W^* y el croma C^* .

Nota: En el sistema CIELAB la claridad L^* y el croma C^*_{ab} varían entre 0 y 100, en lugar de entre 0 y 10, como ocurre, por ejemplo, en el sistema de color *Munsell*.

La aplicación más conocida de mezcla aditiva del color es la televisión en color o la pantalla en color de un ordenador. Aquí la salida de pantalla es la mezcla de tramas de muchos puntos de color rojo R_d , verde G_d y azul B_d . La luminancia de estos puntos cambia por medio de las señales de televisión o el software de imagen del ordenador. En un monitor estándar de televisión hay por lo menos 1,2 millones de puntos luminosos. Los puntos son pequeños y no pueden distinguirse a una distancia de observación de unos 3 m, bajo condiciones normales de observación. En la pantalla se genera una trama de mezclas aditivas de color.

14.3 Mezcla de color sustractiva tricromática

La introducción de tres filtros de color apropiados en la trayectoria de un único haz de luz blanca genera un color negro (sobre fondo blanco), cuando se absorbe aproximadamente toda la luz del haz. Al contrario de la mezcla aditiva de color descrita anteriormente, en la mezcla sustractiva los filtros se ponen uno sobre el otro en la trayectoria de un único haz de luz.

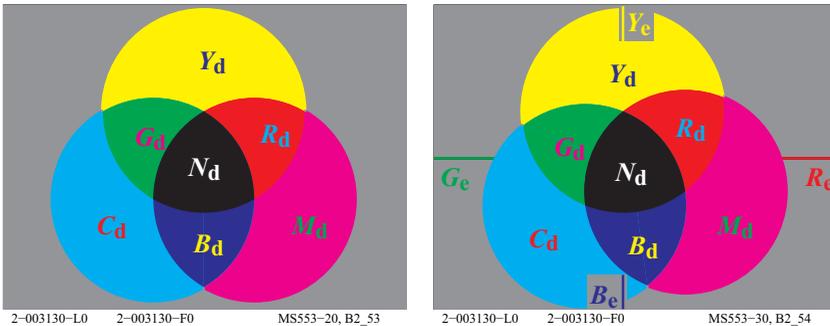


Fig. 39: Mezcla de color sustractiva tricromática y localización de los colores elementales.

La Figura 39 (*izquierda*) muestra la mezcla sustractiva de color con los tres colores básicos: cian-azul C_d , magenta-rojo M_d y amarillo Y_d . Las tres mezclas sustractivas dicromáticas producen los colores rojo R_d , verde G_d y azul B_d . El negro es el color resultante de la mezcla sustractiva tricromática de los tres colores básicos. En las técnicas de mezcla sustractiva de color es conveniente usar tres filtros especiales, con curvas de transmisión espectral similares a las

de los colores amarillo óptimo Y_d , cian-azul C_d y magenta-rojo M_d (véase Figura 40).

La Figura 39 (*derecha*) muestra la localización de los colores básicos sustractivos CMY_d , de los colores resultantes de las mezclas sustractivas dicromáticas RGB_d , y del color generado por la mezcla tricromática N_d . También se muestra a título de comparación la localización relativa de los cuatro colores elementales $RYGB_e$. Hay una diferencia importante entre R_e y R_d o M_d . En el campo de la impresión M_d es denominado a menudo rojo en vez de magenta-rojo. Además hay también diferencia entre B_e y B_d o C_d , que a menudo se designa como azul en vez de cian-azul en el campo de la impresión.

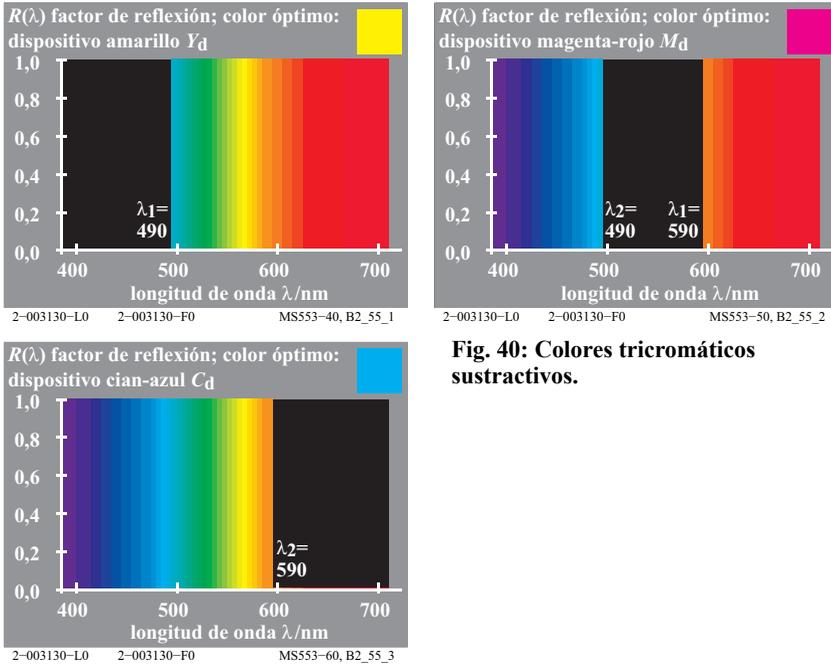


Fig. 40: Colores tricromáticos sustractivos.

La Figura 40 muestra los factores de reflexión espectral $R(\lambda)$ (o factores de transmisión $T(\lambda)$ de los filtros) apropiados para la mezcla sustractiva de color: El color amarillo óptimo Y_d , que tiene $R(\lambda) = 1$ a partir de la longitud de onda de 490 nm, el color magenta-rojo óptimo M_d , que tiene $R(\lambda) = 1$ hasta la longitud de onda de 490 nm y también a partir de 590 nm, y el color óptimo cian-azul C_d , que tiene $R(\lambda) = 1$ hasta la longitud de onda de 590 nm.

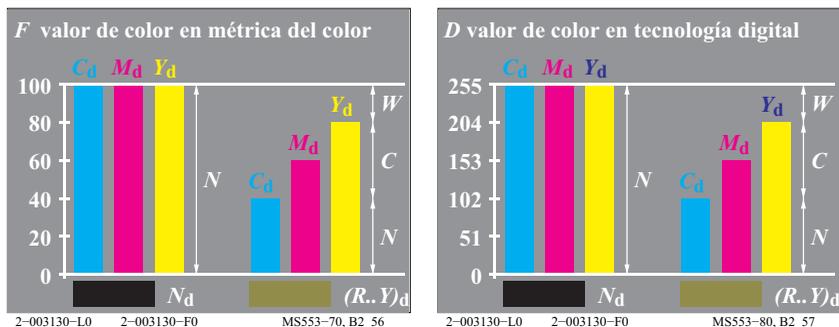


Fig. 41: Valores de color CMY_d en colorimetría y tecnología digital.

La Figura 41 muestra los valores de color F en colorimetría (*izquierda*), y los valores de color D en tecnología digital (*derecha*) para una mezcla sustractiva de color tricromática.

Se muestra también la especificación de los colores mezcla, sobre la base de los tres colores estándar en impresión: cian-azul C_d , magenta-rojo M_d , y amarillo Y_d . Si el valor de color del amarillo Y_d es dominante en comparación con los valores del magenta-rojo M_d y del cian-azul C_d , entonces la mezcla sustractiva de Y_d y M_d produce, en primer lugar, el rojo R_d . Pero como consecuencia del valor mas grande del amarillo Y_d , en realidad el tono de la mezcla es un color rojo amarillento $(R..Y)_d$.

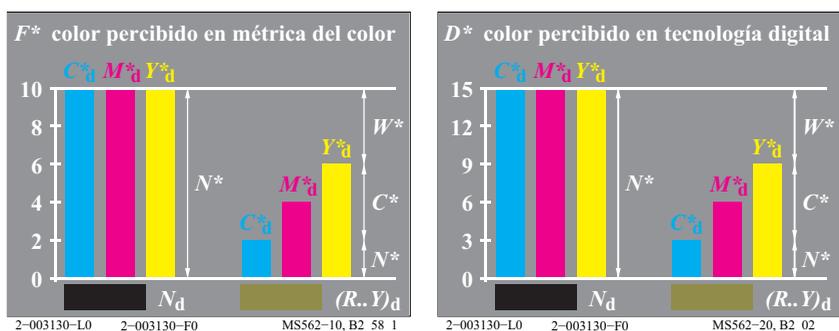


Fig. 42: Color percibido $CMY*_d$ en colorimetría y en tecnología digital.

La Figura 42 muestra el color percibido F^* en colorimetría, y el color percibido D^* en tecnología digital, para una mezcla de color sustractiva y tricromática.

La aplicación técnica más conocida de la mezcla sustractiva de color es la fotografía en color. En una película fotográfica en color de reversión (película para diapositiva), hay tres filtros dispuestos como capas sucesivas, con colores cian-azul C_d , magenta-rojo M_d , y amarillo Y_d . Los factores de transmisión de esos filtros o capas se controlan mediante el tiempo de exposición y el proceso de revelado.

En realidad en la impresión multicolor estándar están involucradas tanto la mezcla de color sustractiva como la aditiva, de modo que este tipo de mezcla de color se llama mezcla de color auto-típica. La mezcla es aditiva cuando los dos colores impresos están uno al lado del otro, y sustractiva si las dos tintas transparentes están impresas una sobre la otra.

15 Radiación espectral

Radiaciones luminosas con distintas distribuciones espectrales pueden generar colores con una misma apariencia. En la colorimetría moderna se pueden calcular colores metámeros mediante procedimientos numéricos especiales, teniendo en cuenta la iluminancia.

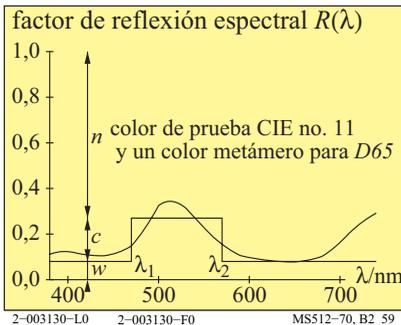


Fig. 43: Factores de reflexión de dos colores metámeros

La Figura 43 muestra la reflectancia espectral del color de prueba CIE número 11 (verde) según la publicación CIE 13.3, y la de un color metámero para la luz-día D65 estándar de la CIE, que presenta una reflectancia espectral rectangular. Generalmente se procura evitar el uso de colores metámeros en las distintas partes de un mismo producto industrial, ya que dichos colores sólo serían idénticos bajo un determinado iluminante. Al cambiar el iluminante, por ejemplo, de luz-día a luz incandescente, aparecen *diferencias de color*, de modo que los colores metámeros ya no son iguales entre sí.

La Figura 43 incluye el valor negro relativo n , el valor cromático relativo c , y el valor blanco relativo w , cumpliéndose la ecuación de *Ostwald*: $n + c + w = 1$.

Las dos longitudes de onda compensatorias límite, $\lambda_1=480$ nm y $\lambda_2=580$ nm para D65, corresponden a un color óptimo con un tono elemental verde, G_e . Este color óptimo tiene el máximo valor cromático C_{AB} , y crea un *color mitad*, según *Ostwald*.

Para $n=0,73$ y $w=0,08$ los correspondientes valores de color lineal rgb_e son:

$$rgb_e = (w, (1-n), w) = (0,08, 0,27, 0,08).$$

Los correspondientes valores de color no lineales (visuales) rgb^*_e serían (suponiendo la relación tipo raíz cuadrada bajo fondo blanco):

$$rgb^*_e = (w^{1/2}, (1-n)^{1/2}, w^{1/2}) = (0,28, 0,52, 0,28).$$

Para la reproducción del color de prueba CIE número 11 en una impresora de color o en una pantalla en color, se deben de calcular los valores de color rgb_{de} (de = dispositivo a tono elemental), pudiendo obtenerse aproximadamente los valores siguientes:

$$rgb_{de} = (w, (1-n), w+0,20w) = (0,08, 0,27, 0,10).$$

Según la Figura 10 de la página 13, para generar el color elemental verde G_e , el valor de b se incrementa en un 20% (=3/F%=3/15%) pasando de 0,08 a 0,10.

Para esta salida de impresión, todos los cálculos aquí mostrados son realizados por software automáticamente. El software usa los datos de medida de 729 (=9x9x9) colores del dispositivo de salida para la conducción de la salida.

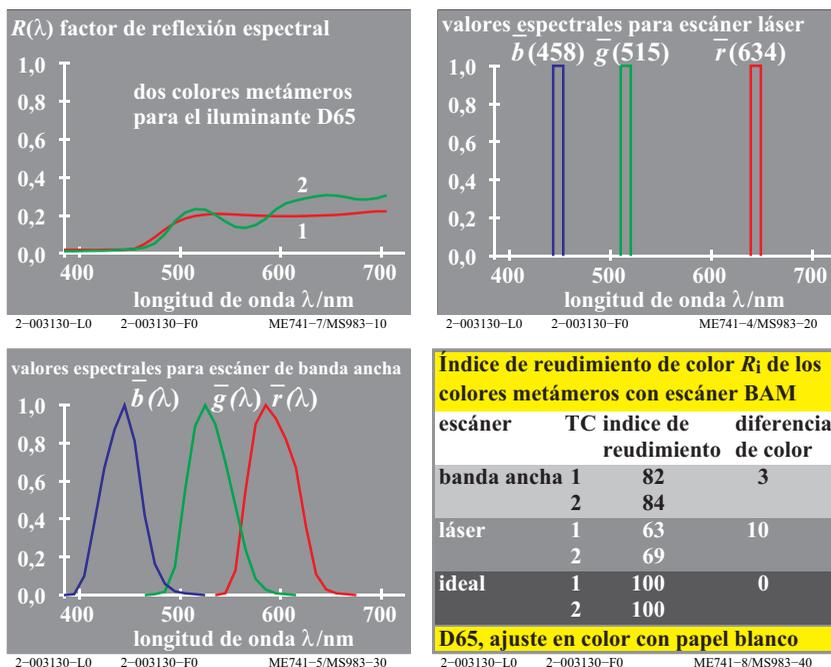


Fig. 44: Dos colores de prueba metámeros, valores de escáner y rendimiento de color.

La Figura 44 (izquierda arriba) muestra dos colores de prueba metámeros, que se han escaneado con un escáner láser y con un escáner de banda ancha. Generalmente los valores del escáner están normalizados a $r=g=b=1$ para el papel blanco.

Dependiendo del tipo de escáner, los dos colores número 1 y 2 de la Figura 44 (izquierda arriba) producen generalmente dos conjuntos de datos rgb diferentes. Sin embargo, bajo el iluminante CIE D65, los dos colores parecen iguales, y tienen los mismos valores triestímulo CIE-XYZ.

Generalmente los valores rgb del escáner se interpretan en el espacio de color *sRGB* según IEC 61966-2-1, y son transformados a datos CIE-XYZ y a diferencias de color ΔE^* . Para un escáner ideal, que tuviera las sensibilidades de ancho de banda correspondientes a los valores triestímulo de la CIE, los valores rgb serían iguales. Los máximos y mínimos de las curvas espectrales, y las auténticas sensibilidades espectrales de cada tipo de escáner (por ejemplo, un escáner láser o uno de amplio ancho de banda), determinan las diferencias de los valo-

res *rgb* del escáner. En la Figura 44 (derecha abajo) las diferencias de color ΔE^* oscilan entre 0 y 10.

En el caso ideal, el índice de rendimiento en color R_i conforme a la publicación CIE 13.3 tiene un valor de 100. Dicho índice disminuye según la fórmula: $R_i = 100 - 4,6 \Delta E^*$. Por ejemplo, $R_i = 86 (= 100 - 3 \cdot 4,6)$ para la diferencia de color $\Delta E^* = 3$ de la Figura 44 (derecha abajo).

En impresión offset y con impresoras de color, los colores acromáticos se pueden imprimir sólo con el color acromático negro N_d , o sólo con los tres colores cromáticos (cian-azul C_d , magenta-rojo M_d , y amarillo Y_d), especialmente en imágenes. Los colores acromáticos impresos con tinta negra N_d tienen aproximadamente una curva de reflectancia constante. Los colores acromáticos impresos con CMY_d , tienen generalmente hasta tres máximos y mínimos (véase Figura 44, izquierda arriba).

En el anexo se han imprimido en formato A4 horizontal las cartas número 1 a 3, que contienen pares de colores metámeros para los iluminantes estándar de la CIE D65 y A, y para los iluminantes de la CIE D50 y P40. Los factores de reflexión espectral de las muestras de estas tres cartas están disponibles. Se dan también los datos *rgb* de las muestras, y se han calculado sus numerosos datos CIE para seis iluminantes CIE: D65, D50, P40, A, C, y E. Estas muestras de color se basan en el círculo de color de 16 pasos del *Sistema de Color Elemental Relativo RECS* (véase DIN 33872-1 a -6).

CIE R1-47 ha definido los ángulos de tono de los colores elementales para el iluminante estándar de la CIE D65. Así, el amarillo elemental Y_e y el azul elemental B_e tienen ángulos de tono de 92 y 272 grados, respectivamente. Sin embargo, para el iluminante A de la CIE los ángulos de tono de estos colores elementales pueden cambiar de 92 y 272 grados a 82 y 262 grados en CIELAB, respectivamente. Los valores exactos de los ángulos de tono de los colores elementales son desconocidos. En todo caso, los tonos elementales para el iluminante D65 no son ya tales para el iluminante A de la CIE. Por ejemplo, el azul elemental B_e bajo el iluminante D65 de la CIE, parece rojizo bajo el iluminante A de la CIE. Análogamente, el amarillo elemental Y_e bajo el iluminante D65 de la CIE, parece verdoso bajo el iluminante A de la CIE. En el futuro la CIE puede definir el cambio de los ángulos de tono de los colores elementales para sus diferentes iluminantes.

Si en impresión offset o con impresoras en color se imprimen los colores acromáticos solamente con los tres colorantes CMY en vez de solamente con el colorante N , entonces se necesitan el triple de recursos materiales. Si los colores acromáticos se imprimen sólo con CMY , el precio puede aumentar en un factor 6. Generalmente, el precio de cada una de las tres tintas cromáticas CMY es el doble del de la tinta acromática N . Además, en la impresión con CMY hay hasta

tres máximos y mínimos de las curvas de reflectancia, que pueden producir diferencias de color $\Delta E^* = 10$ para colores idénticos (metámeros) (véase la Figura 44, parte inferior derecha).

En el anexo, en las cartas de prueba número 2 y 3 (PS2311L y PS3311L), se utilizan las dos tecnologías de impresión antes mencionadas para la impresión de la gama de colores acromáticos. En la impresión offset de las cartas de prueba número 2 y 3, se han generado colores acromáticos metámeros para cuatro iluminantes CIE diferentes: D65, D50, P40 y A. Hay además en estas cartas colores metámeros para muestras de un círculo de tono de 8 pasos, con la mitad del máximo croma CIELAB C^*_{ab} que se puede lograr en impresión offset.

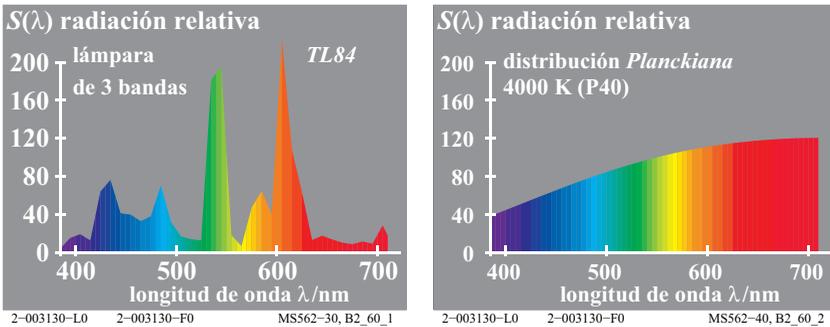


Fig. 45: Distribución espectral relativa de radiación.

La Figura 45 muestra las distribuciones espectrales relativas de radiación $S(\lambda)$ correspondientes a una lámpara fluorescente de tres bandas de alta eficiencia luminosa (lámpara de ahorro energético), y de una (hipotética) fuente de luz con temperatura de color 4000K, que emite radiación conforme a la ley de *Planck*. Ambas fuentes de luz nos parecen igualmente blancas, aunque tienen distribuciones espectrales diferentes.

Iluminando objetos cromáticos alternativamente con estas dos lámparas metámeras, observamos diferencias en la apariencia de color de dichos objetos. Según la publicación CIE 13.3, estas diferencias son diferencias en las propiedades de rendimiento de color de esas fuentes de luz. Los dos colores metámeros en la Figura 43 de la página 43, nos parecen iguales bajo luz día D65, y diferentes bajo las fuentes de luz TL84 y de 4000 K de la Figura 45.

Las cartas de prueba números 1 al 3 del anexo permiten hacer una evaluación visual y una especificación colorimétrica de las propiedades de rendimiento en color de lámparas LED y de las propiedades de la reproducción en color, en el campo de la tecnología de la información. Estas cartas de prueba están basadas en el *Sistema de Color Elemental Relativo RECS* (véase DIN 33872-1 a -6).

16 Contraste

El contraste, ya conocido por *Leonardo da Vinci* y descrito con todo detalle por *Goethe* (1749-1832), es uno de los principios de expresión más importantes en bellas artes, arte, artesanía y diseño industrial. El contraste está basado en la influencia mutua de las diferentes partes del campo visual.

16.1 Contraste acromático

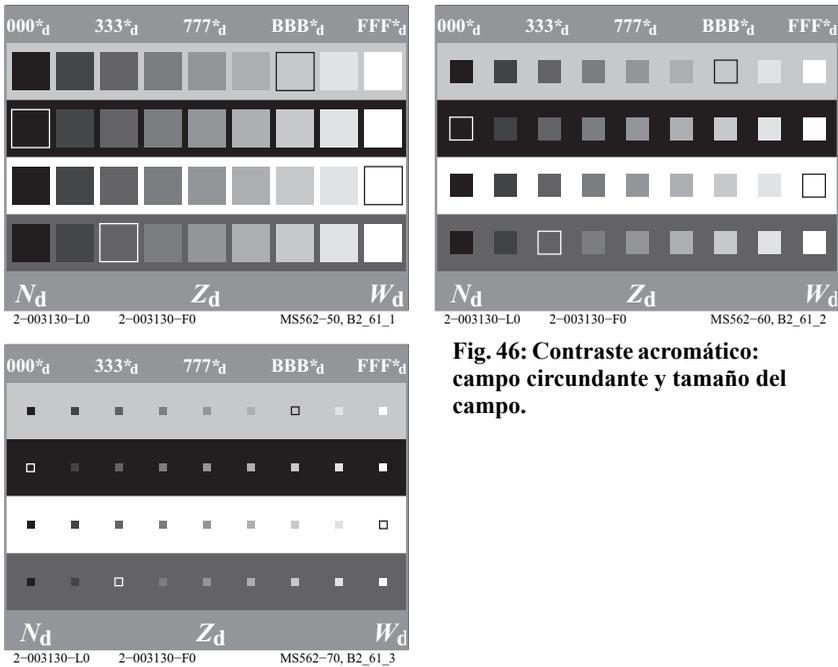


Fig. 46: Contraste acromático: campo circundante y tamaño del campo.

La claridad que percibimos en un campo central situado sobre un fondo luminoso neutro cambia en sentido opuesto a la de dicho fondo. Por ejemplo, la claridad que percibimos en las muestras de cuatro escalas de grises *fisicamente idénticas*, depende de la luminancia de su campo circundante. Sin referencia a un campo más luminoso, no existe el gris ni el negro.

La Figura 46 muestra cuatro escalas de muestras acromáticas grises, que van desde el negro N_d al blanco W_d , situadas sobre cuatro campos circundantes con diferente claridad. El código $rgb*_d$ (con estrella) indica que, sobre un fondo gris intermedio, las nueve muestras de la escala de grises están visualmente equies-

pacidadas, teniendo claridades CIELAB $L^* = 15, 25, 35, \dots, 95$. En comparación con la apariencia sobre un campo circundante de color gris intermedio ($Z_d =$ gris intermedio, como el de los rectángulos de arriba y abajo de la Figura 46), sobre un campo circundante blanco las muestras parecen más oscuras, y sobre un campo circundante negro parecen más claras.

Según *Miescher* (1961), una escala de grises equiespaciada de 100 pasos, vista sobre campos circundantes blanco, gris intermedio y negro, obedece las siguientes ecuaciones respecto del valor triestímulo CIE Y :

- Campo circundante blanco: $L^*_W = 100 (Y_W/100)^{1/2}$.

Según esta fórmula, para una muestra gris intermedia con $L^*_W = 50$ su valor triestímulo CIE Y es $Y_W = 25$.

- Campo circundante gris intermedio: $L^*_Z = 100 (Y_Z/100)^{1/2,4}$.

Según esta fórmula, para una muestra gris intermedia con $L^*_Z = 50$ su valor triestímulo CIE Y es $Y_Z = 19$.

- Campo circundante negro: $L^*_N = 100 (Y_N/100)^{1/3,0}$.

Según esta fórmula, para una muestra gris intermedia con $L^*_N = 50$ su valor triestímulo CIE Y es $Y_N = 12,5$.

En un campo circundante gris intermedio una muestra gris intermedia con $Y_Z = 19$ tiene una claridad $L^*_Z = 50$. Según las fórmulas anteriores, sobre un campo circundante blanco esa muestra con $Y_W = 19$ tendría una claridad $L^*_W = 44$, y, sin embargo, sobre un campo circundante negro, esa muestra con $Y_N = 19$ tendría una claridad $L^*_N = 58$.

Estas fórmulas para la clasificación de muestras grises vistas sobre diferentes campos circundantes, son sólo una primera aproximación en la descripción del contraste. La luminancia absoluta también influye sobre esta clasificación.

Con mayor luminancia mejora la discriminación de las muestras grises individuales. O sea, al aumentar la luminancia, el blanco nos parece cada vez más blanco y el negro nos parece cada vez más negro. Esto quiere decir que la diferencia de color percibida entre un blanco y un negro aumenta con la luminancia. Cuando la iluminancia en la serie de grises aumenta de 500 lux a 5000 lux, la discriminación mejora aproximadamente un 20%. Este efecto parece pequeño, teniendo en cuenta que la iluminancia ha cambiado en un factor 10 (1000%).

La Figura 46 incluye tres figuras distintas en las que el tamaño de las muestras grises del campo central cambia respecto al tamaño fijo del campo circundante. La máxima influencia de contraste ejercido por el campo circundante ocurre

para un campo central con un tamaño de aproximadamente 1 grado (1°), cuando el tamaño del campo circundante es al menos 10 veces mayor ($>10^\circ$).

16.2 Contraste cromático

El color de un campo circundante cromático cambia todos los atributos de color del campo central en sentido contrario.

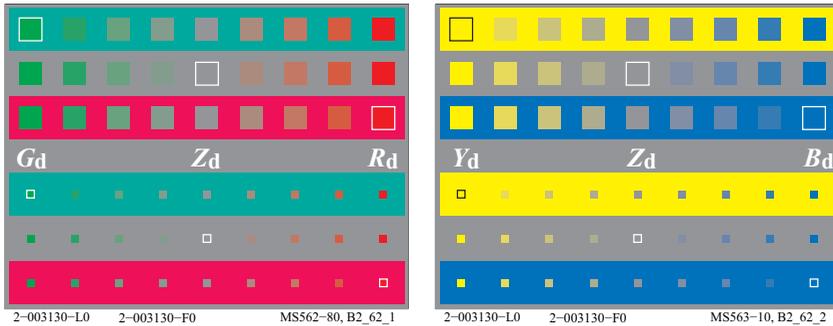


Fig. 47: Contraste cromático: campo circundante y tamaño del campo.

La Figura 47 muestra tres series de color físicamente idénticas y equiespaciadas, sobre un campo circundante gris intermedio Z_d y sobre dos campos circundantes, uno rojo R_d y otro verde G_d .

En la Figura 47 las muestras rojas sobre campo circundante verde parecen más rojas que sobre campo circundante rojo. Análogamente, las muestras verdes sobre campo circundante rojo parecen más verdes que sobre campo circundante verde. Además, las muestras grises Z_d no parecen acromáticas sobre campo circundante rojo o verde, sino con una cromaticidad *opuesta* a la del campo circundante.

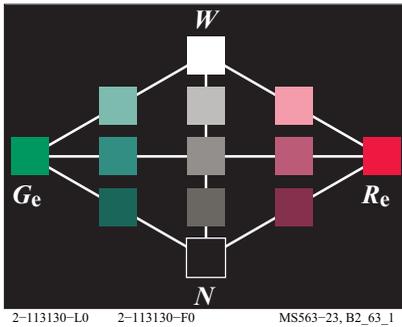
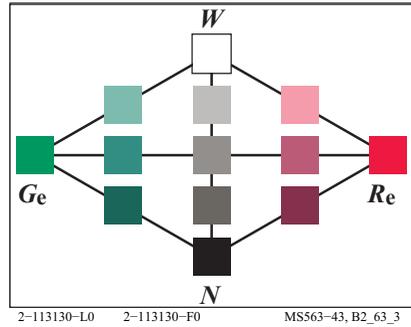
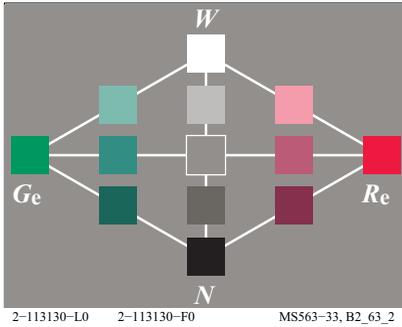


Fig. 48: Influencia del campo circundante sobre escalas de color RG

La Figura 48 muestra una propiedad adicional importante del contraste acromático y cromático, para muestras en un plano de tono rojo-verde.

Sobre un campo circundante gris intermedio, la multiplicidad o gama de colores parece mayor que sobre un campo circundante blanco o negro. Sobre campo circundante negro muchos colores parecen luminosos, y se pierde la importante componente *negruzca*. Sobre campo circundante blanco muchos colores parecen *negruzcos*, y se pierde el importante atributo *luminoso*. Sobre un campo circundante gris intermedio, están presentes los atributos de color *negruzco* y *luminoso*, con contribuciones apropiadas respecto a las que se dan en una escena natural.

La Figura 48 muestra que todos los colores rojos tienen tonos mas similares al tono rojo elemental R_e , en comparación con lo que veíamos en la Figura 7 de la página 11. En la Figura 48 se ha usado una linealización tridimensional para calcular, a partir de datos de entrada *rgb* indefinidos, las coordenadas rgb_{de} deseadas (subíndice de = de dispositivo a tono elemental). Las coordenadas rgb_{de} para todos los colores rojos tienen un ángulo de tono CIELAB $h_{ab} = 26$ grados en la salida, lo que según CIE R1-47 corresponde al tono rojo elemental.

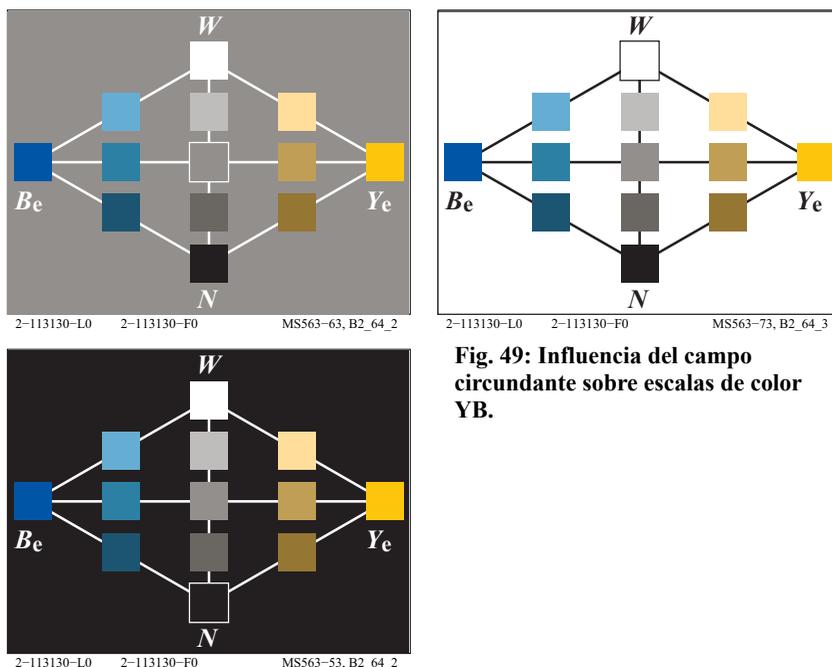


Fig. 49: Influencia del campo circundante sobre escalas de color YB.

La Figura 49 muestra la multiplicidad o gama de color en un plano de tono amarillo-azul. De forma semejante a lo que ocurría anteriormente para el plano rojo-verde, de nuevo vemos aquí que sobre un campo circundante gris están presentes los dos atributos del color *negruzco* y *luminoso*, con contribuciones apropiadas respecto a las que se dan en una escena natural.

El cambio de apariencia de los colores como consecuencia del color de su campo circundante depende de procesos fisiológicos del sistema visual humano. Hasta ahora sólo se han dado los primeros pasos para describir tales procesos (véase sección 18 de la página 60).

17 Estandarización del valor del color y medida del color

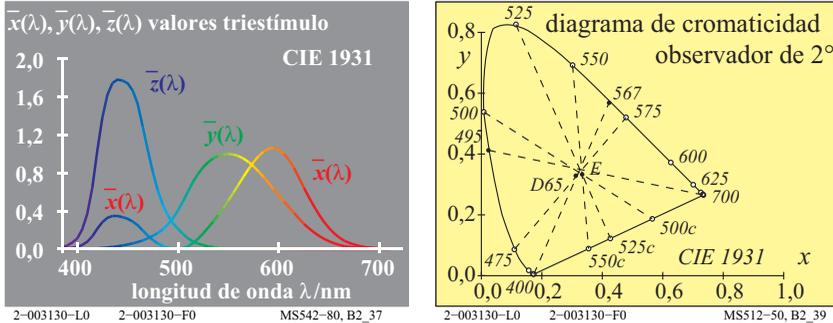


Fig. 50: Valores triestímulo CIE y diagrama de cromaticidad de la CIE para el observador de 2 grados.

La Figura 50 muestra los tres valores triestímulo espectrales de la CIE, $x_q(\lambda)$, $y_q(\lambda)$, y $z_q(\lambda)$, para el iluminante E (radiación equienérgica) de la CIE, desde 380 nm hasta 720 nm. En la Figura 50 las curvas muestran los valores de color de los distintos colores espectrales. Hay tres funciones triestímulo, que toscamente podrían identificarse con tres colores: azul $z_q(\lambda)$, verde $y_q(\lambda)$ y rojo $x_q(\lambda)$.

Para los colores espectrales, la CIE ha definido la cromaticidad espectral como:

$$\begin{aligned}
 x(\lambda) &= x_q(\lambda) / [x_q(\lambda) + y_q(\lambda) + z_q(\lambda)] \\
 y(\lambda) &= y_q(\lambda) / [x_q(\lambda) + y_q(\lambda) + z_q(\lambda)] \\
 z(\lambda) &= z_q(\lambda) / [x_q(\lambda) + y_q(\lambda) + z_q(\lambda)] = 1 - x(\lambda) - y(\lambda)
 \end{aligned}$$

Los valores triestímulo espectrales, la radiación espectral física y la reflectancia espectral de los objetos, nos permiten calcular los valores triestímulo CIE X , Y , Z , así como las coordenadas de cromaticidad estándar de la CIE x , y , z :

$$\begin{aligned}
 x &= X / (X + Y + Z) \\
 y &= Y / (X + Y + Z) \\
 z &= Z / (X + Y + Z) = 1 - x - y
 \end{aligned}$$

Se pueden encontrar ejemplos de estos cálculos para los tres colores óptimos aditivos en: *K. Richter* (1996), páginas 276-277; para descarga (288 páginas, 2,8 MB) véase <http://130.149.60.45/~farbmetrik/BUA4BF.PDF>

En la Figura 50 las cromaticidades CIE de los estímulos espectrales definen el borde del diagrama de cromaticidad CIE. Este borde, junto con la llamada línea de púrpuras, define un área cerrada. La línea de púrpuras se obtiene uniendo las

cromaticidades de los colores espectrales con longitudes de onda extremas: aproximadamente, $\lambda = 400 \text{ nm}$ y $\lambda = 700 \text{ nm}$.

Todos los colores, como, por ejemplo, los objetos de color usuales, los colores espectrales y los colores óptimos, tienen cromaticidades que están dentro (o en el borde) del diagrama de cromaticidad CIE.

Las coordenadas de cromaticidad CIE x , y junto con el valor triestímulo Y (que está normalizado al valor 100 para el blanco de referencia) permiten especificar un color cualquiera análogamente a como lo hacen los valores triestímulo CIE X , Y , Z . Los valores numéricos de los valores triestímulo CIE X , Y , Z están comprendidos entre 0 y 100 según la publicación CIE 15 *Colorimetría*, para el iluminante E de la CIE. Los valores de las coordenadas de cromaticidad son siempre menores que 1,0. Las coordenadas x , y especifican puntos en un diagrama rectangular x , y .

En el diagrama de cromaticidad x , y hay toda una serie de colores con diferentes valores del valor triestímulo Y ($0 \leq Y \leq 100$) a los que corresponde un mismo punto cromático. Por tanto, los colores con un punto de cromaticidad fijo en la zona de los *amarillos* del diagrama de cromaticidad, nos pueden parecer o casi negros (por ejemplo, cuando tienen $Y=4$), o amarillos claros y cromáticos (cuando tienen $Y=90$). Para especificar correctamente un estímulo de color se requieren tanto la cromaticidad x , y como el valor triestímulo Y .

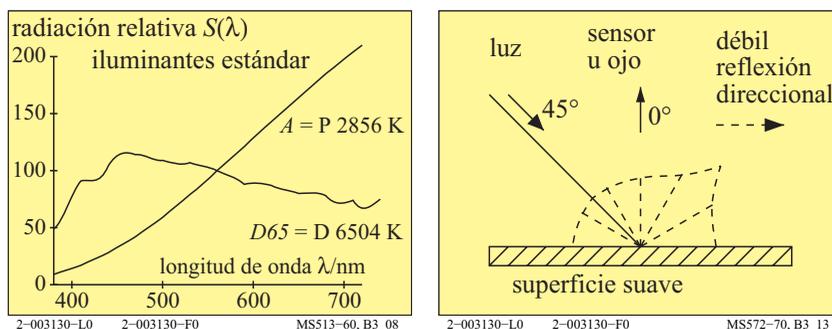


Fig. 51: Radiación de los iluminantes D65 y A, y geometría de medida CIE.

Los valores triestímulo estándar dependen del iluminante; por ejemplo, los iluminantes estándar D65 o A de la CIE (véase Figura 51, izquierda). Generalmente el ángulo de iluminación de la superficie de la muestra es de 45° , y el ángulo de visión o medida de la muestra es de 0° (véase Figura 51, derecha). La superficie suave y sedosa de la impresión estándar en offset normalmente produce reflexión difusa en todas las direcciones. Sin embargo, suele haber algo más de luz reflejada en la dirección especular o de brillo: -45° . Por lo tanto, los

colores negros parecen más negros cuando se observan a 0° , respecto a como se ven cuando se observan a -45° . El valor triestímulo Y de la CIE puede ser $Y=2,5$ para el ángulo de 0° y aproximadamente $Y=5$ para el ángulo de -45° .

métrica de valencia de color (relación lineal con datos CIE 1931)		
términos de color lineales	nombre y relación con los valores triestímulo o cromaticidad CIE	notas
valores triestímulo	X, Y, Z	
valor cromático	<i>diagrama lineal de valor cromático (A, B)</i>	$n=D65$
rojo-verde	$A = [X/Y - X_n/Y_n] Y = [a - a_n] Y$ $= [x/y - x_n/y_n] Y$	<i>(campo circundante)</i>
amarillo-azul	$B = -0,4 [Z/Y - Z_n/Y_n] Y = [b - b_n] Y$ $= -0,4 [z/y - z_n/y_n] Y$	
radial	$C_{AB} = [A^2 + B^2]^{1/2}$	
cromaticidad	<i>diagrama de cromaticidad lineal (a, b)</i>	comparar excitación lineal de conos
rojo-verde	$a = X/Y = x/y$	$L/(L+M)=P/(P+D)$ $S/(L+M)=T/(P+D)$
amarillo-azul	$b = -0,4 [Z/Y] = -0,4 [z/y]$	
radial	$c_{ab} = [(a - a_n)^2 + (b - b_n)^2]^{1/2}$	

2-003130-L0 2-003130-F0

MS982-70

Tabla 3: Coordenadas de color en una métrica de color baja, o métrica de valencia de color.

La Tabla 3 muestra las coordenadas de una métrica de color baja, o métrica de valencia de color. Todas estas coordenadas son transformaciones lineales de los valores triestímulo CIE X, Y, Z , o de las coordenadas de cromaticidad CIE x, y junto con el valor triestímulo Y . Las coordenadas principales son los valores cromáticos A, B , y C_{ab} así, como las cromaticidades a, b , y c_{ab} . Los valores cromáticos dependen de las cromaticidades del campo circundante (subíndice n). Generalmente se usan las coordenadas de cromaticidad $x_n=0,3127, y_n=0,3390$ del iluminante estándar de la CIE D65.

Según la publicación CIE 170-1, las sensibilidades CIE de los receptores implicados en la visión humana del color $l_q(\lambda), m_q(\lambda)$ y $z_q(\lambda)$, son funciones lineales de los valores triestímulo espectrales de la CIE $x_q(\lambda), y_q(\lambda)$ y $z_q(\lambda)$. La eficiencia

luminosa $y_q(\lambda)$ es aproximadamente la suma de $l_q(\lambda)$ y $m_q(\lambda)$. En la sección 18 de la página 60 se muestran las sensibilidades CIE de los receptores.

Rudamente, en la Tabla 3 la cromaticidad a (contenido rojo o verde) es igual a la proporción $L/(L+M)$ y la cromaticidad b (contenido azul o amarillo) es igual a la proporción $S/(L+M)$. En la literatura, en vez de las letras L, M, S suelen usarse las letras P, D, T , de acuerdo con las tres deficiencias en visión del color: P = Protán, D = Deután y T = Tritán.

Las anomalías de la visión del color, tanto las provocadas por los receptores retinianos del color como las que surgen en la transmisión neural de la señal de color, tienen como resultado una visión defectuosa del color total o parcial. La visión defectuosa del color afecta a un 8% de los hombres, y sólo a un 0.5% de las mujeres (relación 16:1). La mayoría de estas personas confunden los colores rojo y verde, que les parecen como grises o grisáceos.

Las personas con deficiencias en visión del color no deberían desempeñar algunas profesiones que dependen de una visión normal del color, como es el caso de los pilotos, conductores de autobús o taxis y técnicos de impresión. Solamente muy pocas personas confunden los colores amarillo y azul. Y aún menos personas perciben todos los colores como estímulos acromáticos (blanco, gris y negro). Para comprobar la visión defectuosa del color hay cartas como, por ejemplo, las de *Ishihara* (1953), en las que se usan dígitos o símbolos. Los observadores con visión normal y defectuosa del color ven dígitos o símbolos diferentes en estas cartas. El anomaloscopio de *Nagel*, conforme con DIN 6160, permite la determinación del grado de deficiencia en visión del color.

métrico de color alto (relación no lineal con los datos CIE 1931)		
términos no lineales	nombre y relación con valores triestímulo o cromaticidad	notas
claridad	$L^* = 116 (Y / 100)^{1/3} - 16 \quad (Y > 0,8)$ aproximación: $L^* = 100 (Y/100)^{1/2,4} \quad (Y > 0)$	CIELAB 1976
chroma	<i>transformación no lineal de cromáticos A, B</i>	
rojo-verde	$a^* = 500 [(X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3}]$ $= 500 (a' - a'_n) Y^{1/3}$	CIELAB 1976
amarillo-azul	$b^* = 200 [(Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3}]$ $= 500 (b' - b'_n) Y^{1/3}$	CIELAB 1976 $n = D65$
radial	$C^*_{ab} = [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$	(campo circundante)
cromaticidad	<i>transformación no lineal de cromaticidades x/y, z/y</i>	<i>comparar log</i>
rojo-verde	$a' = (1 / X_n)^{1/3} (x / y)^{1/3}$ $= 0,2191 (x / y)^{1/3}$ para D65	<i>excitación de conos</i> $\log[L / (L+M)]$
amarillo-azul	$b' = -0,4 (1 / Z_n)^{1/3} (z / y)^{1/3}$ $= -0,08376 (z / y)^{1/3}$ para D65	$= \log[P / (P+D)]$ $\log[S / (L+M)]$
radial	$c'_{ab} = [(a' - a'_n)^2 + (b' - b'_n)^2]^{1/2}$	$= \log[T / (P+D)]$

2-003130-L0 2-003130-F0

MS983-70

Tabla 4: Coordenadas de color en una métrica de color alta, o métrica de sensación de color.

La Tabla 4 muestra las coordenadas de una métrica de color alta o métrica de sensación de color. La claridad L^* , las coordenadas de color a^* , b^* y C^*_{ab} , y las cromaticidades a' , b' , y c'_{ab} son las coordenadas más importantes de esta métrica alta o de sensación de color. En la Tabla 4 las cromaticidades no lineales a' y b' sirven como alternativa al cálculo de las coordenadas a^* , b^* y C^*_{ab} del espacio de color CIELAB. La cromaticidad (a' , b') en CIELAB no está definida en la publicación CIE 15 e ISO 11664-4. La cromaticidad no lineal (a' , b') es ligeramente semejante a la cromaticidad lineal (u' , v') de CIELUV en la publicación CIE 15.

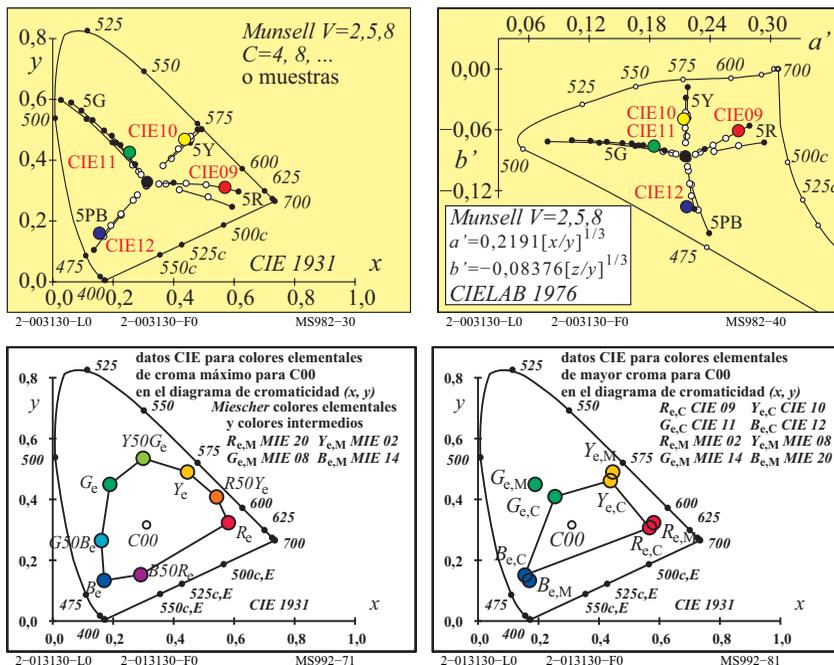


Fig. 52: Colores Munsell, Miescher y CIE en (x, y) y (a', b').

La Figura 52 muestra los cuatro tonos elementales $RYGB_e$, además de los tonos intermedios de Miescher $R50Y_e$, $Y50G_e$, $G50B_e$ y $B50R_e$ (abajo izquierda). Los colores verdaderos (o) y (•) extrapolados de los cuatro tonos Munsell 5R, 5Y, 5G, y 5PB para Values 2, 5, y 8 se muestran también (arriba, izquierda y derecha). En el diagrama de cromaticidad (a', b') la posición de estos puntos está más sobre distintas líneas rectas que en el diagrama (x, y). El cromía de los cuatro colores elementales del círculo de tono de Miescher es mayor que el de los cuatro colores de prueba CIE números 9 al 12, según la publicación CIE 13.3 (abajo derecha). El círculo de tono de Miescher se generó mediante 11 tintas de color apropiadas. Además el cromía es también mayor que el del círculo de tono del Sistema de Color Elemental Relativo RECS. Este círculo de tono se generó mediante los tres colores estándar de impresión offset CMY_d (véase la Figura 59 de la página 71, abajo, izquierda y derecha).

El diagrama de cromaticidad (a', b') se ha definido en la Tabla 4. Tiene una extensión mayor yendo hacia la zona de longitud de onda $\lambda=400$ nm. Para la aplicación en tecnología de la información esto no es ningún problema, porque

estos colores generalmente no existen ni en impresión offset ni en monitores en color. Todos los colores reales están situados dentro de la región cerrada de la Figura 52 (*arriba derecha*).

La Figura 52 muestra los colores elementales de *Miescher* en el diagrama de cromaticidad (x , y). Estas muestras de color no están situadas sobre una circunferencia en torno a la cromaticidad del iluminante C de la CIE, que también se usa en el sistema de color *Munsell*. Las diferencias de cromaticidad entre los iluminantes C y D65 de la CIE son pequeñas. Los colores elementales amarillo Y_e y azul B_e , junto con el punto acromático D65 se sitúan aproximadamente sobre una línea recta. Por lo tanto, se pueden mezclar aditivamente los colores Y_e y B_e en proporciones apropiadas, para conseguir el color acromático D65. Los colores elementales rojo R_e y verde G_e no están situados junto con D65 en una línea recta. Por lo tanto, la mezcla aditiva de R_e y G_e produce colores amarillos verdosos, amarillentos, o amarillos rojizos, pero nunca el color D65 acromático.

La Tabla 3 de la página 55 y la Tabla 4 de la página 57 muestran los atributos de color de las métricas de color baja y alta. Se supone que los colores complementarios de dispositivo amarillo Y_d y azul B_d se mezclan aditivamente para producir el blanco. En ese caso sólo se pueden mezclar tonos acromáticos, amarillos o azules. Si el valor del amarillo es mayor que el valor del azul ($Y_d > B_d$), entonces los valores blanco, negro y cromático se calculan conforme a la Tabla 3 de la página 55.

La mezcla de color dicromática y tricromática es de gran importancia en la tecnología de la información en color. En este ámbito, por ejemplo, en el color en un monitor, o en el color generado por un proyector, o en la impresión multicolor, todos los colores se reproducen mediante tres colores básicos de dispositivo RGB_d o CMY_d . La mezcla aditiva de color para un monitor o un proyector, usando dos colores básicos mas un tercer color, es una mezcla dicromática, en la que:

$$\begin{aligned} W_d &= R_d + (G_d + B_d) = R_d + C_d \\ W_d &= G_d + (B_d + R_d) = G_d + M_d \\ W_d &= B_d + (R_d + G_d) = B_d + Y_d \end{aligned}$$

En tecnología de la información en color generalmente se desea la reproducción de una amplia gama de colores. Para ello se generan colores con máximo valor cromático C_{AB} y aproximadamente el máximo croma C^*_{ab} , por medio de colores óptimos complementarios con longitudes de onda compensatorias límite λ_d y λ_c . En esa situación la mezcla dicromática producirá un blanco. Las soluciones colorimétricas para lograr una amplia gama de color en la salida se recogen en la sección 19.

18 Propiedades especiales de la visión del color

Las propiedades de la visión del color dependen de las propiedades de los tres receptores *LMS* o *PDT* responsables de la visión diurna.

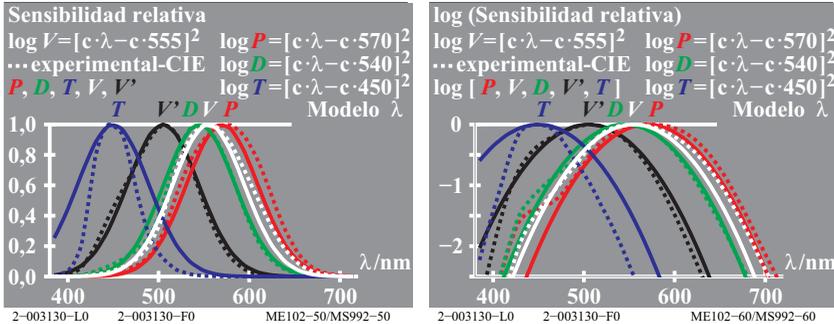


Fig. 53: Sensibilidades relativas de los receptores *PDT* (o *LMS*), $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$.

La Figura 53 muestra las sensibilidades de los receptores *PDT* (según la notación usada en deficiencias en visión del color: *P*=Protán, *D*=Deután, y *T*=Tri-tán) ó *LMS* (según la publicación CIE 170-1). Las máximas sensibilidades se sitúan cerca de las longitudes de onda de 570, 540, y 450 nm.

El receptor de las largas longitudes de onda (*L* ó *P*) tiene su máxima sensibilidad no en la región de los rojos, sino en la región amarillo-verde. Su longitud de onda de máxima sensibilidad, $\lambda_m=570$ nm, es menor que la longitud de onda dominante del amarillo elemental, $\lambda_d=574$ nm. Si en el eje vertical se usa una escala logarítmica, las curvas de sensibilidad de los tres receptores son aproximadamente parábolas con la misma forma (Figura 53, derecha). En este caso, la suma y las diferencias tienen propiedades especiales:

$$\begin{aligned} \log V(\lambda) &= \log P(\lambda) + \log D(\lambda) \text{ (nuevo máximo en 555 nm con 570 y 540 nm)} \\ \log P(\lambda) &= \log V(\lambda) - \log D(\lambda) \text{ (máximo conocido en 570 nm con 555 y 540 nm)} \\ \log R(\lambda) &= \log P(\lambda) - \log D(\lambda) \text{ (nuevo máximo en 600 nm con 570 y 540 nm)} \end{aligned}$$

De nuevo en la última expresión se crea una curva con forma de parábola, y además se define la sensibilidad roja antes omitida $R(\lambda)$ con un máximo en 600 nm.

La sensibilidad luminosa $V(\lambda)$ tiene una gran importancia en visión del color. $V(\lambda)$ sirve de base para la definición de la luminancia. Según la publicación CIE 15 *Colorimetría*, $V(\lambda)$ se calcula linealmente según la ley de *Grassmann*, por ejemplo como:

$$V(\lambda) = P(\lambda) + D(\lambda).$$

En cambio el cálculo según las expresiones logarítmicas anteriores nos lleva a:

$$V_{\log}(\lambda) = 10^{[\log P(\lambda) + \log D(\lambda)]}$$

La diferencia entre $V(\lambda)$ y $V_{\log}(\lambda)$ es aproximadamente del 1% para las longitudes de onda de 400 y 700 nm, en comparación con el máximo en torno a 555 nm (véase *K. Richter (1996)*). El umbral de color es también próximo al 1%. Por lo tanto, para muchas aplicaciones ambos métodos de cálculo son aproximadamente iguales. La sensibilidad luminosa espectral $V(\lambda)$ es de especial importancia para la tecnología de la iluminación. Las proporciones siguientes respecto de $V(\lambda)$, tienen especial importancia en el campo del color:

$$A(\lambda) = R(\lambda) / V(\lambda) \text{ (cromaticidad espectral rojo-verde)}$$

$$B(\lambda) = - T(\lambda) / V(\lambda) \text{ (cromaticidad espectral amarillo-azul)}$$

En las aplicaciones estas proporciones corresponden a los cocientes X/Y y Z/Y , respectivamente. En la Tabla 3 de la página 55 estos cocientes (junto con un factor de peso) se denominan cromaticidades rojo-verde y amarillo-azul, a y b , respectivamente. Ambas definen el diagrama de cromaticidad (a, b) . Para el uso en las aplicaciones del diagrama de cromaticidad (a, b) en lugar del diagrama de cromaticidad (x, y) , así como para la descripción de umbrales de color, véase *K. Richter (1996)*.

Se pueden describir otras propiedades de la visión en color estudiando las señales fisiológicas de color en la retina de primates. *A. Valberg (2005)* ha descrito numerosas señales fisiológicas en función de la cromaticidad y luminancia del campo central y del campo circundante.

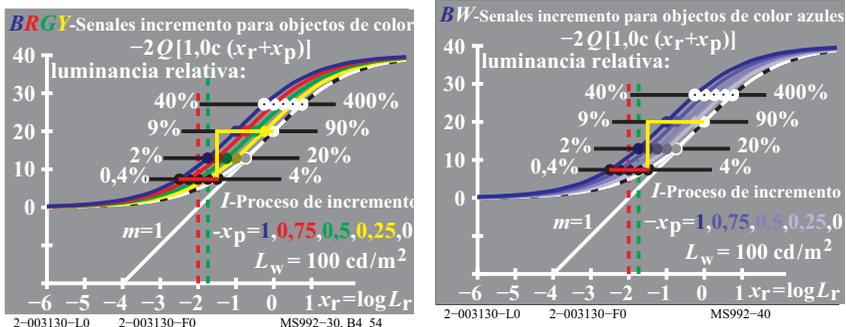


Fig. 54: Señales de color de los colores cromáticos y azul.

En principio, la Figura 54 muestra las señales de color medidas para colores de luminancia creciente, observados en un campo central, sobre un campo circundante blanco. Ambas escalas son logarítmicas. La luminancia del campo circundante (blanco w) es de 100 cd/m^2 . En oficinas se recomienda una

iluminancia de 500 lux, que corresponde a una luminancia de 142 cd/m^2 para el papel estándar blanco usado en offset. Esta luminancia está en el rango de visión diurna, que va aproximadamente desde 1 cd/m^2 hasta 10000 cd/m^2 .

En la Figura 54 las señales I ($I =$ Incremento) para colores acromáticos y cromáticos son curvas en forma de S, que saturan en torno al 0.9% y 9000%, respecto al valor del 90% correspondiente al campo circundante blanco. En comparación con los colores acromáticos, las curvas para los colores cromáticos (*izquierda*) están desplazadas hacia la izquierda. Las curvas para los colores cromáticos azules (*derecha*) están movidas hacia la izquierda, según su diferencia de cromaticidad respecto a D65 en el diagrama de cromaticidad (a, b). Por lo tanto, para todos los colores cromáticos se producen las mismas señales para una luminancia menor L , comparada con la luminancia del campo circundante

$$L_w = 100 \text{ cd/m}^2 \quad (w = \text{campo circundante blanco}).$$

Según *Ostwald* (1920), los colores óptimos de máximo cromatismo se definen por un *color mitad*, que tiene longitudes de onda compensatorias límites. El valor triestímulo Y y el valor cromático C_{AB} se pueden calcular conforme a la Tabla 3 de la página 55. El valor triestímulo Y y el valor cromático C_{AB} están relacionados linealmente. La razón C_{AB}/Y puede servir para describir el desplazamiento hacia la izquierda en la Figura 54 de la página 61.

La pendiente de las curvas o señales en forma de S es máxima en el centro. Por lo tanto, se espera que ahí ocurra la máxima discriminación en luminancia $L/\Delta L$. El umbral para colores acromáticos y cromáticos se espera en una luminancia, que como mucho es un factor 36 más pequeña que la del campo circundante blanco. El factor 36 se puede calcular a partir del cociente entre los valores triestímulo $Y_w = 90$ y $Y_N = 2,5$ correspondientes al blanco y al negro.

Probablemente las luminancias para las que hay una máxima discriminación en luminancia $L/\Delta L$ son similares a las luminancias de los colores G0 de *Evans* (1967). Sobre un fondo blanco, los colores G0 nos parecen sobre un fondo blanco ni negruzcos ni luminosos. Según *Evans*, en el umbral de color el valor del triestímulo Y_s ($s = \text{umbral}$) es para todos los colores un factor 30 más pequeño que el valor del triestímulo Y de los colores G0.

Durante el año 2014 se podría publicar un informe del comité técnico CIE 1-81 *Validez de las fórmulas para predecir pequeñas diferencias de color* (Presidente: *K. Richter*, Alemania), con una descripción de los umbrales de color. Se prevé durante 2013 la publicación de un informe del CIE R1-57 *Frontera entre colores negruzcos y luminosos* (Responsable: *T. Seim*, Noruega).

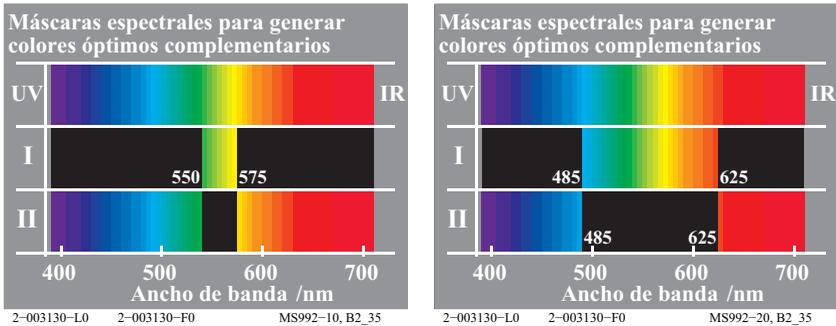


Fig. 55: Colores óptimos complementarios de diferente ancho de banda.

La Figura 55 muestra colores óptimos complementarios con diferente ancho de banda (izquierda y derecha). Dichos colores óptimos complementarios son creados como espectros de borde blanco-negro y negro-blanco, si uno observa con un prisma bordes de tamaño diferente. Ya *Goethe* (1830) observó que existe la misma discriminación en color en el espectro *positivo* y *negativo* para posiciones próximas dentro de series de color continuas y complementarias.

Con un aparato de mezcla de colores espectrales, *T. Holsmark* y *A. Valberg* (1971) mezclaron los colores espectrales de una abertura *positiva* y *negativa*. Las aberturas *positiva* y *negativa* producen colores óptimos muy diferentes; por ejemplo, amarillo y azul (*izquierda*) o cian y rojo (*derecha*). En cuanto a la apariencia de una diferencia de color (umbral), el cambio de la abertura era aproximadamente igual para los colores óptimos complementarios.

Por lo tanto, para mejorar la métrica que describe los umbrales de color se necesitan coordenadas iguales y antisimétricas. Los valores cromáticos A y B de la Tabla 3 de la página 55 tienen esta propiedad. Las coordenadas a^* y b^* del espacio CIELAB no tienen esta propiedad. Se espera que en 2014 salga a la luz como informe del comité técnico 1-81 de la CIE una colorimetría para umbrales de color que considere estos resultados.

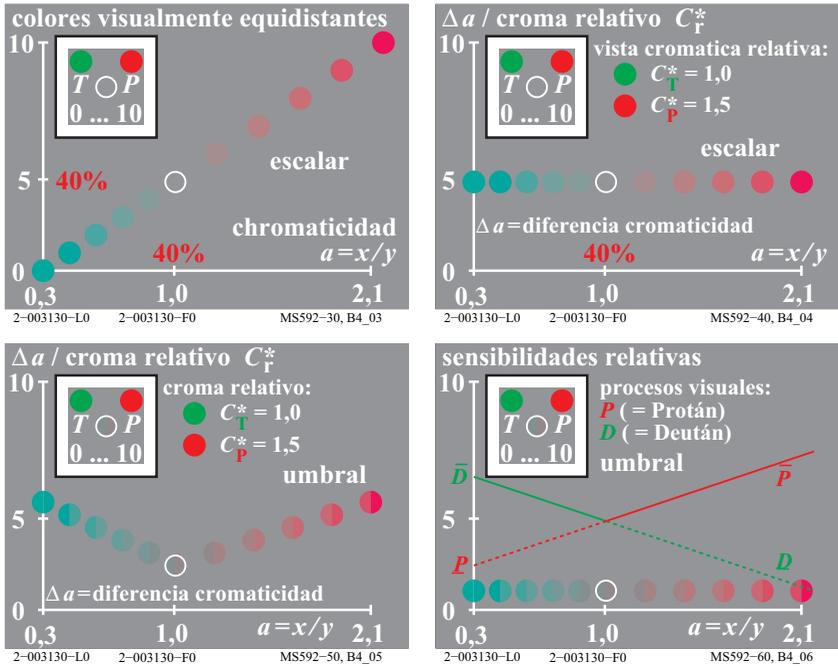


Fig. 56: Escalas de color y umbrales de color en la serie de color T - D65 - P.

En principio, la Figura 56 muestra algunos experimentos y resultados sobre escalas de color y umbrales de color en función de la cromaticidad $a = x/y$. Se muestran las escalas de color y umbrales de color para colores de una misma luminancia L , en este caso colores con el valor triestímulo $Y = 18$.

La Figura 56 (arriba a la izquierda) muestra una serie de colores que van desde un color turquesa muy cromático T hasta un color muy cromático rojo-púrpura P , pasando por un color gris (luz día D65). Aproximadamente, los colores de esta serie están visualmente equiespaciados. La configuración experimental se muestra en la Figura 56 (arriba a la izquierda). Sobre un campo circundante blanco hay un cuadrado gris que actúa como fondo. Sobre dicho fondo gris se presentan dos colores extremos, que aquí son un turquesa T y un rojo-púrpura P . En la parte inferior del campo se pueden generar colores de igual luminancia entre los dos colores extremos T y P .

El observador usa una escala fija con valores 0, 5 y 10, correspondientes a los colores T , D65 y P , respectivamente. En los experimentos se generaban de forma aleatoria dígitos comprendidos entre el 0 y el 10. Para el dígito 1 el

observador debe generar un color cromático turquesa, para el 7 un color púrpura de cromaticidad intermedia, para el 5 el gris acromático con la cromaticidad del D65. Se explicó a los observadores que el objetivo del experimento era la generación de una escala de colores visualmente equidistantes entre sí, tanto entre los colores T y D65 como entre los colores D65 y P .

La Figura 56 (*arriba a la derecha*) muestra los resultados de los experimentos en la dirección $T - P$. La diferencia Δa entre dos colores vecinos cualesquiera (dividida por el croma relativo, que vale 1,0 para el rango $T - D65$, y 1,5 para el rango $D65 - P$) en función de la coordenada $a = x/y$ es una línea recta. Hay un mismo valor de la diferencia de cromaticidad Δa (dividida por 1,0 ó por 1,5), para diferencias de croma visualmente idénticas. Por lo tanto, existe una descripción sencilla de diferencias visuales de croma de igual tamaño visual, por medio de diferencias constantes de una coordenada en una métrica de color baja (en nuestro caso, $a = x/y$).

Además, se han determinado también los umbrales de color, que son las diferencias de color justamente perceptibles, para los colores de la serie $T - D65 - P$. En principio suponíamos que la diferencia de cromaticidad Δa sería más pequeña para los umbrales; por ejemplo, en un factor constante de valor 30. Sin embargo, los resultados fueron diferentes.

La Figura 56 (*abajo izquierda*) muestra la configuración experimental. Sobre un campo circundante blanco había un fondo cuadrado de color gris. Sobre dicho fondo gris se mostraban los dos *colores extremos*, que en nuestro caso eran turquesa T y rojo-púrpura P . En el campo circular de la parte inferior se puede generar cualquiera de los colores situados entre los colores extremos T y P . En las dos mitades de un campo circular y bipartito se podían añadir cantidades iguales de T o de P . En general, para alcanzar una diferencia de color umbral se necesita añadir aproximadamente un 1% de los dos colores finales.

La Figura 56 (*abajo izquierda*) muestra la diferencia de cromaticidad Δa para umbrales de color, en función de la coordenada $a = x/y$, correspondiente a una métrica de color baja. Para los umbrales de color las diferencias Δa están en el rango 1 a 3. El mínimo valor de la diferencia Δa se obtiene para el gris (D65), aumentando linealmente hacia T y P . Para el gris aproximadamente 30 umbrales equivalen a un paso de croma. Para el rojo-púrpura P y el turquesa T un paso de croma equivale a 10 umbrales.

Los resultados de la investigación de *K. Richter* (1985) en el BAM están de acuerdo con otros resultados como, por ejemplo, los de *Inamura* y *Yaguchi* (2011). En principio son necesarias dos tipos de métricas del color diferentes para describir, por ejemplo, las elipses de *MacAdam* (umbrales) y los sistemas de ordenación del color, en los que se muestran escalas de color.

La Figura 56 (abajo derecha) muestra las sensibilidades relativas de los dos procesos de visión del color en la dirección rojo-verde. En cada sección otro proceso de visión en color determina el reconocimiento de los umbrales de color. Según este modelo la diferencia de cromaticidad Δa es pequeña para colores acromáticos y grande para colores cromáticos. Según la Figura 56 (abajo izquierda) los resultados experimentales son opuestos. El modelo de visión del color con señales de color en función de la luminancia y la cromaticidad puede explicar esta propiedad.

La Figura 54 de la página 61 muestra las señales de color de colores azules con una diferencia de cromaticidad creciente Δb respecto a la serie acromática (*derecha*). La máxima discriminación en luminancia $L/\Delta L$ se alcanza en una línea horizontal y para luminancias decrecientes de los colores azules, en comparación con el blanco acromático. Esto queda descrito por la máxima pendiente de todas las señales en una línea horizontal (cambio de pendiente de las señales). La discriminación en luminancia $L/\Delta L$ a lo largo de una línea vertical disminuye para estos colores azules de luminancia constante, porque disminuye la pendiente de las curvas de señal. Si suponemos además una relación lineal entre ΔL y Δb a lo largo de una línea vertical, entonces Δb disminuye para los colores azules de luminancia constante según muestra la Figura 54 de la página 61.

La Figura 56 (*abajo derecha*) parece indicar que las sensibilidades relativas aumentan con la diferencia de cromaticidad. Pero esto no es cierto y puede explicarse del modo siguiente. La luminancia para el umbral negro es más baja que la luminancia del blanco en un factor 1:36. Según *Evans* (1974) la luminancia del umbral cromático es generalmente menor que la luminancia del negro. Este resultado está de acuerdo con la Figura 56. Sin embargo, con diferencia creciente de cromaticidad para colores de luminancia constante, la pendiente de la señal disminuye y por lo tanto el umbral de cromaticidad disminuye, lo que parece opuesto a la Figura 56 (abajo derecha).

Los resultados de la investigación reclaman por lo menos una métrica del color para colores umbrales y otra para escalas de color, y, si es posible, considerar también las situaciones intermedias. En las aplicaciones, los umbrales de color son importantes para la determinación de pequeñas diferencias de color. El equiespaciamiento de grandes diferencias de color es importante para las propiedades de rendimiento de color. Normalmente las muestras de color de los sistemas de ordenación del color tienen entre sí diferencias de color en torno a 30 veces el valor umbral (ó $\Delta E^*_{ab} = 10$). Un ejemplo es el sistema de ordenación del color RAL-Diseño (1993), que está basado en CIELAB, presentando diferencias de color entre muestras de $\Delta E^*_{ab} = 10$ para cualquier plano de tono, y para 36 tonos diferentes.

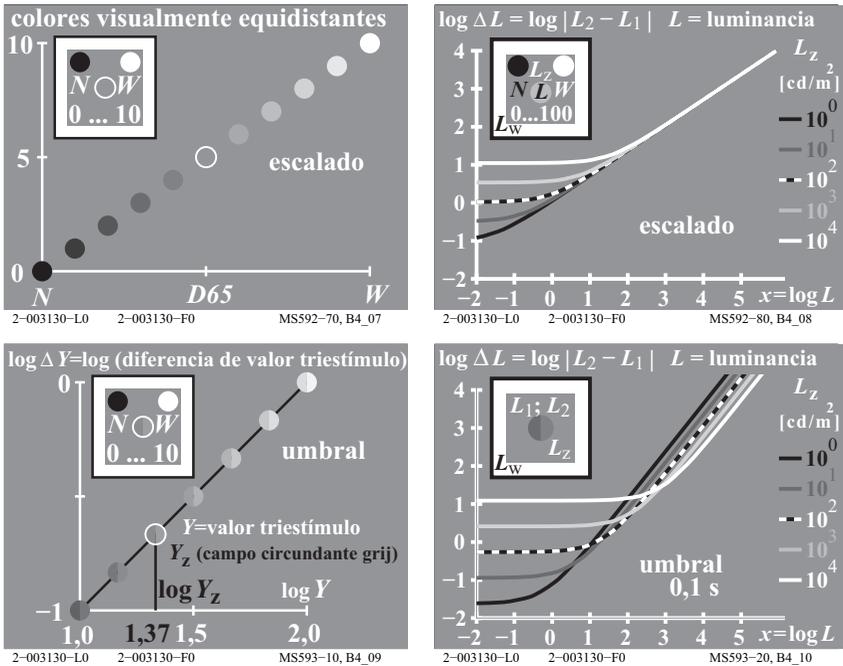


Fig. 57: Escalas de luminancia y umbrales para series de claridad N - Z - W.

La Figura 57 muestra experimentos y resultados de escalas de color y de umbrales de color en función de la luminancia L . En vez de la luminancia L también se puede utilizar el valor triestímulo Y , que representa la luminancia relativa y está siempre normalizado al valor 100 para el blanco. La fórmula

$$Y = 100 L/L_w$$

utiliza la luminancia L del campo central y la luminancia L_w del campo circundante (marco blanco exterior del montaje experimental, véase Figura 57).

La Figura 57 (arriba a la izquierda) muestra una escala de color (claridad) visualmente equiespaciada para un campo central cuya luminancia varía en dos regiones: $N - D65$ y $D65 - W$.

La Figura 57 (arriba derecha) muestra las diferencias de luminancia ΔL medidas en el campo central en función de la luminancia L de dicho campo. Se usa una escala logarítmica en ambos ejes. Se da también el parámetro luminancia del campo circundante. Por ejemplo, la curva en trazos sucesivos negros-blancos corresponde a una luminancia del campo circundante gris u de valor $L_z =$

100 cd/m². La luminancia $L_z = 100$ cd/m² corresponde a una iluminancia intermedia de 1500 lux (= $5 \cdot \pi \cdot 100$ lux). El factor cinco se ha utilizado en esta fórmula suponiendo un gris intermedio con un factor de reflexión 0,2.

La Figura 57 (*abajo a la izquierda*) muestra los resultados correspondientes a umbrales de color para una serie de grises. Considerando sólo una parte de la escala de grises completa y un campo central, se da la diferencia del valor triestímulo ΔY (proporcional a ΔL) en función del valor del valor triestímulo Y . El umbral ΔY es constante y un 1% del valor triestímulo Y del campo central. La pendiente constante de valor aproximadamente 1,0 (ó 0,9) está basada en la ley de *Weber-Fechner* $\Delta Y/Y = \text{constante}$ ó $\Delta L/L = \text{constante}$.

La Figura 57 (*abajo a la derecha*) muestra además los resultados para colores acromáticos muy oscuros y muy luminosos en un rango de luminancia de seis unidades logarítmicas (en la Figura 57 abajo, izquierda, se mostraba sólo un rango de una unidad logarítmica). El parámetro luminancia del campo circundante muestra especialmente el gran cambio del umbral del negro con la luminancia del campo circundante. Para valores pequeños de la luminancia L del campo central, se obtiene un umbral constante del negro ΔL_s ($s = \text{umbral}$). Diferencias de luminancia por debajo del valor ΔL_s no son visibles.

Una comparación entre las Figuras 57 derecha arriba y derecha abajo, nos muestra que las diferencias de luminancia para la escala de grises visualmente equiespaciada, ΔL_{escala} , y para los umbrales, $\Delta L_{\text{umbrales}}$, no son proporcionales a lo largo de una misma escala de grises. Las distintas pendientes (aproximadamente 0,9 y 0,45) conoboran esta afirmación. Se pueden explicar estas diferencias a lo largo de una escala de grises mediante dos procesos visuales diferentes en la dirección blanco-negro (véase *K. Richter* (1996)).

Además, también en la Figura 56 de la página 64, correspondiente a colores de una misma luminancia a lo largo de la serie *T - D65 - P*, esan necesarias dos pendientes diferentes para el escalamiento de diferencias deromaticidad, una para las escalas de color, $\Delta a_{\text{escalas}}$, y otra para los umbrales, $\Delta a_{\text{umbrales}}$.

Por el momento no existe un modelo de visión del color que permita describir satisfactoriamente tanto las escalas como los umbrales, así como las transiciones entre estas dos situaciones.

19 Colores elementales y tecnología de la información en color

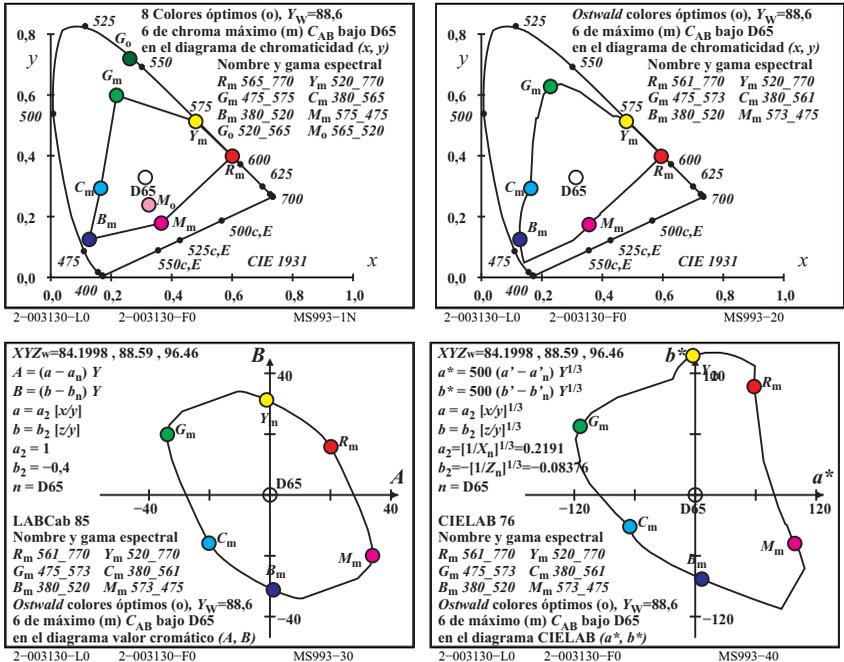


Fig. 58: Tres colores complementarios y todos los colores óptimos de chroma máximo.

La Figura 58 muestra tres pares de colores óptimos R_m-C_m , Y_m-B_m , y G_m-M_m . Los dos colores de cada par son complementarios; es decir, su mezcla (llamada **dicromática**) produce blanco, y por eso a esos colores se les llama también **colores dicromáticos**. Los valores cromáticos A y B , definidos en la Tabla 3 de la página 55, se muestran en la Figura 58 (abajo izquierda).

Para cada par de colores óptimos dicromáticos el valor cromático C_{AB} es el mismo. considerando todos los colores óptimos en el diagrama de valor cromático (A, B) se obtiene aproximadamente una elipse, en vez del triángulo del Diagrama deromaticidad estándar (x, y).

La antisimetría en el diagrama de valor cromático (A, B) es un requisito para una descripción eficiente de la igualdad del umbral para colores óptimos com-

plementarios. Con respecto a este resultado experimental de *Holtzmark y Valberg* (1969), véase la Figura 55 de la página 63.

Los colores óptimos dicromáticos, como por ejemplo R_m y C_m , incluyen para el rojo y cian-azul los rangos espectrales complementarios de 565 nm a 770 nm y de 380 nm a 565 nm (véase la descripción de la Figura 58, arriba izquierda). Por ejemplo, las longitudes de onda límites $\lambda_1=380$ nm y $\lambda_2=565$ nm están situadas junto con D65 aproximadamente sobre una línea recta.

El color cian-azul C_m del rango espectral 380 nm a 565 nm (*color mitad*) tiene el máximo valor cromático C_{AB} . Por ejemplo, con un color adicional espectral rojo con $\lambda_r=600$ nm se mezcla para dar un cian-azul blanquecino C_m , de modo que el valor cromático C_{AB} disminuye.

La Figura 58 (*arriba a la izquierda*) muestra además dos colores óptimos G_o y M_o , que producen un triángulo en el diagrama estándar de cromaticidad (x, y) junto con $RYCB_m$. El rango espectral de 495 a 565 nm correspondiente al color G_o es menor que el rango 475 a 575 nm (con límites de la longitud de onda compensatoria) del color G_m . El verde G_o es por lo tanto más oscuro que G_m . En el diagrama estándar de cromaticidad (x, y) la diferencia de cromaticidad entre G_o y D65 es mayor que la que hay entre G_m y D65. Sin embargo, para el valor cromático sucede lo contrario, de modo que se cumple que $C_{AB,G_o} < C_{AB,G_m}$.

Por lo tanto, el área de los colores básicos y mezcla en cualquier diagrama de cromaticidad no es apropiada para especificar la gama de colores. Sin embargo, el área de color en un diagrama de cromaticidad se utiliza a menudo para especificar la gama de colores en muchos estándares IEC e ISO. Una especificación más apropiada sería el valor cromático o área de croma.

Los resultados experimentales de *Miescher y Weisenhorn* (1961), con colores óptimos sobre un campo circundante blanco, han mostrado que los colores óptimos dicromáticos que tienen todos el máximo valor cromático, tienen al mismo tiempo el máximo croma. Sin embargo, en muchos casos el ancho de banda era un poco menor en comparación con el *color mitad* con longitudes de onda compensatoria límites.

La Figura 58 muestra todos los colores óptimos dicromáticos como una curva continua en el diagrama estándar de cromaticidad (x, y), en el diagrama de cromático (A, B) (*abajo a la izquierda*) y en el diagrama de CIELAB-croma (a^*, b^*) (*abajo a la derecha*). Todos estos colores óptimos complementarios tienen el máximo valor cromático C_{AB} (*abajo, izquierda*). Las longitudes de onda límites calculadas para D65 (*arriba, derecha*) varían ligeramente para los tres iluminantes de la CIE, D65, E y C (*arriba, izquierda*).

El sistema de color CIELAB, que se basa principalmente en las escalas del sistema de ordenación del color *Munsell*, requiere coordenadas no lineales.

Para la descripción de umbrales de color, como por ejemplo los modelos de visión del color de Guth (1972) se requieren sólo coordenadas lineales.

Todos los colores óptimos dicromáticos tienen el mismo valor cromático C_{AB} . En CIELAB, el croma de los colores óptimos dicromáticos en la zona del rojo-amarillo es aproximadamente dos veces mayor que el de la región complementaria cian-azul. Por lo tanto, la definición CIELAB de croma C^*_{ab} podría estar equivocada en un factor 2.

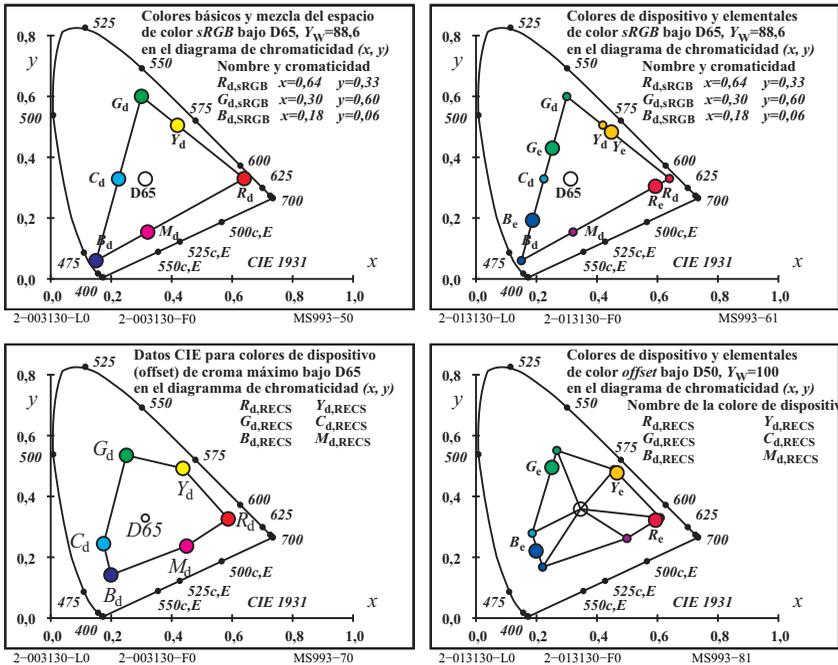


Fig. 59: Colores elementales y de dispositivo de los espacios de color sRGB y RECS (Offset).

La Figura 59 muestra (izquierda, arriba y abajo) los colores de dispositivo de una pantalla estándar sRGB, y del Sistema de Color Elemental Relativo RECS (estándar offset). Los tonos elementales independientes del dispositivo, $RYGB_{e3}$ que según CIE R1-47 tienen ángulos de tono CIELAB $h_{ab} = 26, 92, 162,$ y 272 grados (puntos más grandes) pueden ser mezclados a partir los seis colores de dispositivo $RYGCBM_d$ (d = dispositivo) (derecha, arriba y abajo).

En el Sistema de Color Elemental Relativo RECS hay aproximadamente 2000 colores, y un círculo de tono de 16 pasos con los cuatro tonos elementales

$RYGB_e$ como tonos de referencia (véase *RECS*). En cada uno de los cuatro sectores hay tres tonos intermedios. Para los 16 tonos hay series de colores de entre 5 y 16 pasos con impresión estándar offset en papel estándar offset.

20 Colores elementales de salida *independientes* del dispositivo

El informe CIE 1-47 asigna a los colores elementales ángulos de tono $h_{ab,e} = 26, 92, 162$ y 272 grados, lo que permite una salida de tonos independientes del dispositivo en cualquier dispositivo de color. La Figura 59 de la página 71 muestra la solución para el espacio de color *sRGB* (pantalla estándar) y para el espacio de color *RECS* (estándar offset). Para los datos visuales $rgb^*_e (1\ 0\ 0)_e, (1\ 1\ 0)_e, (0\ 1\ 0)_e$, y $(0\ 0\ 1)_e$, se generan los colores de dispositivo de croma máximo $C^*_{ab,d}$ con ángulos de tono $h_{ab,e} = 26, 92, 162$, y 272 grados, respectivamente. Esto conlleva valores de dispositivo específicos para la claridad L^*_d y el croma $C^*_{ab,d}$.

En un futuro próximo, además de la definición de los ángulos de tono en CIE-LAB, sería conveniente definir una claridad especial L^*_e y un croma especial $C^*_{ab,e}$ para los colores elementales. Una primera definición podría ser incluida en 2013 en el informe CIE R1-57 *Frontera entre colores negruzcos y luminosos* (Responsable: T. Seim, Noruega).

Para el iluminante D65 los colores óptimos dicromáticos (subíndice oe) con el máximo valor cromático, $C_{AB,oe}$, y con ángulos de tono elementales CIELAB $h_{ab,oe} = 26, 92, 162$, y 272 grados, se pueden situar en la frontera *ni negruzco ni luminoso*. Estos colores tienen las siguientes claridades L^*_{oe} y cromas $C^*_{ab,oe}$ independientes del dispositivo:

Color	rgb^*_{oe}	L^*_{oe}	$C^*_{ab,oe}$	$h_{ab,oe}$	x_{oe}	y_{oe}	Y_{oe}
R_e	1 0 0	75	65	26	0,57	0,33	48
Y_e	1 1 0	89	136	92	0,47	0,51	73
G_e	0 1 0	79	120	162	0,19	0,52	55
B_e	0 0 1	60	69	272	0,17	0,19	25

No se sabe si los colores óptimos aquí calculados están situados en la frontera visual *ni negruzco ni luminoso*. El color rojo *fluorescente* que se imprimió en la Figura 28 de la página 30 y que aparece como luminoso está por encima de esta frontera.

Con pantallas y software especiales podemos quizá alcanzar los datos *naturales* de color LCh^*_{oe} en CIELAB, para la luminancia estándar en pantallas de 142

cd/m². Esta luminancia es requerida para la iluminancia estándar de 500 lux en oficinas, y para el papel blanco de impresión con offset cuyo factor de reflectancia estándar es $R(\lambda)=0,886$.

Para objetos de color (sin fluorescencia ni retrorreflexión) parece imposible alcanzar los valores CIELAB del verde G_c y el azul B_c . La forma de los factores de reflectancia de estos objetos de color es bastante diferente de la de los factores de reflexión de los colores óptimos que se pretenden lograr (véase Figura 26 de la página 28).

21 Reproducción afin del color

En la tecnología de la imagen en color, para cualquier plano de tono constante, la gama de colores está limitada aproximadamente por el triángulo *blanco - color de máxima cromaticidad - negro*. Tanto en pantallas como en impresión, en el borde de este triángulo hay aproximadamente una mezcla aditiva de colores. Los más importante son soluciones para la reproducción del color en los bordes y en el interior del citado triángulo.

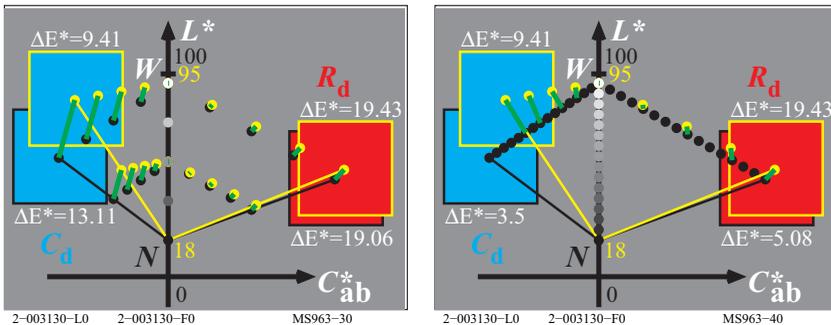


Fig. 60: Reproducción afin del color y mínima diferencia de color ΔE^*_{ab} .

La Figura 60 muestra la reproducción afin del color (*izquierda*) y una reproducción con la mínima diferencia de color ΔE^*_{ab} (*derecha*) entre colores de pantalla (puntos amarillos) y colores de impresión estándar (puntos negros).

La Figura 60 (*izquierda*) muestra que, para el tono cian-azul, el 20% de los colores de pantalla y el 30% de los colores de impresión están fuera del área común de reproducción. La reproducción afin del color utiliza toda la gama de color de ambos dispositivos.

La Figura 60 (*derecha*) muestra la solución actual de la mayoría de los métodos de gestión del color. El objetivo es la mínima diferencia de color ΔE^*_{ab} . En este caso no se usa el 30% del área de impresión cian-azul. El estándar de gestión

del color *ICC* permite soluciones específicas para cada empresa y, por lo tanto, se pueden generar una gran variedad de salidas, por ejemplo con cartas de prueba de acuerdo con DIN 33872-1 a -6, véase <http://www.ps.bam.de/33872E>

Para cuestiones de salida de un formato DIN relleno (busque muchos otros cerca) véase <http://130.149.60.45/~farbmetrik/LE95>

Cualquier usuario puede preguntar al fabricante del dispositivo soluciones de acuerdo con DIN 33872-1 a -6 u otros estándares internacionales como, por ejemplo, ISO/IEC 15775.

Este artículo pretende haber mostrado que son posibles tanto la reproducción de tono independiente del dispositivo como la reproducción afín. En la reproducción del color independiente del dispositivo, un posible próximo paso puede estar basado en los datos CIE de la Figura 58 de la página 69 para colores óptimos de máximo valor cromático y en la sección

22 Referencias

Estándares y publicaciones similares

CIE 13.3:1995, Método de medida y especificación del rendimiento en color de fuentes de luz.

CIE 15: 2004, Colorimetría, tercera edición.

CIE 170-1:2006, Diagrama de cromaticidad fundamental con ejes fisiológicos.

CIE R1-47:2009, Ángulos de tono de los colores elementales, véase

<http://div1.cie.co.at/> ISO 11664-4:2008(E)/CIE 014-4/E:2007, Estándar conjunto ISO/CIE: Colorimetría — Parte 4: Espacio de color CIE 1976 $L^*a^*b^*$.

DIN 33872-1 a -6 (2010), Tecnología de la información - Máquinas de oficina - Método de especificación de la reproducción relativa de color con criterios de SI/NO, véase

<http://www.ps.bam.de/33872E>

ISO/IEC TR 24705 (2005), Tecnología de la información - Máquinas de oficina - Método de especificación de la reproducción relativa de color con criterios de SI/NO, véase

<http://www.ps.bam.de/24705TE/>

Publicaciones de autores

Evans, R. M. and S. B. Swenholt (1967), Chromatic Strength of Colors; Dominant Wavelength and Purity, *J. opt. Soc. Amer.* 57, S. 1319-1324

Holtzmark, T. and Valberg, A. (1969), Colour discrimination and hue, *Nature*, Volume 224, October 25, S. 366-367.

Miescher, K. (1948), Neuermittlung der Urfarben und deren Bedeutung für die Farbordnung, *Helv. Physiol. Acta* 6, C12-C13

- Miescher, K., Richter, K., and Valberg, A. (1982), Color and Color Vision, Description of Experiments in the Science of Colour, Farbe + Design, no. 23/24
- Newhall, S.M., D. Nickerson and D.B. Judd (1943), Final report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors. J. opt. Soc. Amer. 33, S. 385-418
- Richter, K. (1979), BAM-Forschungsbericht Nr. 61, Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbsystems, 99 pages, ISSN 0172-7613
- Richter, K. (1980), Cube root colour spaces and chromatic adaptation, Color Research and Application 5, no. 1, pages 25-43
- Richter, K. (1985), BAM-Forschungsbericht Nr. 115, Farbempfindungsmerkmal Elementarabstimmung und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld, 118 Seiten, ISBN 3-88314-420-7
- Richter, K. (1996), Computergrafik und Farbmetrik - Farbsysteme, PostScript und geräteunabhängige CIE-Farben, VDE-Verlag, 288 pages with about 500 colour figures and many additional references, see <http://www.ps.bam.de/buche>
- Richter, K. (2011) ISO-CIE trend for the description of colour threshold data by new coordinates based on the device independent elementary colour coordinates of the report CIE R1-47:2009, se http://130.149.60.45/~farbmetrik/CIE_ISO_10.PDF
- Valberg, A. (2005), Light, Vision, Color, Wiley, ISBN 0470 849037, 462 pages.

23 Agradecimientos

La Fundación *Karl Miescher* para el sostenimiento de la ciencia del color ha apoyado la impresión en offset de este libro en alemán e inglés, así como versiones para internet en otros idiomas.

Desde el año 2000, los profesores H. Kaase y S. Voelker han apoyado continuamente la exposición *El Color y la Visión de Color* en el Departamento de Tecnología de la Iluminación de la Universidad Técnica de Berlín (TU).

Observaciones sobre la historia de la exposición El Color y la Visión de Color

Durante los años 1963/64 la exposición *El Color y la Visión de Color* fue desarrollada por K. Richter bajo el liderazgo del Dr. *Karl Miescher* en el Laboratorio de Métrica del Color del Instituto de Física de la Universidad de Basilea (Suiza). Esta exposición sobre el color estuvo abierta seis meses durante la *Exposición Nacional Suiza Expo 64*, celebrada en Lausana (Suiza). Después de *Expo 64*, la exposición estuvo abierta durante 30 años en la Escuela Superior de Matemáticas y Ciencias de Basilea.

En el año 2000, la exposición fue reconstruida con el apoyo económico de la Fundación *Karl Miescher* en la Universidad Técnica de Berlín. En Berlín, K.

Richter ha ampliado continuamente la exposición con algunos nuevos avances en el campo de la tecnología de la información en color. Desde el año 2000, muchos estudiantes y personas interesadas sobre el color han visitado la exposición.

Notas sobre las ediciones anteriores y la edición 2012

En 1964 salió la primera edición, sin figuras en color, y en los idiomas alemán, francés e italiano, con motivo de la *Exposición Nacional Suiza Expo 64*, celebrada en Lausana.

Después de la segunda edición de 1978, en 1982 se publicó la tercera edición, con 50 figuras en color, en la revista de color *Color + Diseño* en alemán y en inglés. Además se hizo una impresión especial en alemán e inglés. El *Prof. Dr. Arne Valberg*, Trondheim (Noruega), fue coautor de esta edición.

La cuarta edición sale a la luz en 2012 y contiene 135 figuras en color, que además muestran nuevos avances en el campo de la tecnología de la información en color. Contiene versiones para la salida en impresión offset, pantalla, e impresora, así como versiones para internet en alemán y en inglés. Además se pretende hacer versiones para internet en los idiomas francés, español e italiano. Para la descarga de las últimas ediciones de internet y la solicitud de versiones en offset, véase

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/color>

Objetivo y aplicaciones de la impresión especial 2012

Las impresiones especiales sirven para fines educativos, así como para introducirse en el campo de la ciencia del color. Hay distintos campos de aplicación del color que están conectados entre sí, sin el soporte de conocimientos básicos sobre el color, sólo sobre la base de algunos conocimiento técnicos; por ejemplo:

- Fundamentos de la visión y propiedades de la visión en color;
- Medida del color y métrica del color;
- *Sistema de Color Elemental Relativo (RECS)* en la tecnología de la información en color.

Para estudios adicionales, se recomienda usar un libro sobre color (sólo en alemán) titulado *Gráficos en ordenador y colorimetría: Sistemas de color, Postscript, y colores CIE independientes del dispositivo*. Este libro fue editado por VDE-Verlag en 1996, y contiene descripciones de unas 500 figuras en color en alemán e inglés. Las figuras en color se pueden utilizar separadamente para fines educativos. Los archivos en formato PDF de este libro así como las figuras en color están disponibles para descarga gratuita en

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/buche.html>

A petición de los interesados, la Secretaría del Departamento de Tecnología de la Iluminación de la Universidad Técnica de Berlín puede organizar visitas

guiadas a la exposición *Color y Visión del Color*, véase <http://www.li.tu-berlin.de>.

Derechos de autor de la cuarta edición de *Color y Visión del Color*:
Prof. Dr. Klaus Richter,
Walterhoeferstrasse 44, D-14165 Berlín, Alemania.
Internet: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/>
Fax: +49 30 84509039.
Correo electrónico: klaus.richter@me.com

24 Test charts and technical Remarks

The following text version in Spanish is old. A new version is only available in English and this version is presented after the old version in Spanish

Dos cartas de prueba de las cubiertas anterior y posterior:

PS7311S:

Círculos de tono elementales de 16 y 8 pasos con sus colores elementales según CIE R1-47 y DIN 33872-1 a 6.

PS9311S:

Escalas de color de 5 y 16 pasos para el tono elemental rojo Re según CIE R1-47 y DIN 33872-4.

Seis cartas de prueba del anexo:

PS1311S: Carta de prueba 1 para rendimiento de color con 54 colores del sistema de color RECS.

PS2311S: Carta de prueba 2 para rendimiento de color con colores metámeros para D65 y D50.

PS3311S:

Carta de prueba 3 para rendimiento de color con colores metámeros para A y P4000.

PS4300S:

1080 colores para la medida del color y gestión de salida, comienzo de salida.

PS4310S/PE4311S:

1080 colores para la medida del color con una linealización 3D para la salida de color de dispositivo **y de elemental**.

RE9810S:

Carta de prueba acromática conforme a ISO/IEC 15775, ISO/IEC 24705, e ISO 9241-306, Anexo D.

RE9711S:

Carta de prueba cromática con una imagen ISO/IEC conforme a ISO/IEC 15775, ISO/IEC 24705, e ISO 9241-306, Anexo E propuesto.

Observaciones técnicas sobre la Tabla de la parte interior de la cubierta trasera:

Para un círculo de tono de 48 pasos, la Tabla muestra en la columna 2 los datos de entrada rgb y los datos de medida del color en CIELAB: $LabCh^*$. En la columna 3 los datos están interpolados para el número par más próximo de ángulo de tono CIELAB, $h_{ab,i}$ ($0 < i < 360$). El sistema RGB_s ($s = \text{estándar}$) relaciona los datos rgb_s $(1\ 0\ 0)_s$, $(1\ 1\ 0)_s$, $(0\ 1\ 0)_s$, $(0\ 1\ 1)_s$, $(0\ 0\ 1)_s$, y $(1\ 0\ 1)_s$ con los ángulos de tono de 30, 90, 150, 210, 270, y 330 grados, respectivamente. Análogamente, de acuerdo con CIE R1-47, los ángulos de tono de 26, 92, 162, 217, 272, y 329 grados están relacionados con los ángulos del sistema de color elemental. Además, para ambos sistemas los datos CIELAB están interpolados en función del ángulo de tono i . Según DIN 33872-1, para cualquier conjunto de datos rgb (excepto $r = g = b$) se cumple que:

$$i = 360 \operatorname{atan} \left\{ \frac{[r \sin(30) + g \sin(150) - b \sin(270)]}{[r \cos(30) + g \cos(150)]} \right\}$$

El índice i genera a partir de dos Tablas con el ángulo i comprendido entre 0 y 360 grados, los datos CIELAB $LabCh^*$, y los datos rgb correspondientes para la salida del color de dispositivo o el color elemental.

En las aplicaciones, los datos de color CIELAB que se desean son calculados para cualquier ángulo de tono i a partir de los datos CIELAB $LabCh^*$ de colores con croma C^*_{ab} máximo, y del blanco W y el negro N . Para generar un determinado color, los datos rgb_{dd} (salida de dispositivo a dispositivo) y rgb_{de} (salida de dispositivo a elemental) utilizan una linealización 3D en el espacio de color CIELAB.

A new version of the preceding chapter *Dos cartas de prueba de las cubiertas anterior y posterior* is only available in English. We hop that we can translate the following text from English into Spanish soon.

We hop that we can translate the following new English version into Spanish soon.

Names of the test charts with 7 characters,

Examples: *PE40S0S*, *PG70IIS*, *PS73IIL*, *PF46IIP*, *PG79IIP*

The first character describes a large file folder (here P). The second describes the language (E=English, G=German, F=French, S=Spanish, I=Italian).

The following two numbers include the range 00 to 99. The last number 0 produces the output of an $sRGB$ display. The last numbers 3 or 6 define an output in offset print on the paper L with the two separations $CMYK$ and $CMY0$. The last number 9 defines a printer output on the paper A (=APCO) with the separation $CMYK$.

The following two letters *S0* define a start output (*S0*) with mixed *rgb* and *cmk* data in the file. Or the two numbers *00* or *01* define an *rgb* transfer for the output of device colours (*00*) or elementary colours (*01*). Or the two numbers *10* and *11* define an *rgb-3D* linearisation for the output of device colours (*10*) or elementary colours (*11*).

The last letter *S*, *L*, or *P* defines the output of an *sRGB* display (*S*), or in offset print on paper *L* (*L*), or of a printer on the paper *A* (*P*).

Test chart on the front cover

PS7011S, PS7311L, PS7911P:

16 and 8 step elementary hue circle with the elementary colours according to CIE R1-47 and DIN 33872-1 to 6

Test charts in the annex

1. Output *S* without separation and *L* and *P* with the separation *CMYK*

PS1011S, PS1311L, PS1911P:

Test chart 1 for colour rendering with 54 colours of the *RECS*-colour system.

PS40S0S, PS4000S, PS4001S, PS4010S, PS4011S

PS43S0L, PS4300L, PS4301L, PS4310L, PS4311L

PS49S0P, PS4900P, PS4901P, PS4910P, PS4911P:

1080 colours for colour measurement and for the steering of the output.

TS7011S, TS7311L, TS7911P:

Achromatic test chart according to *ISO/IEC 15775*, *ISO/IEC TR 24705* and *ISO 9241-306*, Annex D.

TS8011S, TS8311S, TS8911S:

Chromatic test chart with an *ISO/IEC* image according to *ISO/IEC 15775*, *ISO/IEC TR24705* and *ISO 9241-306*, annex E.

2. Outputs *L* and *P* with the separation *CMY0*

PS46S0L, PS4600L, PS4601L, PS4610L, PS4611L

PS46S0P, PS4600P, PS4601P, PS4610P, PS4611P:

1080 colours for colour measurement and for the steering of the output

3. Outputs *L* and *P* with the two separations *CMYK* and *CMY0*

PS2311L, PS2311P:

Test chart 2 for colour rendering with metameric colours for D65 and D50.

PS3311L, PS3311P:

Test chart 3 for colour rendering with metameric colours for A and P4000,

Test charts on the inner back cover

PS91S0S, PS91S0L, PS91S0P:

Table with CIE data of a 48 step colour circle.

PS9011S, PS9311L, PS9911L:

5 and 16 step colour series for the elementary colour rot R_e according to DIN 33872-4.

Technical remarks about the table at the inner back cover:

For a 48 step hue circle the table shows in column 2 the rgb input data and CIE-LAB-colour measurement data $LabCh^*$. In column 3 the data are interpolated for the next even number of a CIELAB-hue angle h_{ab} ($0 < i=h_{ab} < 360$). The rgb_s -system (s=standard) relates the rgb_s -data $(1\ 0\ 0)_s$, $(1\ 1\ 0)_s$, $(0\ 1\ 0)_s$, $(0\ 1\ 1)_s$, $(0\ 0\ 1)_s$, and $(1\ 0\ 1)_s$ to the hue angles 30, 90, 150, 210, 270, and 330 degrees. Similar according to CIE R1-47 the rgb_e -system (e=elementary) relates the rgb_e -data $(1\ 0\ 0)_e$, $(1\ 1\ 0)_e$, $(0\ 1\ 0)_e$, $(0\ 1\ 1)_e$, $(0\ 0\ 1)_e$, and $(1\ 0\ 1)_e$ to the hue angles 26, 92, 162, 217, 272, and 329 degrees.

In addition for example for the sRGB system the output of the file

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/RE69/RE69L0NP.PDF>

produces the CIELAB data as function of the hue angle i ($0 \leq i \leq 360$). For any rgb -data set (except $r=g=b$) it is valid according to DIN 33872-1:

$$i = 360 \operatorname{atan} \left\{ \frac{[r \sin(30) + g \sin(150) - b \sin(270)]}{[r \cos(30) + g \cos(150)]} \right\}$$

The index i produces tables with the angle i between 0 and 360 degree, and the CIELAB-data $LabCh^*$, and the related rgb data for the device colour or the elementary colour output system.

In applications the intended CIELAB-colour data are calculated for any hue angle i from the CIELAB data $LabCh^*$ of colours with maximum chroma C_{ab}^* , and of white W and black N . To produce an intended colour the data rgb_{dd} (device to device output) and rgb_{de} (device to elementary output) use a 3D-linearization in the CIELAB-colour space.

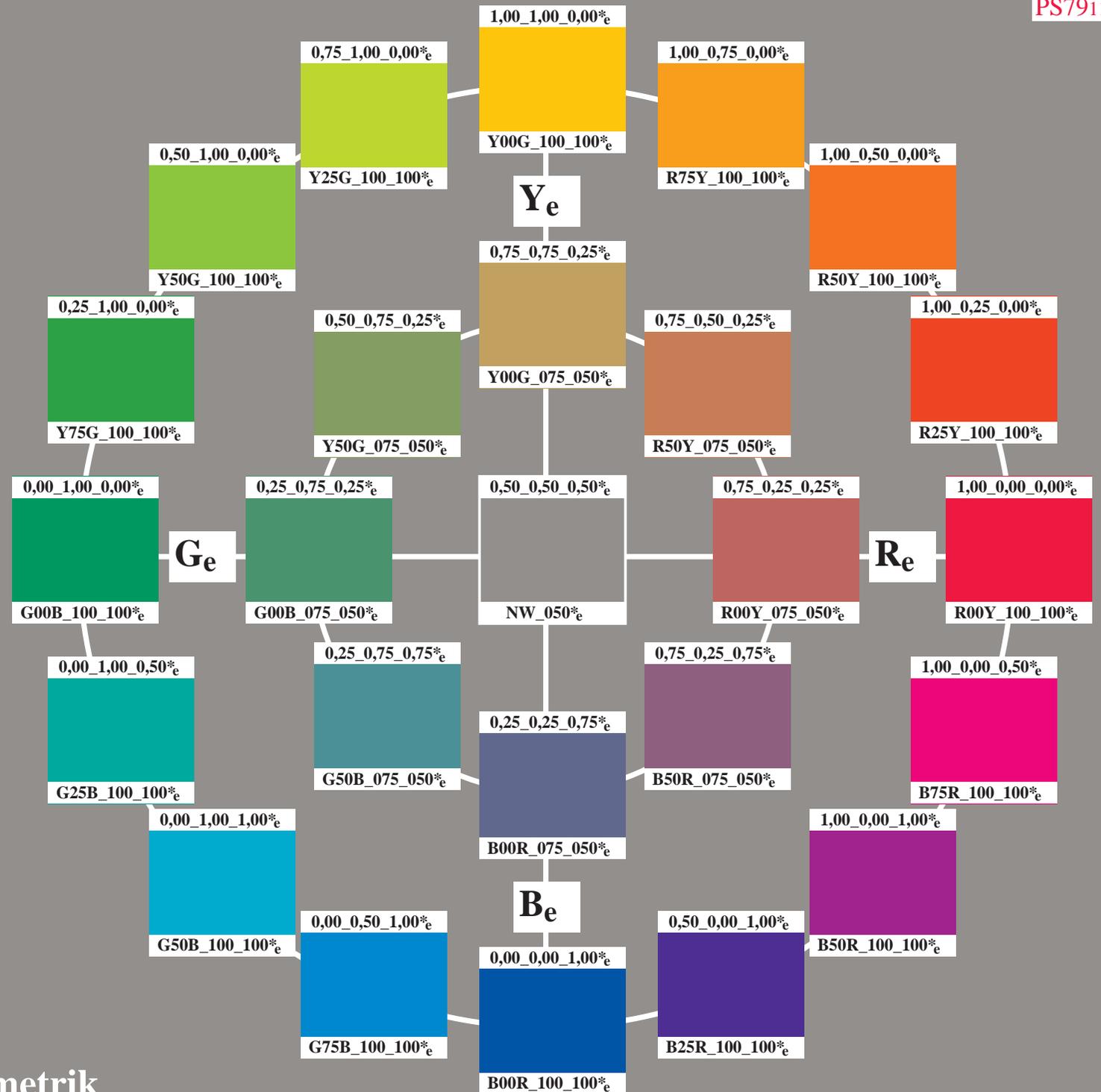
For more information on output linearization of displays, offset print and printers see a so called “white report” for a draft standard document on output linearization

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/outlin>

The reportership report CIE R8-09:2015 is an extended summary of this report on output linearization, and includes many examples for applications.

Color e Visión del Color

Colores Elementales en la Tecnología de la Información



Test chart 1 for color rendering: 54 standard colours for D65; laser printer (CMYK); rgb->rgb*de

Series:
maximum
m

maximum
m

whitish
w

central
z

blackish
n

grey
g



01: R00Y_100_100_e 02: R25Y_100_100_e 03: R50Y_100_100_e 04: R75Y_100_100_e 05: Y00G_100_100_e 06: Y25G_100_100_e 07: Y50G_100_100_e 08: Y75G_100_100_e 09=10: G00B_100_100_e



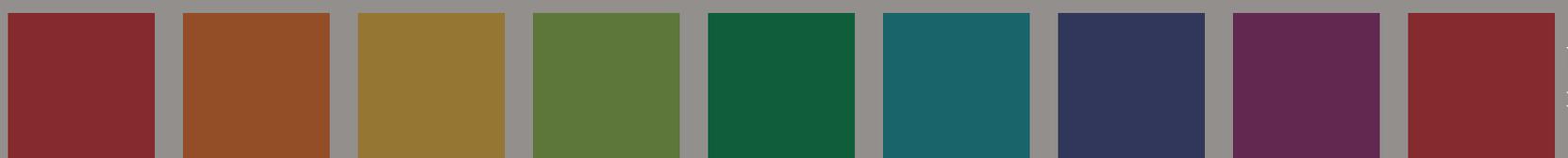
10: G00B_100_100_e 11: G25B_100_100_e 12: G50B_100_100_e 13: G75B_100_100_e 14: B00M_100_100_e 15: B25R_100_100_e 16: B50R_100_100_e 17: B75R_100_100_e 18=01: R00Y_100_100_e



19: R00Y_100_050_e 20: R50Y_100_050_e 21: Y00G_100_050_e 22: Y50G_100_050_e 23: G00B_100_050_e 24: G50B_100_050_e 25: B00R_100_050_e 26: B50R_100_050_e 27=19: R00Y_100_050_e



28: R00Y_075_050_e 29: R50Y_075_050_e 30: Y00G_075_050_e 31: Y50G_075_050_e 32: G00B_075_050_e 33: G50B_075_050_e 34: B00R_075_050_e 35: B50R_075_050_e 36=28: R00Y_075_050_e



37: R00Y_050_050_e 38: R50Y_050_050_e 39: Y00G_050_050_e 40: Y50G_050_050_e 41: G00B_050_050_e 42: G50B_050_050_e 43: B00R_050_050_e 44: B50R_050_050_e 45=37: R00Y_050_050_e

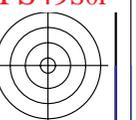


46: NW_000_e 47: NW_013_e 48: NW_025_e 49: NW_038_e 50: NW_050_e 51: NW_063_e 52: NW_075_e 53: NW_088_e 54: NW_100_e

vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS19/PS19.L0FP.PDF> /PS
información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS19/PS19L0FP.PDF /PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn* (CMYK)
TUB material: code=thad4ta

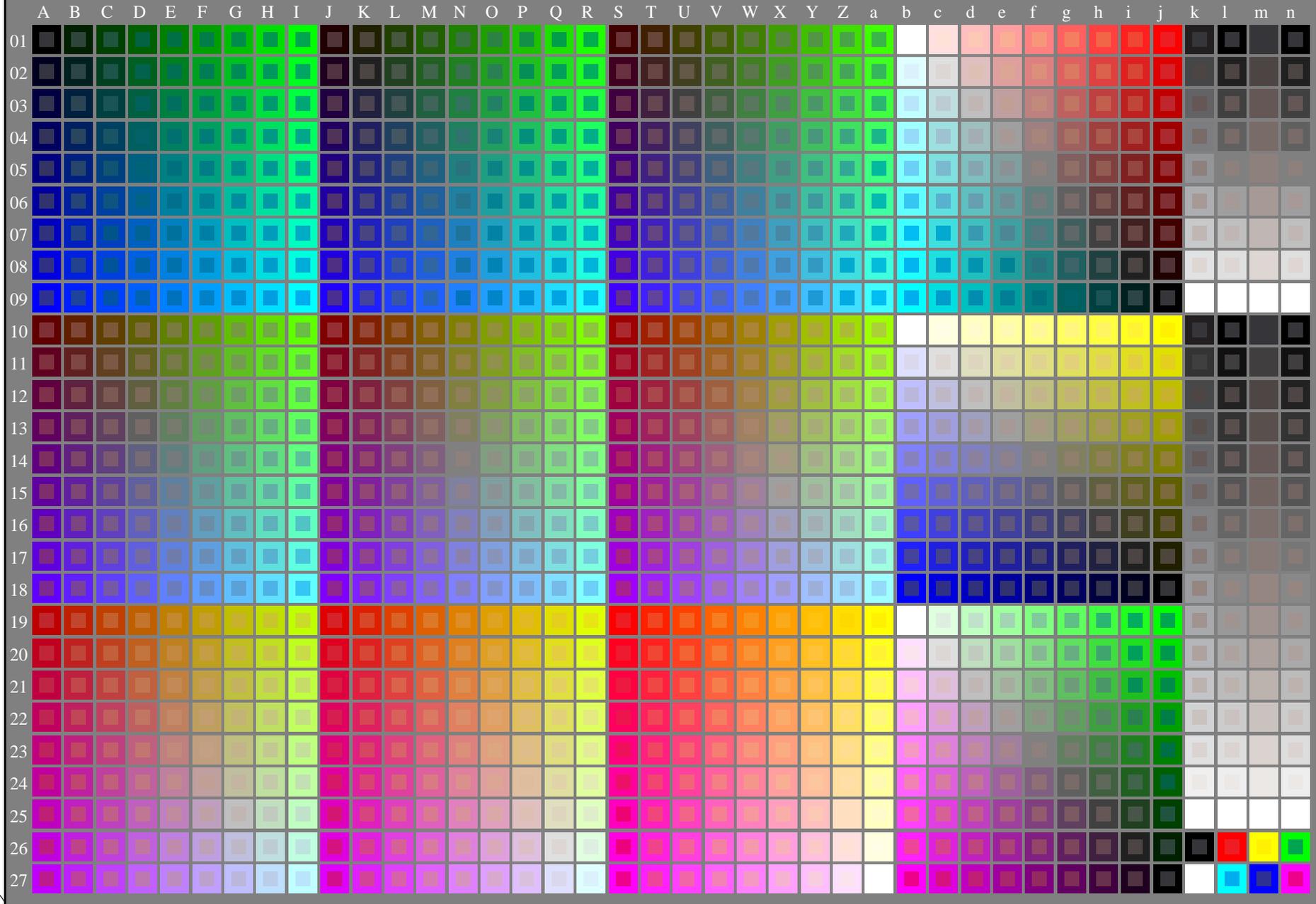
http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS49/PS49L0NP.PDF /.PS; comience salida
N: ninguna 3D-linealización (OL) en archivo (F) o PS-startup (S), página 1/2



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS49/PS49.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS49/PS49L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser

TUB material: code=thad4ta



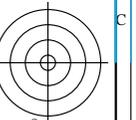
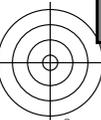
2-003030-L0

PS490-7N

Test chart G with 1080 colours; 9 or 16 step colour scales; data in column (A-n): *rgb* (A_j+k26_n27), 000n (k), w (l), nnn0 (m), www (n) + *cmy0*(all)

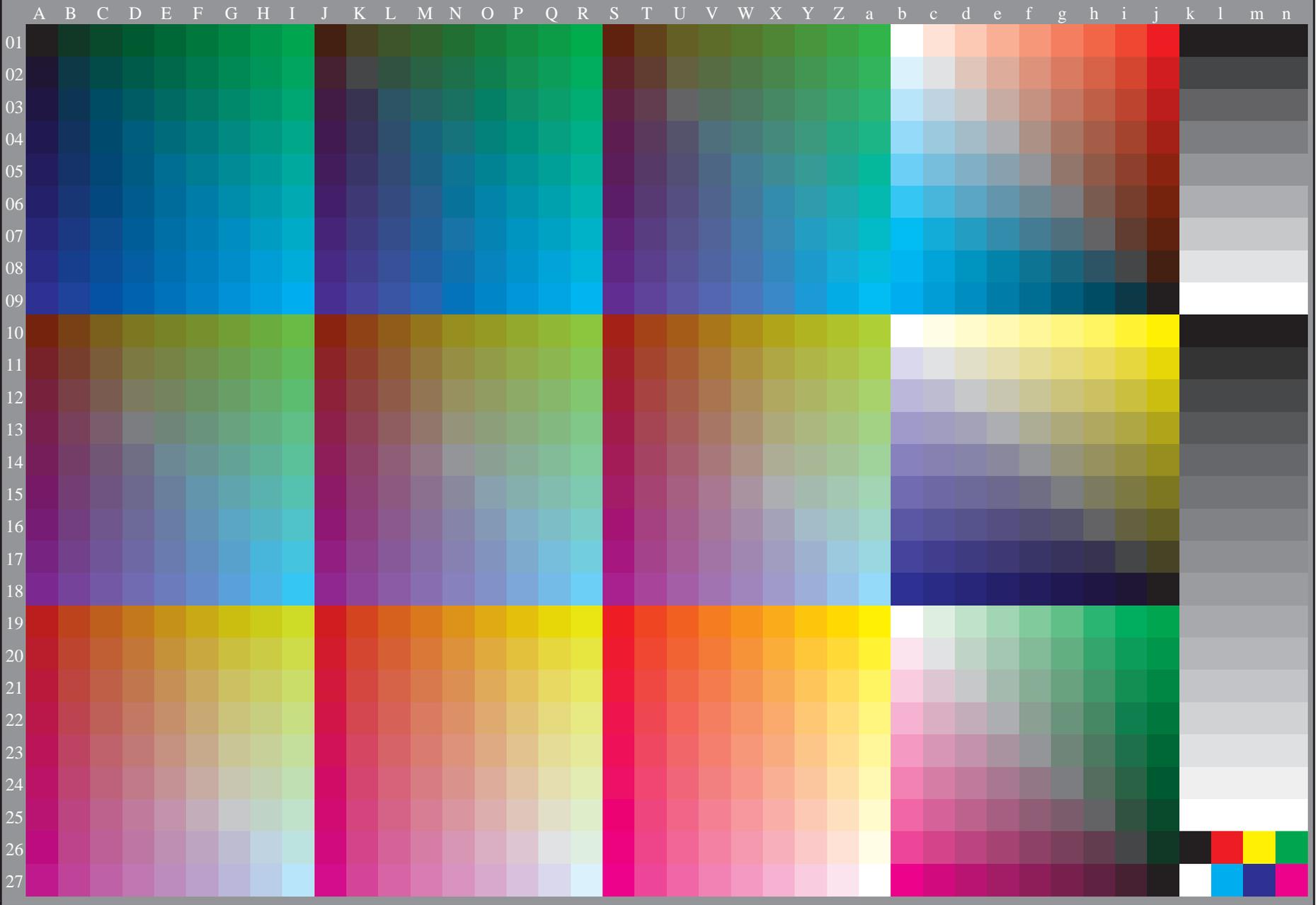
gráfico TUB-PS49; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar; tecnología de imagen

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb/cmyk*
salida: ningún cambio



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS49/PS49.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS49/PS49L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6 (CMYK)
TUB material: code=thad4ta



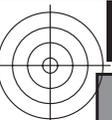
2-003130-L0

PS490-70

gráfico TUB-PS49; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=0, de=0, cmyk

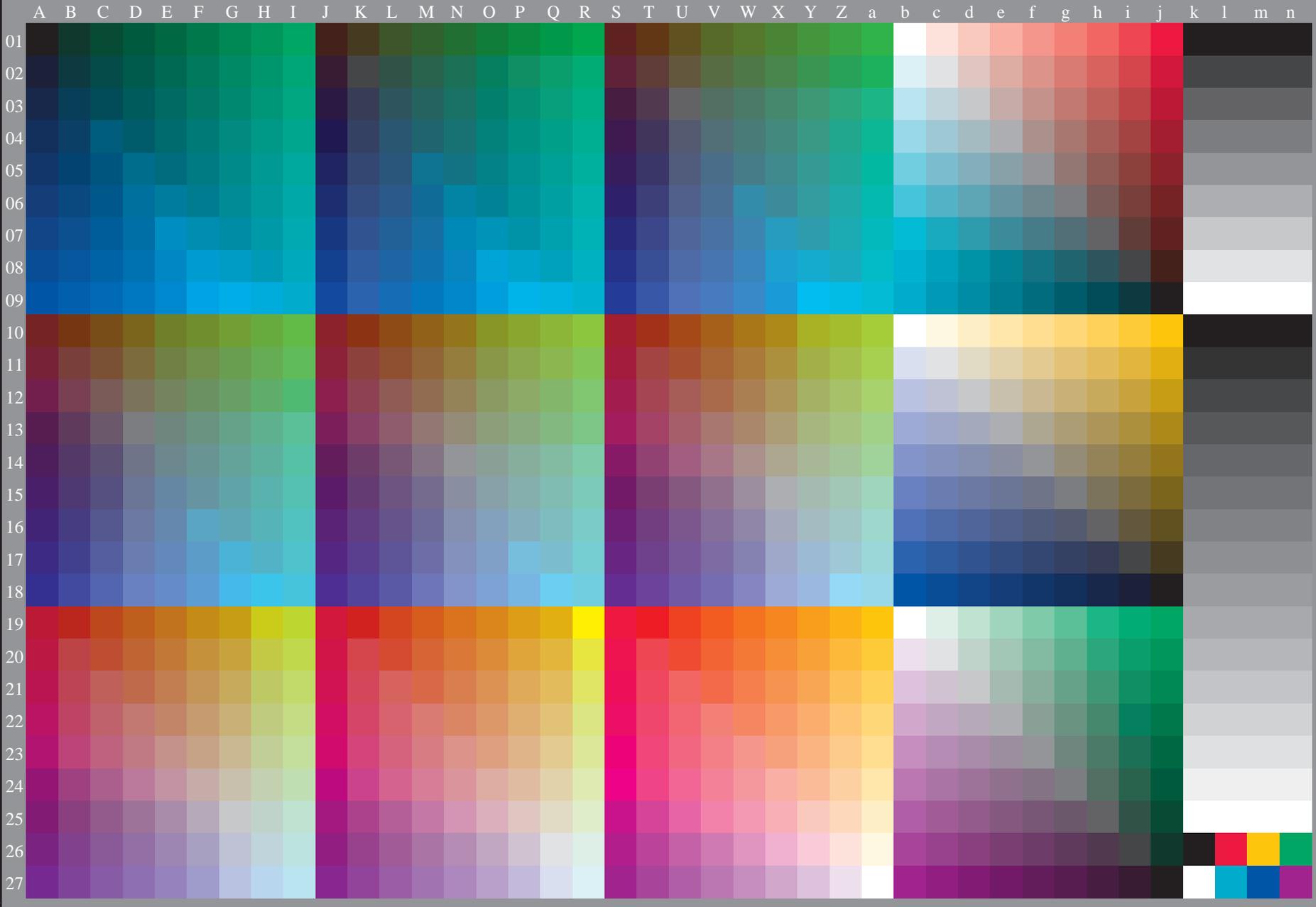
entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb_d*
salida: transfiera a *cmyk_d*

2-003130-F0



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS49/PS49.PDF>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS49/PS49L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6 (CMYK)
TUB material: code=thad4ta



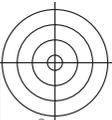
2-013130-L0

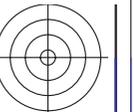
PS490-71

gráfico TUB-PS49; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=0, de=1, cmyk

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgbe*
salida: transfiera a *cmyke*

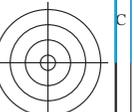
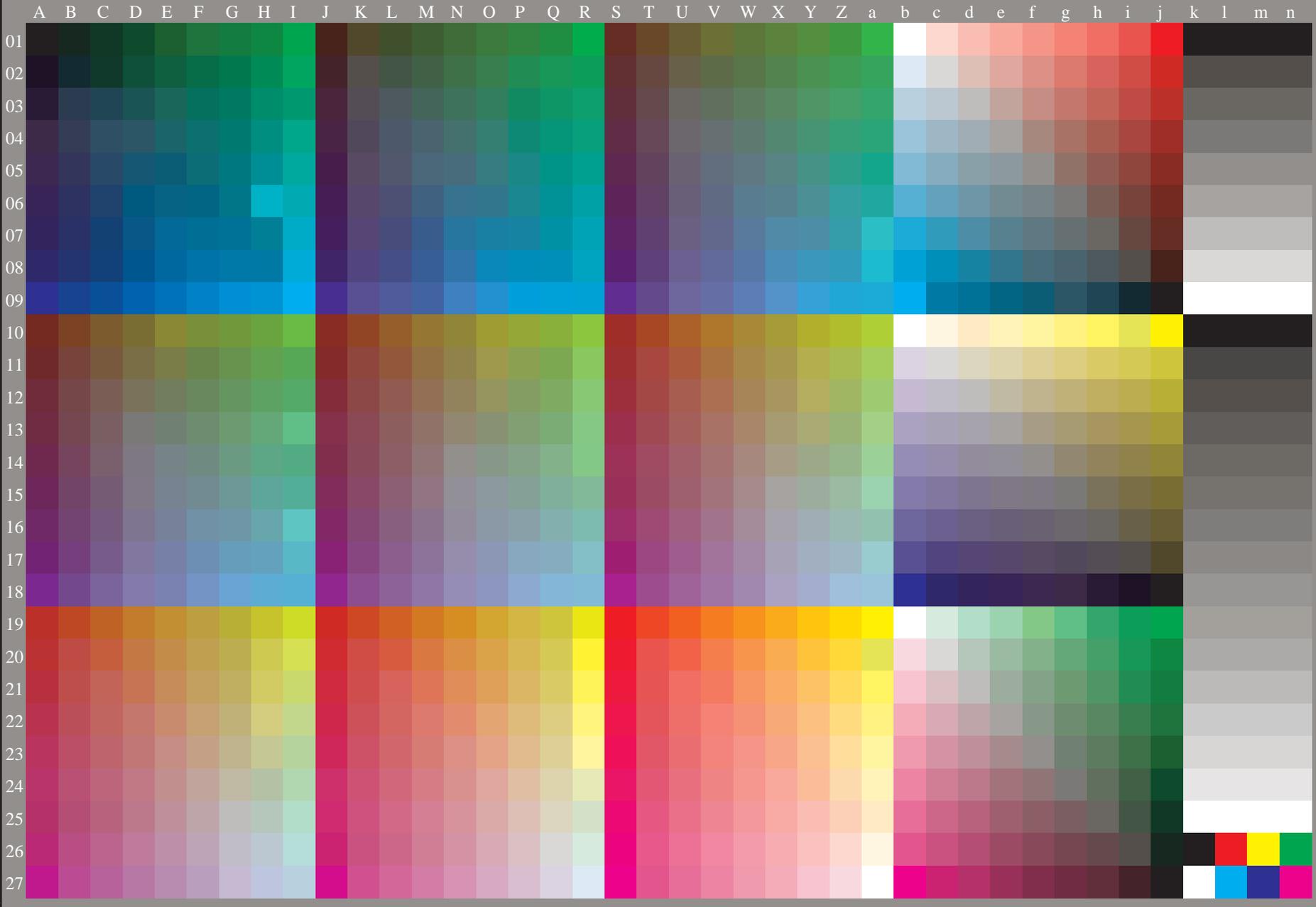
2-013130-F0





vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS49/PS49.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS49/PS49L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6* (CMYK)
TUB material: code=thad4ta



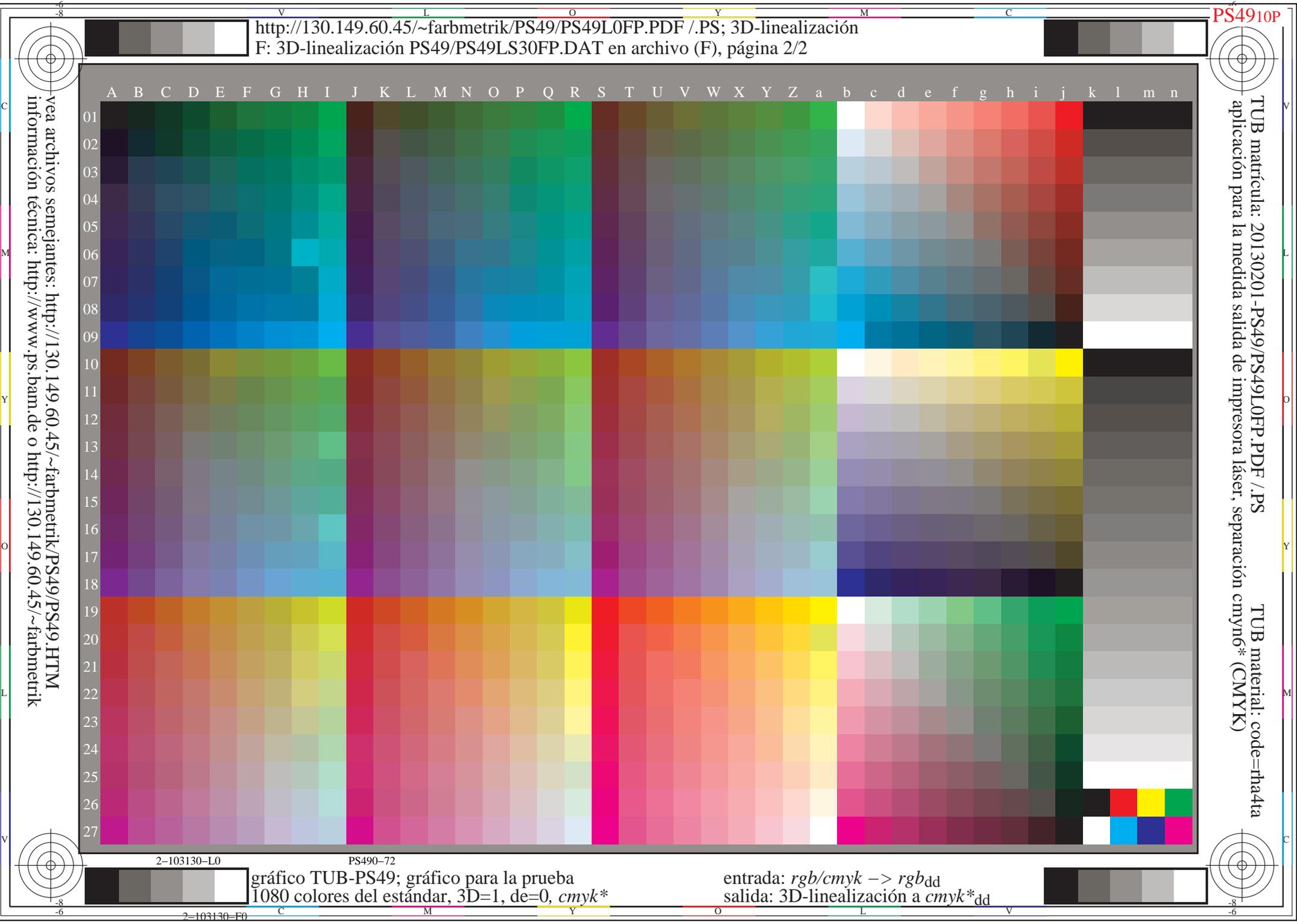
2-103130-L0

PS490-72

gráfico TUB-PS49; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=1, de=0, cmyk*

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb_{dd}*
salida: 3D-linealización a *cmyk_{dd}**

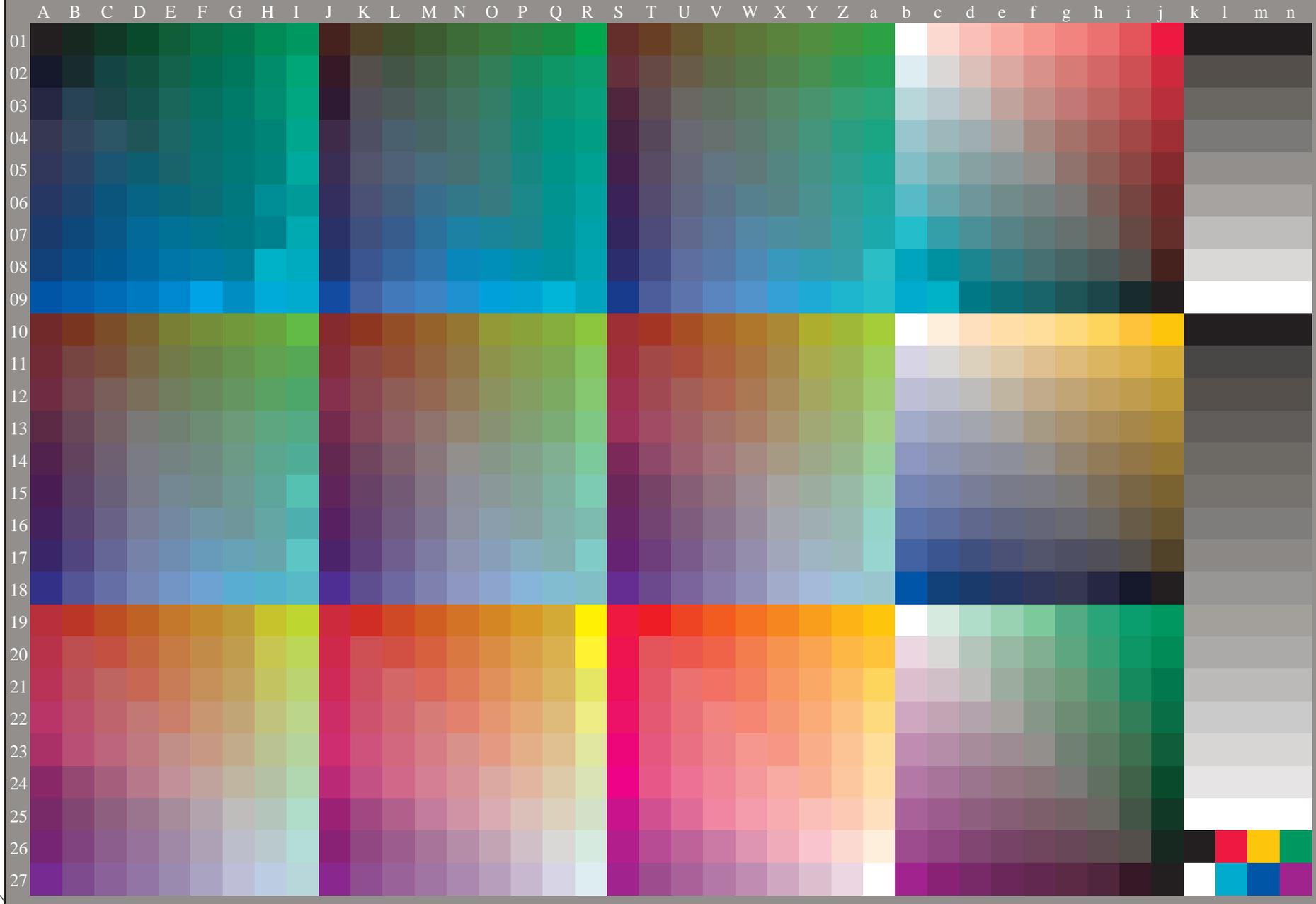
2-103130-F0





vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS49/PS49L0FP.PDF> / .PS
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS49/PS49L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6* (CMYK)
TUB material: code=rh44ta



2-113130-L0

PS490-73

gráfico TUB-PS49; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=1, de=1, cmyk*

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb*_{de}
salida: 3D-linealización a *cmyk**_{de}

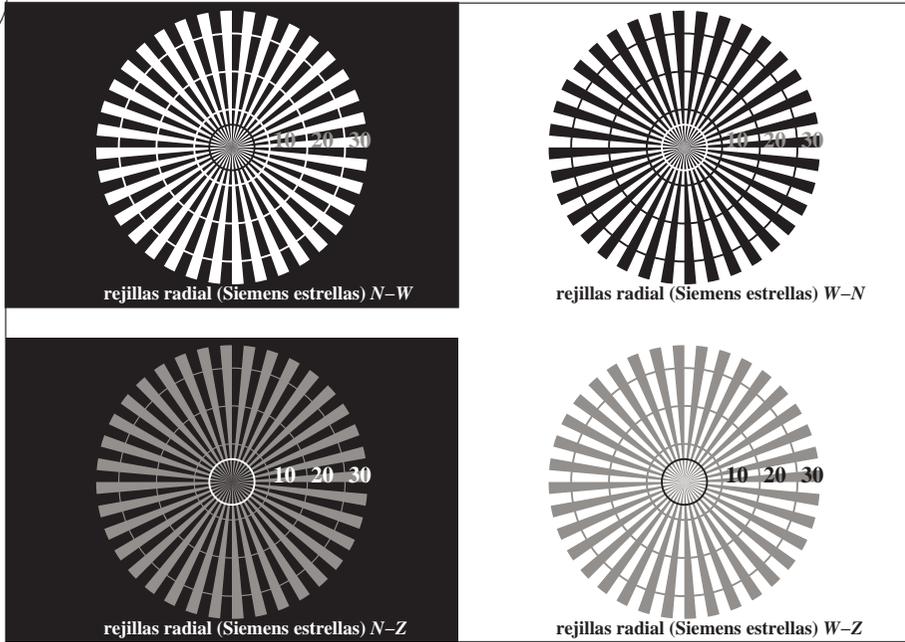
2-113130-F0



http://130.149.60.45/~farbmetrik/TS79/TS79L0FP.PDF /.PS; 3D-linealización
F: 3D-linealización TS79/TS79LS30FP.DAT en archivo (F), página 2/2

vea archivos semejantes: http://130.149.60.45/~farbmetrik/TS79/TS79.HTM
Información técnica: http://www.ps.bam.de o http://130.149.60.45/~farbmetrik

TUB matrícula: 20130201-TS79/TS79L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmy6* (CMYK)
TUB material: code=rhata4a



TS790-3, Fig. C1Wde: Elemento A: rejillas radial N-W, W-N, N-Z y W-Z; PS operator: rgb/cmy0

$L^*/Y_{pretenden}$	18.0/18.0	37.3/37.3	56.7/56.7	76.1/76.0	95.4/95.4	N_0 (min.)	W_1 (max.)
(absoluta)							
$w^* = I_{CIELAB, r}^*$							
(relativa)							
$w_{entrada}^*$	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	N_0 (min.)	W_1 (max.)
w_{salida}^*							

TS790-5, Fig. C2Wde: Elemento B: 5 equidistante L^* pasos de gris + N_0 + W_1 ; PS operator: rgb/cmy0

$L^*/Y_{pretenden}$	18.0/18.0	23.2/23.2	28.3/28.3	33.5/33.5	38.6/38.6	43.8/43.8	49.0/49.0	54.1/54.1	59.3/59.3	64.4/64.4	69.6/69.6	74.8/74.8	79.9/79.9	85.1/85.1	90.2/90.2	95.4/95.4
(absoluta)																
NO y código Hex	00;F	01;E	02;D	03;C	04;B	05;A	06;9	07;8	08;7	09;6	10;5	11;4	12;3	13;2	14;1	15;0
$w^* = I_{CIELAB, r}^*$																
(relativa)																
$w_{entrada}^*$	0,000	0,067	0,133	0,200	0,267	0,333	0,400	0,467	0,533	0,600	0,667	0,733	0,800	0,867	0,933	1,000
w_{salida}^*																

TS790-7, Fig. C3Wde: Elemento C: 16 equidistante L^* pasos de gris; PS operator: rgb/cmy0

paso fondo	0						1	paso del anillo	0-1
Código Hexadecimal	7						8	Código Hexadecimal	7-8
	E						F		E-F
	2						0		2-0
	8						6		8-6
	F						D		F-D

TS791-1, Fig. C4Wde: Elemento D: anillos de Landolt W-N; PS operator: rgb/cmy0

	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	
120 (+8)																	240
60 (+4)																	120
30 (+2)																	60
15 (+1)																	30
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	

TS791-3, Fig. C5Wde: Elemento E: Trama línea menores de 45° (o 135°) grados; PS operator: rgb/cmy0

	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	
120 (+8)																	240
60 (+4)																	120
30 (+2)																	60
15 (+1)																	30
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	

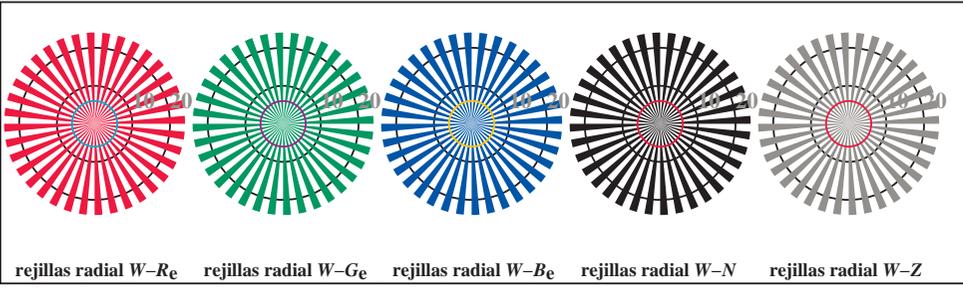
TS791-5, Fig. C6Wde: Elemento F: Trama línea menores de 90° (o 0°) grados; PS operator: rgb/cmy0

gráfico TS79; ME16(ISO 9241-306), 3(ISO/IEC 15775) entrada: w/rgb/cmyk -> rgb_{de}
test acromático gráfico N, 3D=1, de=1, cmyk* salida: 3D-linealización a cmyk*_{de}

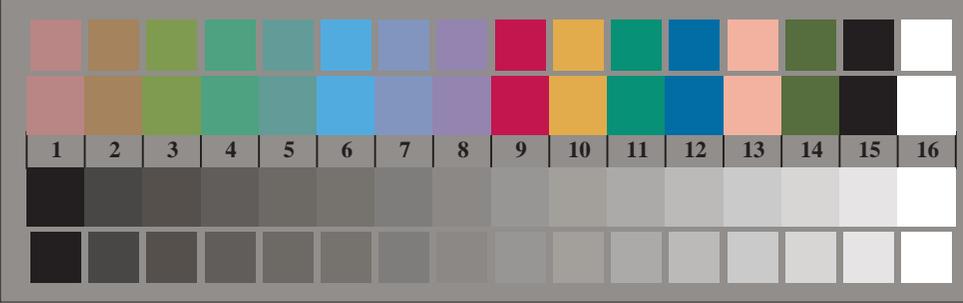
vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/TS89/TS89.L0FP.PDF>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>



TS890-3, Fig. D1Wde: motivos florales, CIE 14 colores del test y 2 + 16 pasos de gris (sf); ; PS operator: 4 colorimage



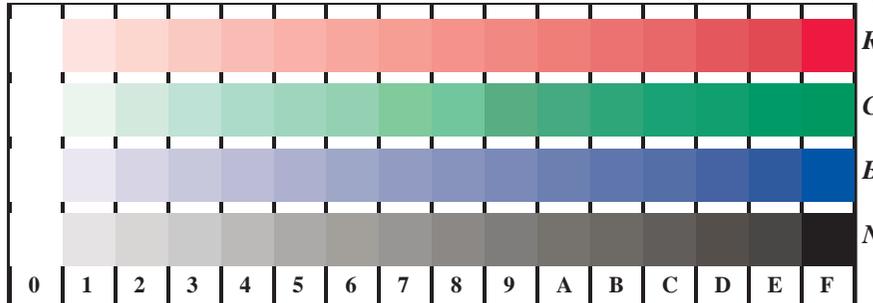
rejillas radial W-Re rejillas radial W-Ge rejillas radial W-Be rejillas radial W-N rejillas radial W-Z



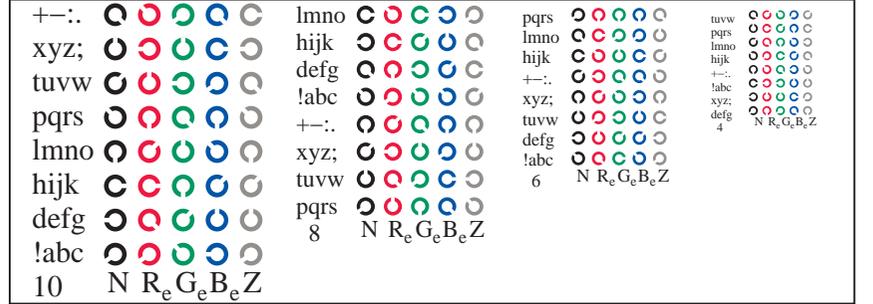
TS890-7, Fig. D3Wde: CIE 14 colores del test y 2 + 16 pasos de gris (sf); PS operator:rgb/cmy0->rgbde setrgbcolor



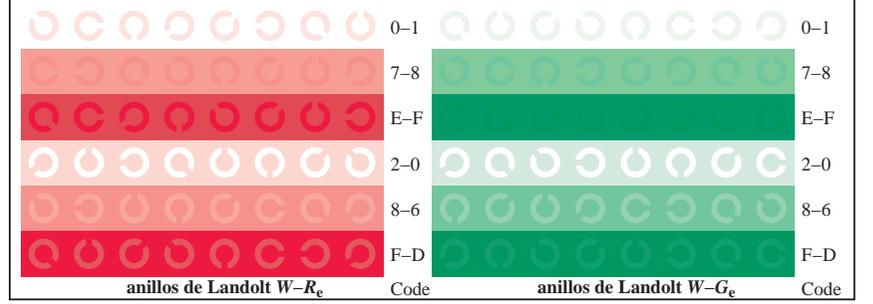
gráfico TS89; 4(ISO/IEC 15775 + ISO/IEC TR 24705)
test cromático gráfico RGB, 3D=1, de=1, cmyk*



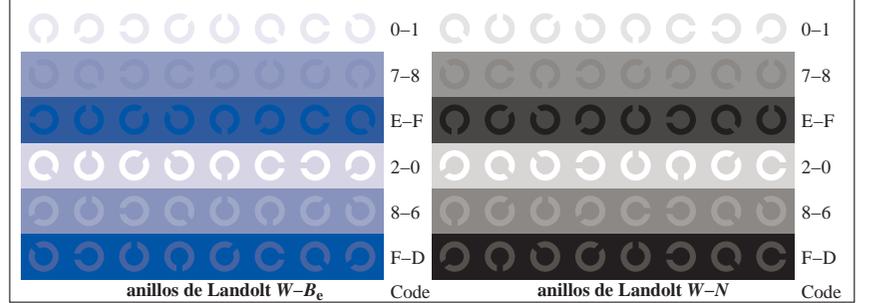
TS891-1, Fig. D4Wde: 16 equidistante pasos W-Re; W-Ge; W-Be; W-N; rgb/cmy0->rgbde setrgbcolor



TS891-3, Fig. D5Wde: código y Landolt anillos N; Re; Ge; Be; Z; PS operator: rgb->rgbde setrgbcolor



TS891-5, Fig. D6Wde: anillos de Landolt W-Re; W-Ge; PS operator:rgb->rgbde setrgbcolor



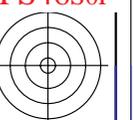
TS891-7, Fig. D7Wde: anillos de Landolt W-Be; W-N; PS operator:rgb->rgbde setrgbcolor

entrada: rgb/cmyk -> rgbde
salida: 3D-linealización a cmyk*de

TUB matrícula: 20150701-TS89/TS89L0FP.PDF /PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separacióncmykn6* (CMYK)

TUB material: code=thad4ta

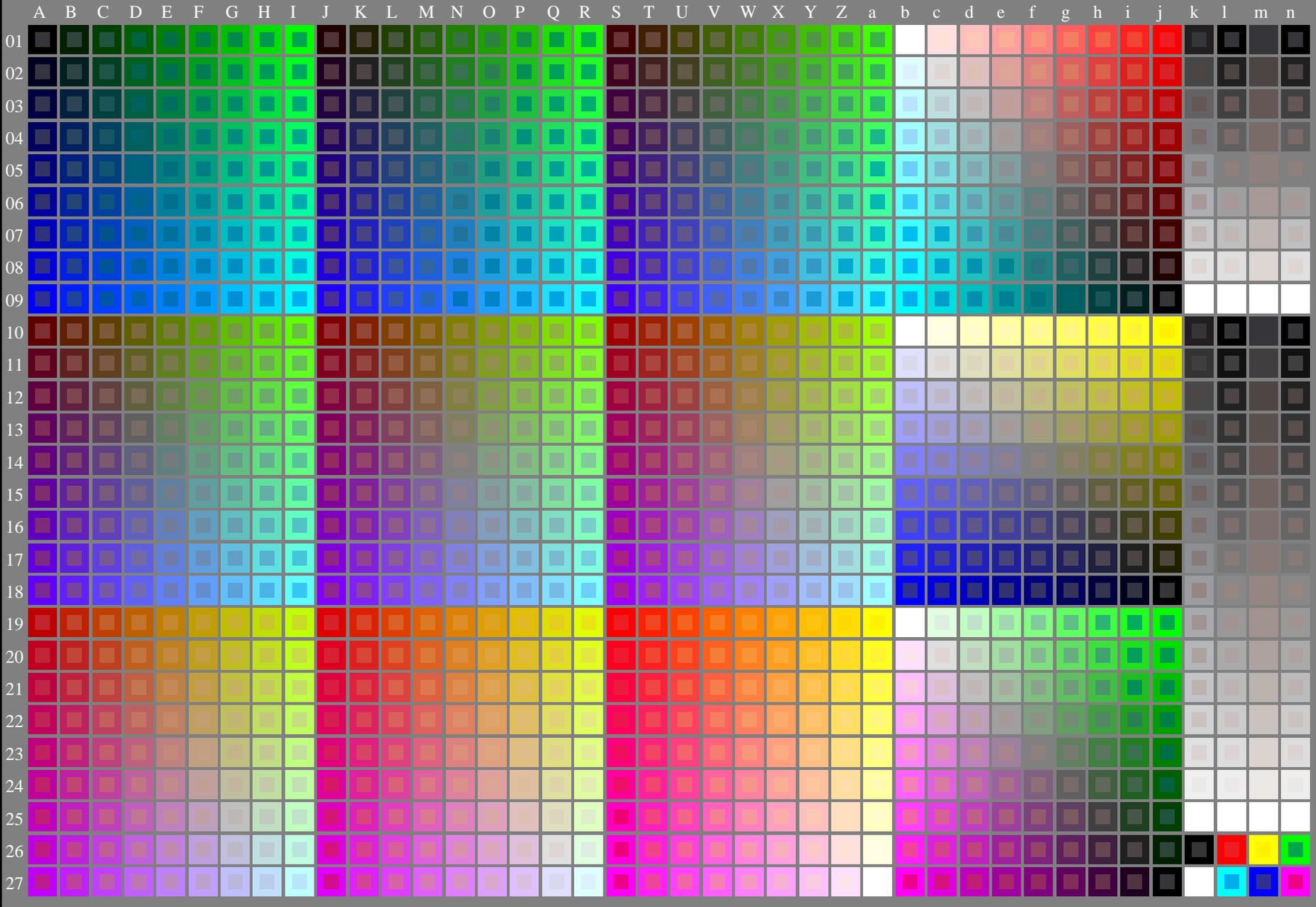
http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS46/PS46L0NP.PDF /.PS; comience salida
N: ninguna 3D-linealización (OL) en archivo (F) o PS-startup (S), página 1/2



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS46/PS46.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS46/PS46L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida en la impresión offset

TUB material: code=thad4ta



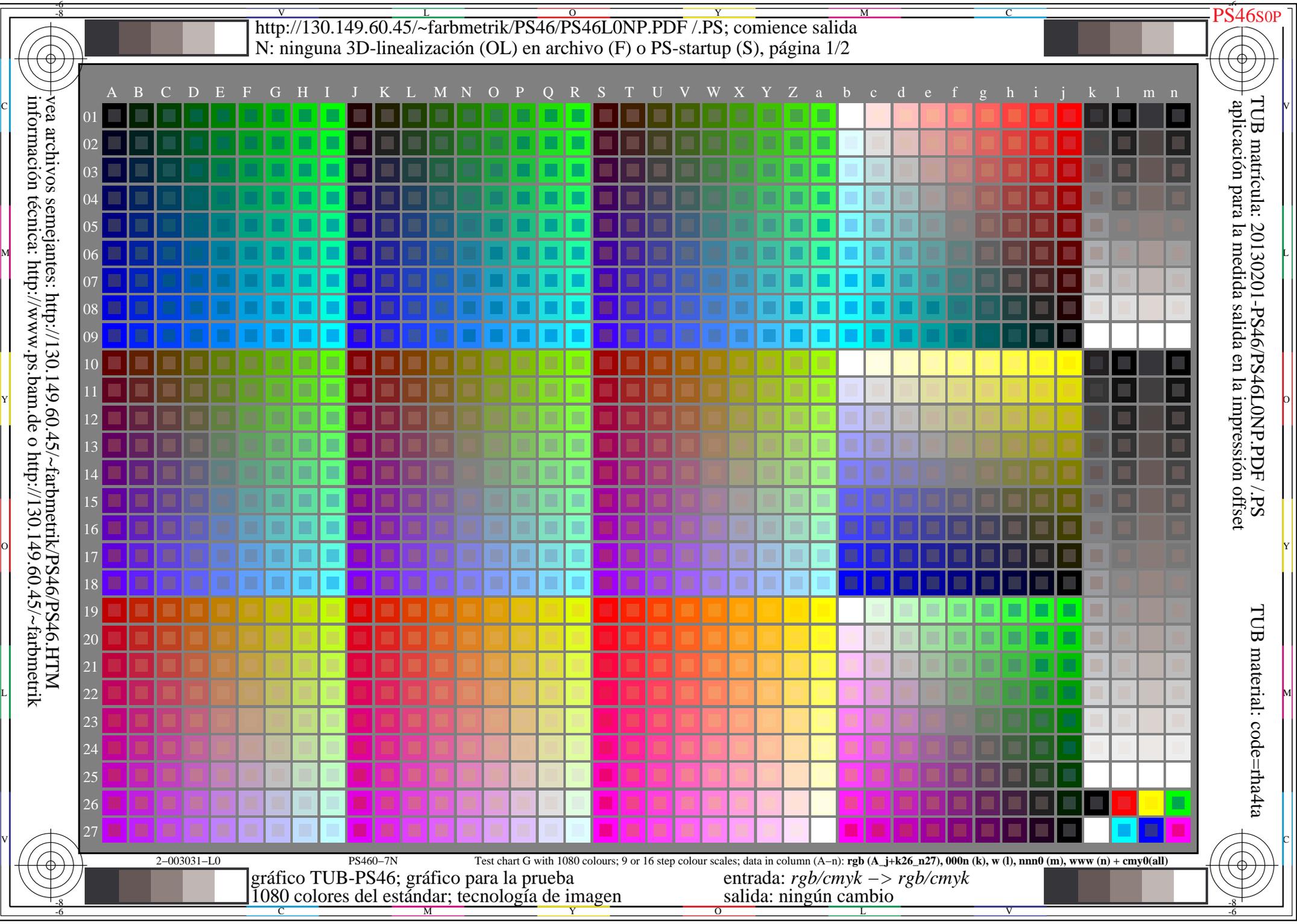
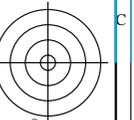
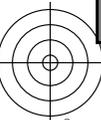
2-003031-L0

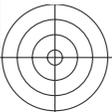
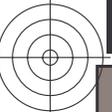
PS460-7N

Test chart G with 1080 colours; 9 or 16 step colour scales; data in column (A-n): *rgb* (A_j+k26_n27), 000n (k), w (l), nnn0 (m), www (n) + *cmy0*(all)

gráfico TUB-PS46; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar; tecnología de imagen

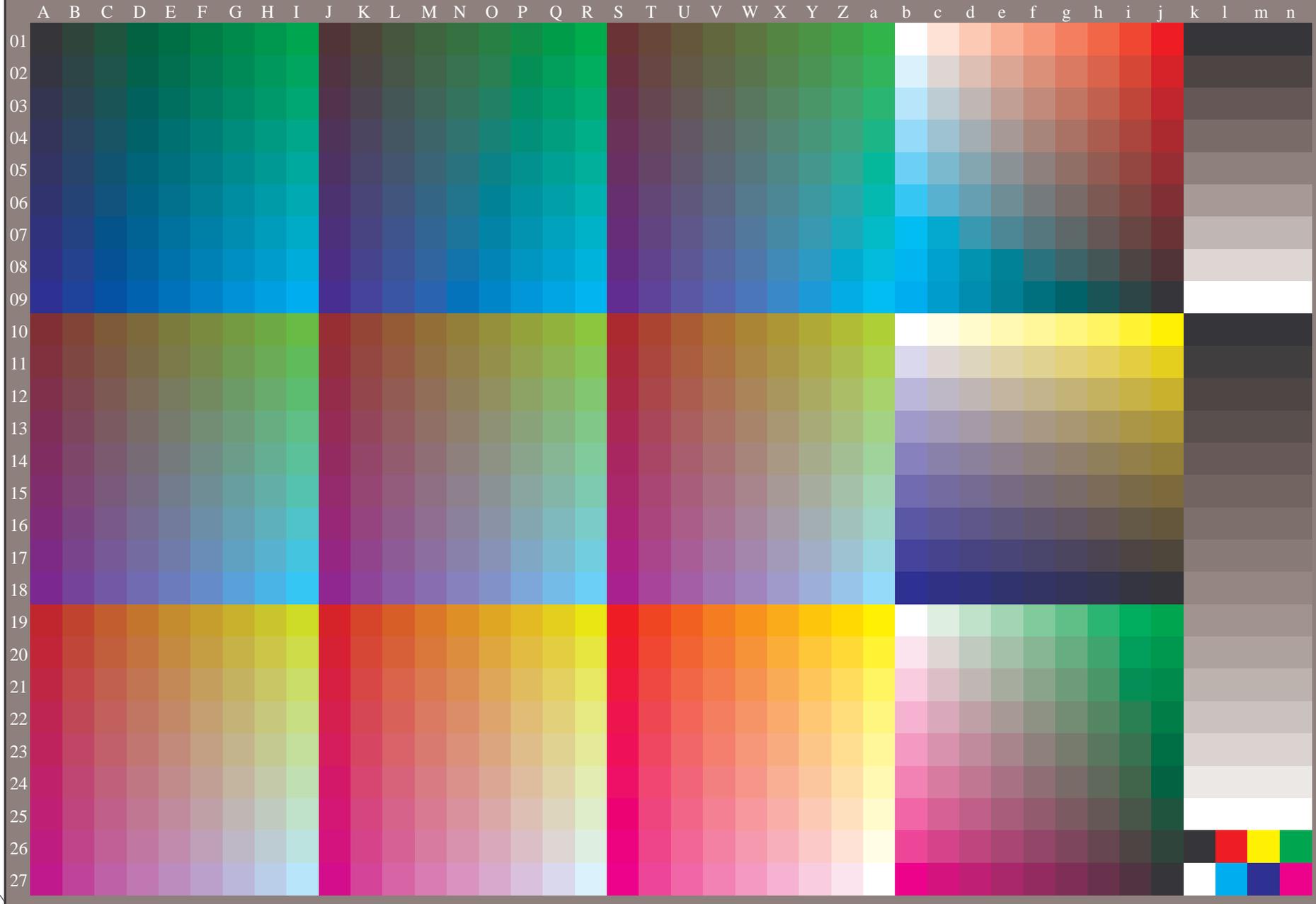
entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb/cmyk*
salida: ningún cambio





vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS46/PS46.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS46/PS46L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida en la impresión offset, separación cmy0 (CMY0)
TUB material: code=thad4a



2-003131-L0

PS460-70

gráfico TUB-PS46; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=0, de=0, cmy0

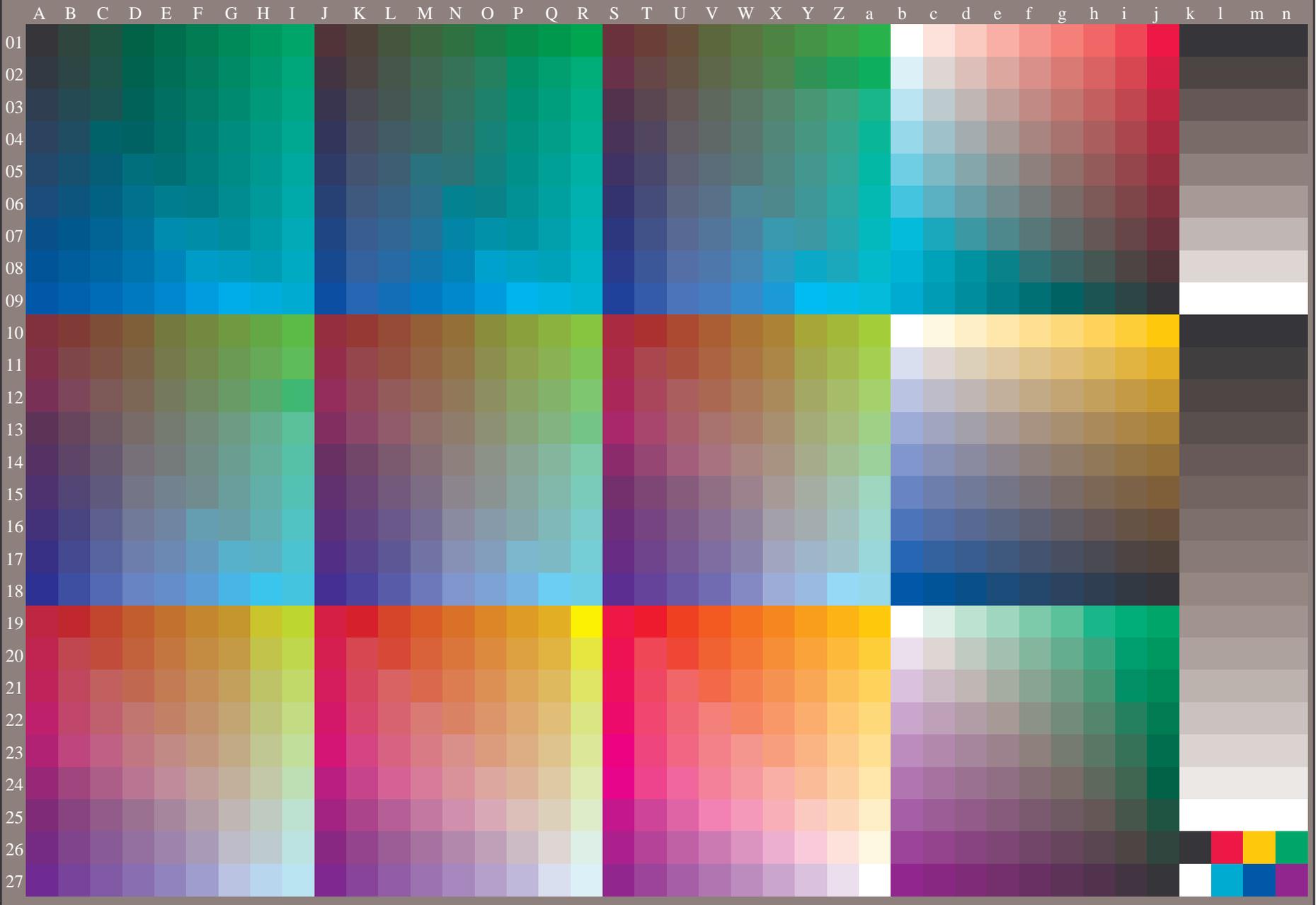
entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb_d*
salida: transfiera a *cmy0_d*

2-003131-F0



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS46/PS46.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS46/PS46L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida en la impresión offset, separación cmy0 (CMY0)
TUB material: code=thad4ta



2-013131-L0

PS460-71

gráfico TUB-PS46; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=0, de=1, cmy0

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgbe*
salida: transfiera a *cmy0_e*

2-013131-F0

C

M

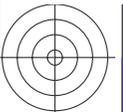
Y

O

L

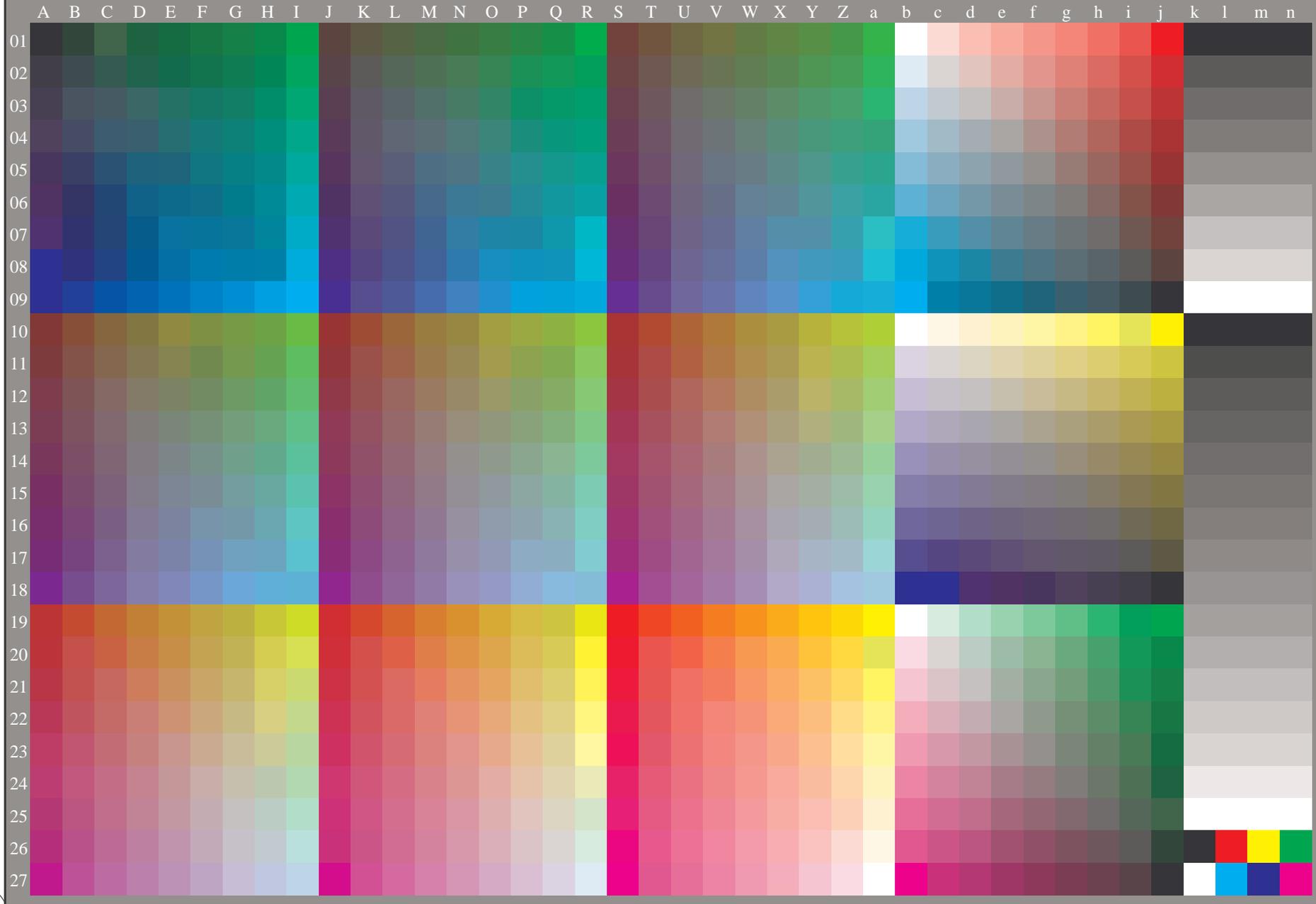
V

C



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS46/PS46.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS46/PS46L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida en la impresión offset, separación cmy0* (CMY0)
TUB material: code=thad4ta



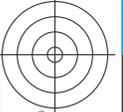
2-103131-L0

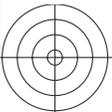
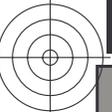
PS460-72

gráfico TUB-PS46; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=1, de=0, cmy0*

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgbdd*
salida: 3D-linealización a *cmy0*dd*

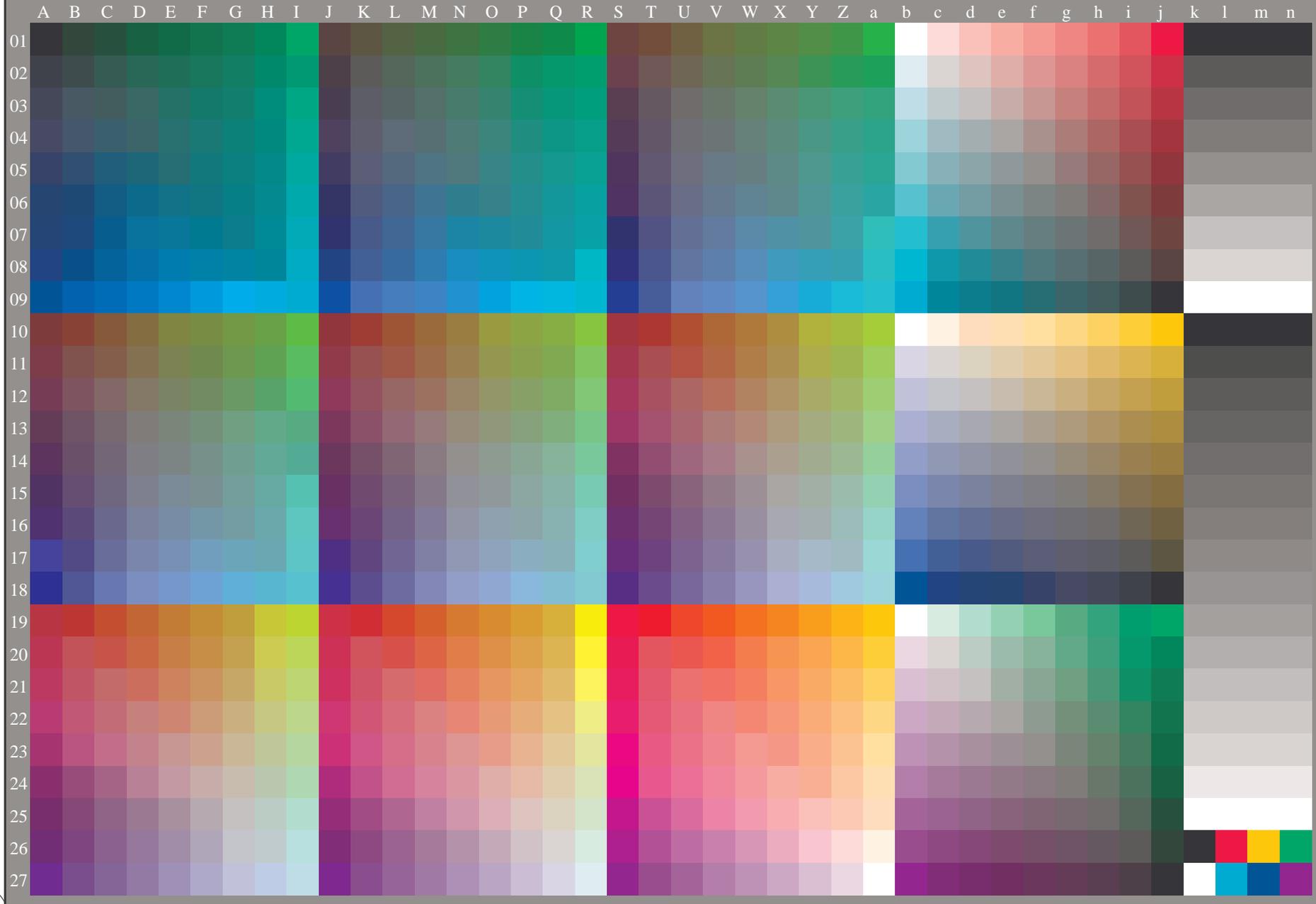
2-103131-F0





vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS46/PS46.HTM>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS46/PS46L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida en la impresión offset, separación cmy0* (CMY0)
TUB material: code=thad4ta



2-113131-L0

PS460-73

gráfico TUB-PS46; gráfico para la prueba
1080 colores del estándar, 3D=1, de=1, cmy0*

entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb*_{de}
salida: 3D-linealización a *cmy0**_{de}

2-113131-F0





vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS29/PS29L0FP.PDF> / .PS
información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS29/PS29L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6* (CMYK)
TUB material: code=thad4ta

Test chart 2 for color rendering: metameric colours D65 and D50; laser printer (CMYK); rgb->rgbde



01: R00Y_075_050*_e 02: R50Y_075_050*_e 03: Y00G_075_050*_e 04: Y50G_075_050*_e 05: G00B_075_050*_e 06: G50B_075_050*_e 07: B00R_075_050*_e 08: B50R_075_050*_e 09=10: R00Y_075_050*_e

Series:
metameric
m
D65



10: R00Y_075_050*_e 11: R50Y_075_050*_e 12: Y00G_075_050*_e 13: Y50G_075_050*_e 14: G00B_075_050*_e 15: G50B_075_050*_e 16: B00R_075_050*_e 17: B50R_075_050*_e 18=01: R00Y_075_050*_e

central
z
D65/D50



19: R00Y_075_050*_e 20: R50Y_075_050*_e 21: Y00G_075_050*_e 22: Y50G_075_050*_e 23: G00B_075_050*_e 24: G50B_075_050*_e 25: B00R_075_050*_e 26: B50R_075_050*_e 27=19: R00Y_075_050*_e

metameric
m
D50



28: NW_000*_e 29: NW_013*_e 30: NW_025*_e 31: NW_038*_e 32: NW_050*_e 33: NW_063*_e 34: NW_075*_e 35: NW_088*_e 36=28: NW_100*_e

metameric
m
D65
*Lab**N0=17.7, 0.6, 0.6
*Lab**W0=95.4, 1.3, -4.9
*Lab**N=24.3, -5.6, -6.8
*Lab**W=95.6, 1.4, -5.0



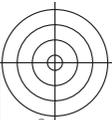
37: NW_000*_e 38: NW_013*_e 39: NW_025*_e 40: NW_038*_e 41: NW_050*_e 42: NW_063*_e 43: NW_075*_e 44: NW_088*_e 45=37: NW_100*_e

grey
g
D65/D50
*Lab**N0=17.7, 0.6, 0.6
*Lab**W0=95.4, 1.3, -4.9
*Lab**N1=17.7, 0.8, 0.6
*Lab**W1=95.4, 0.8, -4.9



46: NW_000*_e 47: NW_013*_e 48: NW_025*_e 49: NW_038*_e 50: NW_050*_e 51: NW_063*_e 52: NW_075*_e 53: NW_088*_e 54: NW_100*_e

metameric
m
D50
*Lab**N1=17.7, 0.8, 0.6
*Lab**W1=95.4, 0.8, -4.9
*Lab**N=24.0, -5.6, -7.3
*Lab**W=95.5, 0.9, -5.0



2-113130-L0 PS290-73

gráfico TUB-PS29; reproducción en color

54 colores; metameric para D65&D50, 3D=1, de=1, cmyk*

entrada: rgb/cmyk -> rgbde

salida: 3D-linealización a cmyk*_{de}





vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS39/PS39L0FP.PDF /.PS>
Información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS39/PS39L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6* (CMYK)
TUB material: code=thad4ta

Test chart 3 for color rendering: metameric colours A and P4000



Series:
metameric
m
A

01: R00Y_075_050*_e 02: R50Y_075_050*_e 03: Y00G_075_050*_e 04: Y50G_075_050*_e 05: G00B_075_050*_e 06: G50B_075_050*_e 07: B00R_075_050*_e 08: B50R_075_050*_e 09=10: R00Y_075_050*_e



central
Z
A/P4000

10: R00Y_075_050*_e 11: R50Y_075_050*_e 12: Y00G_075_050*_e 13: Y50G_075_050*_e 14: G00B_075_050*_e 15: G50B_075_050*_e 16: B00R_075_050*_e 17: B50R_075_050*_e 18=01: R00Y_075_050*_e



metameric
m
P4000

19: R00Y_075_050*_e 20: R50Y_075_050*_e 21: Y00G_075_050*_e 22: Y50G_075_050*_e 23: G00B_075_050*_e 24: G50B_075_050*_e 25: B00R_075_050*_e 26: B50R_075_050*_e 27=19: R00Y_075_050*_e



metameric
m
A
*Lab**N0=17.8, 1.3, 0.7
*Lab**W0=95.3, 0.3, -4.9
*Lab**N=23.1, -3.5, -9.1
*Lab**W=95.4, 0.3, -5.0

28: NW_000*_e 29: NW_013*_e 30: NW_025*_e 31: NW_038*_e 32: NW_050*_e 33: NW_063*_e 34: NW_075*_e 35: NW_088*_e 36=28: NW_100*_e



grey
g
A/P4000
*Lab**N0=17.8, 1.3, 0.7
*Lab**W0=95.3, 0.3, -4.9
*Lab**N1=17.7, 1.0, 0.7
*Lab**W1=95.3, 0.6, -5.0

37: NW_000*_e 38: NW_013*_e 39: NW_025*_e 40: NW_038*_e 41: NW_050*_e 42: NW_063*_e 43: NW_075*_e 44: NW_088*_e 45=37: NW_100*_e



metameric
m
P4000
*Lab**N1=17.7, 1.0, 0.7
*Lab**W1=95.3, 0.6, -5.0
*Lab**N=23.7, -5.0, -8.0
*Lab**W=95.5, 0.6, -5.1

46: NW_000*_e 47: NW_013*_e 48: NW_025*_e 49: NW_038*_e 50: NW_050*_e 51: NW_063*_e 52: NW_075*_e 53: NW_088*_e 54: NW_100*_e

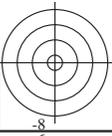
2-113130-L0 PS390-73

gráfico TUB-PS39; reproducción en color

54 colores; metameric para A&P4000, 3D=1, de=1, cmyk*

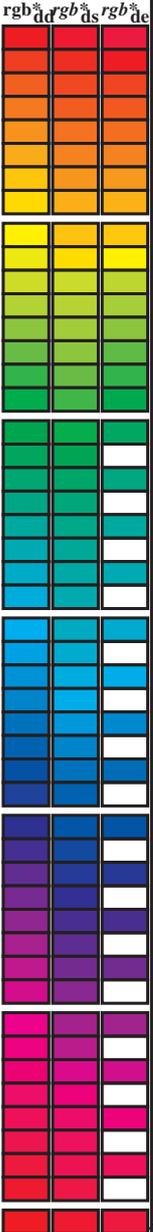
entrada: *rgb/cmyk* -> *rgb*_{de}

salida: 3D-linealización a *cmyk**_{de}



Data of maximum color M in colorimetric system Laser printer output; separation cmy6*, D65 for input or output; Six hue angles of the 60 degree standard colours RYGBM_s: h_{ab,ds} = 30.0, 90.0, 150.0, 210.0, 270.0, 330.0; Six hue angles of the device colours RYGBM_d: h_{ab,d} = 33.5, 100.6, 155.5, 235.2, 290.8, 348.9; Six hue angles of the elementary colours RYGBM_e: h_{ab,e} = 25.5, 92.3, 162.2, 217.0, 271.7, 328.6

Table with columns for device colors (h_{ab,d}, h_{ab,s}, h_{ab,e}), LAB* values, and RGB values for various color models (ddx64M, ddx361M, dsx361M, dex361M). The table contains 38 rows of data.



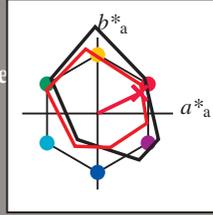
vea archivos semejantes: http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS99/PS99.HTM
información técnica: http://www.ps.bam.de o http://130.149.60.45/~farbmetrik

TUB matrícula: 20130201-PS99/PS99L0NP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmy6 (CMYK)
TUB material: code=rh4ta

Entrada i salida: Printer Reflective System FRS06a for relative CIELAB hue $h_{ab,a,rel} = h_{ab}/360 = 25/360 = 0.07$

$H^*_e = R00Y_e$

Datos del dispositivo (d) o elemental (e) color:
 HIC^*_e
código de tono para los colores esta página:
 $H^*_e = R00Y_e$
triángulo claridad T^*



LRS18a; datos adaptados CIELAB (a)					
name	$L^*=L^*_a$	a^*_a	b^*_a	$C^*_{ab,a}$	$h^*_{ab,a}$
$R_{e, Ma}$	47.5	56.0	26.7	62.1	25
$Y_{e, Ma}$	83.6	-3.1	76.8	76.9	92
$G_{e, Ma}$	53.8	-65.9	21.1	69.2	162
$C_{e, Ma}$	54.9	-38.7	-29.1	48.4	216
$B_{e, Ma}$	37.3	1.4	-48.6	48.7	271
$M_{e, Ma}$	38.5	46.7	-28.5	54.7	328
$N_{e, Ma}$	23.8	0.0	0.0	0.0	0
$W_{e, Ma}$	95.8	0.0	0.0	0.0	0
$R_{e, CIE}$	39.9	58.7	27.9	65.0	25
$Y_{e, CIE}$	81.2	-2.8	71.5	71.6	92
$G_{e, CIE}$	52.2	-42.4	13.6	44.5	162
$B_{e, CIE}$	30.5	1.4	-46.4	46.4	271

Los datos de color máximo (Ma):

$LabCh^*_{e, Ma}: 47\ 56\ 26\ 62\ 25$

$HIC^*_{e, Ma}: R00Y_{100}_{100}_e$

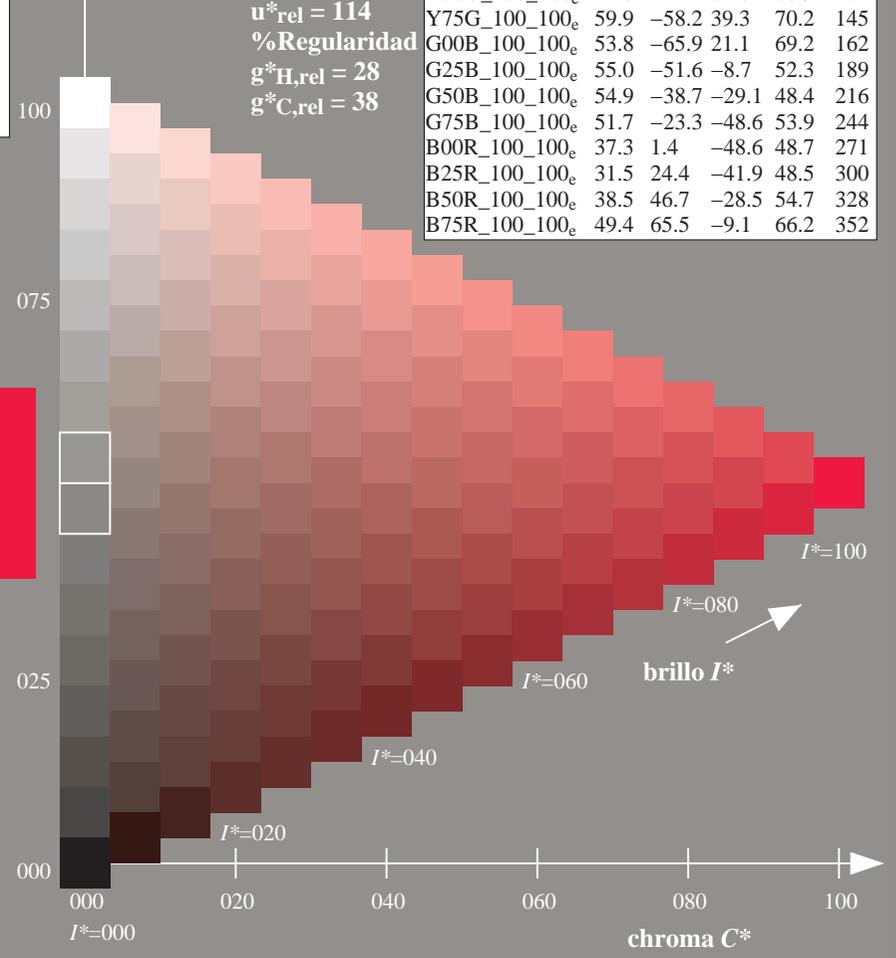
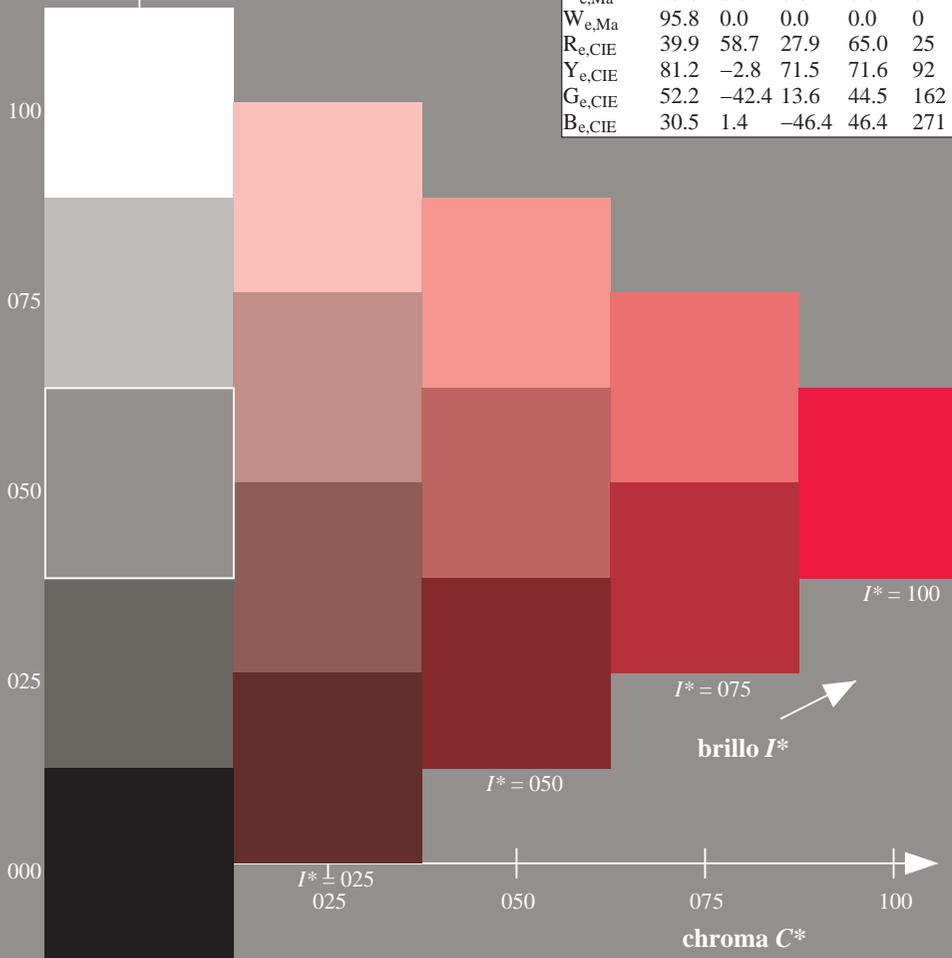
$rgbic^*_{e, Ma}$:

1.0 0.0 0.26 1.0 1.0

triángulo claridad T^*

LRS18a; datos adaptados CIELAB (a)					
H^*_e	$L^*=L^*_a$	a^*_a	b^*_a	$C^*_{ab,a}$	$h^*_{ab,a}$
$R00Y_{100}_{100}_e$	47.5	56.0	26.7	62.1	25
$R25Y_{100}_{100}_e$	51.4	54.8	47.7	72.6	41
$R50Y_{100}_{100}_e$	61.8	35.2	58.4	68.2	58
$R75Y_{100}_{100}_e$	72.3	16.1	68.2	70.1	76
$Y00G_{100}_{100}_e$	83.6	-3.1	76.8	76.9	92
$Y25G_{100}_{100}_e$	85.8	-26.4	78.5	82.9	108
$Y50G_{100}_{100}_e$	71.0	-41.7	54.8	68.9	127
$Y75G_{100}_{100}_e$	59.9	-58.2	39.3	70.2	145
$G00B_{100}_{100}_e$	53.8	-65.9	21.1	69.2	162
$G25B_{100}_{100}_e$	55.0	-51.6	-8.7	52.3	189
$G50B_{100}_{100}_e$	54.9	-38.7	-29.1	48.4	216
$G75B_{100}_{100}_e$	51.7	-23.3	-48.6	53.9	244
$B00R_{100}_{100}_e$	37.3	1.4	-48.6	48.7	271
$B25R_{100}_{100}_e$	31.5	24.4	-41.9	48.5	300
$B50R_{100}_{100}_e$	38.5	46.7	-28.5	54.7	328
$B75R_{100}_{100}_e$	49.4	65.5	-9.1	66.2	352

%Gama
 $u^*_{rel} = 114$
%Regularidad
 $g^*_{H,rel} = 28$
 $g^*_{C,rel} = 38$



vea archivos semejantes: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PS99/PS99.HTM>
información técnica: <http://www.ps.bam.de> o <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB matrícula: 20130201-PS99/PS99L0FP.PDF /.PS
aplicación para la medida salida de impresora láser, separación cmykn6* (CMYK)
TUB material: code=thad4ta



gráfico TUB-PS99; código de tono: $H^*_e=R00Y_e$
gráfico según a DIN 33872, 3D=1, de=1, $cmyk^*$

entrada: $rgb/cmyk \rightarrow rgb_{de}$
salida: 3D-linealización a $cmyk^*_{de}$

