



xx(92959.1)



# CINVESTAV

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN  
Unidad Guadalajara

---

## SISTEMA DE MANEJO DE COLOR MULTIPLATAFORMA

TESIS QUE PRESENTA  
LEO HENDRIK REYES LOZANO

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS

EN LA ESPECIALIDAD DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



CINVESTAV I.P.N.  
SECCION DE INFORMACION  
Y DOCUMENTACION

Guadalajara, Jal. Junio del 2001

CLASIF.:	Tesis 2002
ADQUIS.:	
FECHA:	19/04/02
PROCED.:	ser u - Bibliograficos

# **SISTEMA DE MANEJO DE COLOR MULTIPLATAFORMA**

**Tesis de Maestría en Ciencias  
Ingeniería Eléctrica**

**Por:**

**Leo Hendrik Reyes Lozano**

**Ingeniero en Computación  
Universidad de Guadalajara**

**Becario de CONACYT, expediente No. 143765**

**Directores de Tesis:**

**Dr. Félix Francisco Ramos Corchado ✓**

**Ing. Rafael Antonio Martínez Ponce ✓**

*Hewlett Packard de México, Guadalajara, Jal., M.*

**CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Junio del 2001**

## **Agradecimientos:**

A mis padres.

A mis asesores y compañeros.

A todos los profesores del CINVESTAV-GDL.

A todas las personas que tan amablemente participaron en los experimentos.

A Hewlett-Packard de México.

Al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) Aguascalientes, y al Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA).

Al CONACYT.

# Tabla de Contenido

<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
CORTA HISTORIA DEL MANEJO DEL COLOR .....	11
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	12
METAS DE LA TESIS.....	13
ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	14
<b>CAPÍTULO 1.COLORIMETRÍA Y MANEJO DEL COLOR.....</b>	<b>17</b>
1.1 ESTÁNDARES INTERNACIONALES PARA EL MANEJO DEL COLOR .....	19
1.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	23
1.2.1 <i>Definición de las cantidades básicas usadas en radiometría.</i> .....	24
1.2.2 <i>Señales de excitación de los conos.</i> .....	25
1.2.3 <i>Color</i> .....	25
1.2.4 <i>Tono</i> .....	26
1.2.5 <i>Brillantez y Claridad</i> .....	26
1.2.6 <i>Colorido y Croma</i> .....	27
1.2.7 <i>Saturación</i> .....	27
1.2.8 <i>Colores relacionados y no relacionados</i> .....	27
1.2.9 <i>Igualaciones de Brillantez-Colorido contra Claridad-Croma</i> .....	28
1.3 INTRODUCCIÓN A LA COLORIMETRÍA.....	28
1.3.1 <i>Fundamentos de colorimetría</i> .....	29
1.3.2 <i>Axiomas de la colorimetría</i> .....	29
1.3.3 <i>Los experimentos fundamentales y los valores triestímulo</i> .....	30
1.4 LA APARIENCIA DEL COLOR.....	38
1.4.1 <i>Efectos psicológicos y fisiológicos</i> .....	38
1.4.2 <i>Contraste simultáneo, encrespamiento, y distribución</i> .....	39
1.4.3 <i>Condiciones de visualización</i> .....	40
1.4.4 <i>Adaptación cromática</i> .....	42
1.4.5 <i>Versión impresa contra reproducción en pantalla</i> .....	43
<b>CAPÍTULO 2.MANEJO DE COLOR MULTIPLATAFORMA.....</b>	<b>45</b>
2.1 LA SOLUCIÓN ICC AL PROBLEMA DEL MANEJO DE COLOR .....	47
2.2 VERIFICANDO LA VALIDEZ DEL SISTEMA.....	49
2.3 PRUEBAS EN IMPRESORAS .....	53
2.4 PRUEBAS EN MONITORES.....	55
<b>CAPÍTULO 3.UNA SOLUCIÓN DIFERENTE: LOS PERFILES ESPECTRALES.....</b>	<b>59</b>

3.1	EL MANEJO DE COLOR ESPECTRAL.....	61
3.2	PRODUCIENDO PERFILES ESPECTRALES PARA IMPRESORAS. ....	61
3.3	PRODUCIENDO PERFILES ESPECTRALES PARA LOS MONITORES. ....	70
3.4	PROBANDO EL NUEVO SISTEMA DE MANEJO DE COLOR CON OBSERVADORES HUMANOS. ....	74
3.5	CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	75
<b>CAPÍTULO 4.UNA SIMULACIÓN DE IMPRESIÓN.....</b>		<b>83</b>
4.1	IGUALANDO COLORES ENTRE DIFERENTES DISPOSITIVOS. ....	85
4.2	DATOS DE COLORES CORRESPONDIENTES.....	89
4.3	MODELOS DE ADAPTACIÓN CROMÁTICA. ....	89
4.4	EL MODELO DE VON KRIES.....	91
4.5	FALLAS DE LOS PERFILES ICC.....	93
4.6	SIMULACIÓN DE IMPRESIÓN USANDO FUENTES DE LUZ COMUNES. ....	97
<b>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>		<b>101</b>
	METAS LOGRADAS.....	103
	DESVENTAJAS.....	103
	TRABAJO FUTURO.....	104
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS.....</b>		<b>107</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>109</b>

# Introducción.

---

En esta sección se define el problema y las metas del presente trabajo. Se da una breve introducción al tema y finalmente, se presenta la estructura de la tesis.

---



### ***Corta historia del manejo del color.***

Igualar colores ha sido importante desde que fue posible hacer reproducciones a color. Antes de los 70s, la mayor parte de los colores impresos eran separados usando filtros visuales rojos, verdes y azules en una cámara. Los operadores altamente capacitados trataban de obtener la mejor igualación o mejorar la fotografía original mediante exposiciones múltiples, máscaras de corrección del color y otros medios químicos. Con tantas variables era común que el proceso fuera largo y aún así, no produjera siempre el color esperado.

En los 70s, los escáners electrónicos láser, con su enorme cantidad de perillas y medidores, comenzaron una era de ajustabilidad del color sin precedentes. Aunque estos escáners de medio millón de dólares no tenían la capacidad de almacenar una imagen, usaban computadoras para convertir señales RGB (Red, Green, Blue, rojo, verde y azul) en separaciones CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black, cyan, magenta, amarillo y negro). Un tambor limpio que contenía el original, se conectaba con un tambor opaco que tenía las películas con las separaciones. El escáner era operado por un especialista altamente entrenado capaz de calibrarlo para obtener la salida óptima. Aun así, era común hacer reimpresiones, particularmente en los mercados de color de más calidad. Por lo general, si el color no era igualado, no se cuestionaba la ajustabilidad del escáner o la habilidad del operador, sino la calidad de la tinta y el papel.

Junto con un mayor control sobre el escáner o “front end”, la prensa o “back end”, estaba cambiando de hacer ajustes visuales al control “por los números” Los densitómetros, las cartas de control de calidad y las pruebas en las tintas y papeles convirtieron la impresión de una actividad artesanal, en una ciencia.

En los 80s, los avances en las minicomputadoras, memorias y capacidad de almacenamiento, permitieron que los sistemas electrónicos de preprensa (CEPS) como el Scitex Response y el Hell Chromacom, almacenar, desplegar, corregir el color y retocar electrónicamente las imágenes. Estos sistemas multimillonarios representaban lo más avanzado en la reproducción del color – pero a un gran costo y con curvas de aprendizaje muy largas.

En los 90s, el poder de los sistemas CEPS llegó a los sistemas de escritorio. Las innovaciones como una forma común para describir la salida (PostScript), las interfaces de usuario gráficas de Apple y Microsoft, y los programas de publicación como Adobe PhotoShop y QuarkXPress permitieron que la reproducción del color llegara a los usuarios comunes. Los sistemas fáciles de usar y baratos reemplazaron a los sistemas altamente costosos y monolíticos.

El escaneo y la separación del color, que habían sido el dominio de unos pocos especialistas, se “democratizó” Cualquiera que pudiera operar una computadora, escáner e impresora – incluyendo a fotógrafos, diseñadores, escritores y operadores de computadoras, en general – pudieron hacer separación de colores. Hoy, muchos de éstos administran proyectos de impresión de comienzo a final. Sin embargo, aún después de todo este tiempo, un problema sigue siendo uno de los mayores obstáculos en la industria de la publicación: preservar la apariencia del color a través del proceso. Sin el entrenamiento y la experiencia de los operadores de los 70s, la publicación de escritorio confronta al usuario común con una serie de problemas complejos relacionados con el color.

Aun cuando los sistemas electrónicos de publicación de hoy cuestan menos y son más fáciles de usar que los sistemas propietarios del pasado, el entrenamiento sigue siendo una barrera para reproducir colores con calidad. El color es un tema muy complejo – quizá más que las computadoras usadas para reproducirlo.

### ***Definición del problema.***

Cualquier persona que haya visto la contraparte impresa de una imagen desplegada en un monitor notará que hay una diferencia entre los colores de ambas imágenes. Para mantener la apariencia del color, es necesario usar sistemas de software y hardware para manejar el color. Las soluciones actuales para este problema se distribuyen como paquetes de software incluidos en los sistemas operativos. Sin embargo, en un ambiente multiplataforma, cada computadora puede usar un sistema de manejo de color distinto, o ninguno. Cuando se usan diferentes paquetes de manejo del color, la comunicación entre ellos se vuelve muy difícil y los resultados tienden a ser inconsistentes. Al final, el usuario es forzado a utilizar un solo sistema operativo.

Todos los sistemas de manejo de color actuales están basados en los perfiles ICC (International Color Consortium, Consorcio Internacional del Color). Estos perfiles se producen típicamente usando condiciones de visualización e iluminación estándar. Aunque el uso de tales condiciones permite que los colores sean especificados sin ambigüedad alguna, también impone restricciones: las igualaciones de color sólo pueden ser garantizadas si las condiciones estándar se usan para juzgar los colores visualmente. El usuario común que trata de introducir el manejo de color en su proceso de impresión notará que aún usando estas herramientas, los colores no se igualan bien. Esto se debe a que la mayoría de los procesos de impresión se juzgan bajo condiciones no estándar. Por esta razón, si el usuario desea verificar la calidad de las impresiones, es forzado a *comprar equipo*

caro que *sólo emula las condiciones estándar*. Como resultado de esto, el usuario se frustra al intentar igualar colores y omite las pruebas de calidad.

### **Metas de la tesis.**

Uno de los objetivos de esta tesis es proveer un sistema de manejo de color multiplataforma. El segundo objetivo (pero no menos importante), es probar que nuestro sistema trabaja bajo una variedad de iluminantes. Al hacer esto, probamos que los sistemas de manejo de color actuales tienen sólo un éxito limitado y que las afirmaciones hechas por los creadores de estos sistemas deben ser interpretadas bajo un sentido muy estricto para ser válidas. Probaremos también que no hay un solo sistema de manejo de color que produzca buenos resultados sin importar el iluminante usado.

Las metas de esta tesis son:

1. Diseñar, implementar y probar un sistema de manejo de color multiplataforma. Este sistema de manejo del color debe proveer las características principales encontradas en ColorSync (el sistema de manejo de color de MacOS) e ICM (Image Color Management, el sistema de Windows), tales como:
  - Soporte para los siete tipos de perfiles ICC y sus cuatro intentos de producción.
  - Concatenación de perfiles para producir procesos completos de color.
  - Soporte para crear aplicaciones subsidiarias como programas de prueba de impresión y diseño.
2. Proponer una solución diferente para permitir que se usen varios tipos de luces. Esta nueva solución debe:
  - Preservar la apariencia del color a través de diferentes medios y condiciones de iluminación.
  - Permitir el uso de condiciones de iluminación comúnmente encontrados en la oficina, la casa o el trabajo.
  - Se independiente del iluminante, es decir, ser capaz de usar diferentes iluminantes sin forzar a que el usuario caracterice los dispositivos para cada tipo de luz.
3. Probar que la nueva solución funciona haciendo experimentos con observadores humanos.

Adicionalmente, esta tesis tiene las siguientes metas secundarias:

1. Sugerir un método estándar para caracterizar monitores, impresoras y cualquier dispositivo usando la nueva solución.
2. Probar la validez de al menos una herramienta de manejo de color comercial.
3. Probar si la solución dada por el ICC puede ser usada bajo diferentes iluminantes.

### ***Estructura de la tesis.***

Esta tesis está organizada de la siguiente forma:

- **Introducción.**

Una breve descripción del problema y las metas de la tesis.

- **Capítulo 1. Colorimetría y Manejo del Color.**

Las soluciones más avanzadas para manejar el color se discuten junto con sus ventajas y desventajas. El trabajo presente se pone en contexto. La terminología básica se define. Los métodos usados en la actualidad para la medición y especificación de los estímulos de color se mencionan e ilustran con ejemplos. Se introduce una variación de la medición de muestras reflejantes que permite usar colorimetría absoluta e igualaciones de brillantez-colorido. Finalmente, algunos fenómenos que modifican el color se discuten.

- **Capítulo 2. Manejo de Color Multiplataforma.**

La solución propuesta para la primera meta de la tesis se explica. El sistema ICC se discute. Presentamos algunos problemas que detectamos en herramientas de manejo de color profesionales y cómo los solucionamos. Finalmente, mostramos los resultados de las pruebas hechas para validar nuestro sistema.

- **Capítulo 3. Una solución diferente: Los Perfiles Espectrales.**

Discutimos la solución dada para la segunda y tercera meta de la tesis. Presentamos los nuevos perfiles espectrales inventados para resolver estos problemas. Se discute un problema relacionado con la caracterización de impresoras y cómo se resolvió. Se presentan los resultados de las pruebas hechas a estos perfiles y probamos que tienen una precisión mayor que los perfiles ICC. Finalmente se reportan los resultados de los experimentos hechos con observadores humanos para validar el sistema.

- **Capítulo 4. Una simulación de impresión..**

Describimos cómo nuestro sistema puede ser usado para construir una aplicación subsidiaria. En particular, delineamos un algoritmo que puede ser usado para hacer simulaciones de impresión (*softproofing*). También se describe un algoritmo común de adaptación cromática que puede ser usada con este algoritmo.

- **Conclusiones y Trabajo Futuro.**

Se obtienen las conclusiones y se dan algunos puntos que podrían usarse para investigaciones futuras.

- **Referencias.**

**Bibliografía & Referencias.**



# Capítulo 1. Colorimetría y Manejo del Color

---

El objetivo de este capítulo es colocar nuestro trabajo en contexto. Para lograr este objetivo se muestran las soluciones más avanzadas con sus ventajas y desventajas. La terminología básica se define. Los métodos empleados actualmente para la medición y especificación de los estímulos de color se discuten y se dan algunos ejemplos. Finalmente, se describen varios fenómenos que modifican la apariencia del color. Al terminar este capítulo, la complejidad del manejo del color puede ser apreciada.

---



## 1.1 Estándares internacionales para el manejo del color.

En 1931, la CIE [24] (Commission Internationale de l'Éclairage, o Comisión Internacional de la Iluminación) condujo una serie de experimentos para establecer un espacio de color independiente de dispositivos y un *observador estándar* (una entidad definida estadísticamente que representa a la persona promedio con visión de color normal). El espacio de color producido de esta forma asegura que cualesquier dos colores cuyas coordenadas sean las mismas en este espacio, serán visualmente idénticos al ser mirados por el observador estándar si las condiciones de visualización e iluminación son iguales a las de los experimentos. Estos experimentos fueron revisados después, en los 70s para confirmar su validez. Este sistema de especificación del color es importante porque *todos* los sistemas de manejo de color actuales están basados en el.

Con el advenimiento del los sistema de manejo de imágenes modernos, el transporte y comunicación del color se convirtió en un problema de importancia. En 1993, el ICC se formó para crear una forma estándar de especificar las capacidades de reproducción del color de cualquier dispositivo [1][2]. El ICC definió el formato de estos archivos que son llamados *perfiles de dispositivos* o *perfiles ICC*. Estos archivos son comunes y son usados en todos los sistemas de manejo de color actuales. Hay siete tipos de perfiles ICC:

1. **Perfil de entrada:** usado para dispositivos como escáners y cámaras.
2. **Perfil de despliegue:** usado para dispositivos de despliegue como los monitores.
3. **Perfil de salida:** usado para impresoras y dispositivos semejantes.
4. **Perfil de enlace de dispositivos:** este perfil provee un mecanismo mediante el cual varios perfiles pueden ser concatenados para crear una sola transformación que equivale a un proceso completo.
5. **Perfil de espacio de color:** este perfil es usado por los Sistemas de Manejo del Color (CMS, Color Management Systems) como una forma conveniente de transformar colores en un espacio de color a otro.
6. **Perfil abstracto:** proveen procedimientos de procesamiento de imágenes dentro de un espacio de color independiente de dispositivos.
7. **Perfil de colores con nombre:** estos perfiles mapean colores con nombre (como los sistemas de color Munsell o PANTONE) a coordenadas independientes/dependientes de dispositivos.

Al mismo tiempo, cuatro *intentos de producción* fueron definidos. Cuando la gama tonal (*gamut*) del dispositivo origen es mayor que la del dispositivo destino, algunos colores en el dispositivo original no podrán ser reproducidos en el destino. Cuando esto ocurre, los colores fuera de gamut deben ser mapeados a colores que quedan dentro en el espacio de color del dispositivo destino. Los algoritmos que implementan este mapeo son llamados *intentos de producción*. Estos intentos son:

1. ***Intento de producción perceptual***: todos los colores se escalan del gamut origen al gamut destino. El punto blanco origen se mapea al punto blanco destino. Este intento produce imágenes sin bloqueos de tonos, pero algunos colores no son igualados.
2. ***Intento de producción relativo colorimétrico***: el punto blanco original se mapea al punto blanco destino, pero los colores no se escalan. Los colores fuera de gamut se recortan al color más cercano. Se mantiene una igualación visual relativa a los puntos blancos de cada dispositivo, pero el recorte de colores puede producir bloqueos de tono.
3. ***Intento absoluto colorimétrico***: un mapeo uno a uno entre los gamuts. No se efectúa ninguna corrección de punto blanco. Los colores fuera de gamut se recortan al color más cercano. Este intento hace una reproducción colorimétrica exacta, pero produce efectos adversos en las imágenes. Sin embargo, una reproducción colorimétrica perfecta no implica necesariamente una igualación perceptual.
4. ***Intento de saturación***: la saturación relativa de los colores se preserva. Este algoritmo puede o no mapear los puntos blancos de los dispositivos. Las imágenes resultantes preservan sólo la saturación relativa de los colores.

Algunos sistemas operativos proveen funciones de manejo de color como parte de sus API's (Application Program Interface). Al momento de escribir esta tesis, Apple provee el mejor CMS en un paquete llamado ColorSync. De acuerdo a la documentación de este sistema [6]: "ColorSync permite que el usuario iguale colores con gran precisión entre diferentes dispositivos de entrada, salida y despliegue. También permite que el programador convierta colores fácilmente y de manera precisa entre diferentes espacios de color [...]. El manejador de ColorSync es la primera implementación a nivel de sistema operativo, de un estándar de manejo de color aceptado por la industria"

Este sistema de manejo de color permite al usuario hacer igualaciones y conversiones de color, administración eficiente de los perfiles ICC, insertar perfiles dentro de imágenes, entre otras cosas. La arquitectura de ColorSync permite que el programador cree sus propios CMM's (Color

Management Modules, Módulos de Manejo de Color), para agregar o modificar la funcionalidad del sistema. De manera adicional, el sistema gráfico de Mac, QuickDraw GX, está altamente acoplado con ColorSync, proporcionando funciones de igualación de color de manera automática (ver páginas 3-25 en [6]). El programador sólo debe modificar el atributo `gxEnableMatchPort` del puerto de visión actual para hacer que ColorSync iguale las imágenes de forma automática.

Además, algunos AppleScripts permiten que el usuario ejecute de forma automática algunas funciones comunes de igualación de color como: inserción de perfiles dentro de imágenes, simulación de impresión, creación de perfiles DeviceLink, etc. Por ejemplo, si el usuario desea hacer una simulación de impresión (*softproof*), lo único que debe hacer es arrastrar un archivo de imagen sobre cierto folder. Entonces el sistema se encarga de hacer las conversiones necesarias de manera automática para un conjunto predefinido de impresoras (que puede ser modificado fácilmente).

ColorSync está basado en el estándar ICC. Así que, como se explicará después, tiene algunas deficiencias debidas a la forma como se calculan los valores colorimétricos en estos perfiles. Por ejemplo, el usuario es forzado a comprar equipo caro para emular iluminantes estándar como el D50 (luz de día estándar con una temperatura del color correlacionada de 5000°K) y D65 (luz de día estándar con temperatura del color correlacionada de 6500°K). Estos iluminantes son, en el mejor de los casos, sólo emuladores de las distribuciones espectrales reales. Por otro lado, la igualación de los colores sólo puede ser garantizada si los colores se observan bajo estas mismas condiciones de iluminación. Otra desventaja de ColorSync que es inherente a los perfiles ICC, es que las igualaciones de brillantez-colorido (explicadas más tarde) son imposibles de realizar.

Más aún, puesto que el resto de los sistemas de manejo de color están muy por detrás de ColorSync, cualquier usuario que desee introducir el manejo de color en su proceso de manera profesional se verá forzado a utilizar MacOS de forma exclusiva. Así que aún cuando ColorSync provee muchas facilidades, ata al usuario a usar sólo esta plataforma.

Microsoft también ofrece manejo de color en su sistema operativo Windows. Este sistema provee estas funciones desde Windows 98 y NT versión 4 [17], en un paquete llamado ICM (Image Color Management, Manejo de Color de Imágenes). Sin embargo, sólo los programadores pueden explotar las capacidades de este paquete, y no hay facilidades para que el usuario común use estas funciones. Además, no hay un acoplamiento entre la interfaz gráfica e ICM, como en MacOS. Aparte de esto, la arquitectura general de ICM es muy parecida a la de ColorSync: el programador puede agregar

sus propios CMM al sistema, justo como en ColorSync, aunque las API's de estos sistemas son diferentes.

Finalmente, Java provee algunos servicios de manejo de color en su paquete `java.awt.color`. Sin embargo, la documentación de este paquete es muy pobre. En la documentación oficial de Sun Microsystems [13], la sección dedicada al manejo de color ocupa apenas 7 páginas, y la mayor parte de éstas está dedicada a explicar los conceptos básicos del manejo del color. No hay un solo lugar en esta sección donde se presente un ejemplo claro de cómo debe usarse el paquete para mapear los colores de una imagen. El único ejemplo mostrado no usa perfiles ICC. En la práctica, los resultados producidos por este sistema son similares a los producidos en otras plataformas (cuando la comparación es posible, puesto que no hay soporte para intentos de producción). Este sistema también carece de otras funciones básicas de manejo de color como corrección de iluminante (adaptación cromática), selección de intento de producción y generación de perfiles DeviceLink. La solución de Java es incompleta, pero provee una buena base para implementar un sistema de manejo de color completo.

Todavía hay más soluciones de terceros, pero ninguna de ellas tiene el poder o es tan importante como ColorSync. Algunos ejemplos de estas soluciones son el LCMS (Little Color Management System) de Marti Maria que se puede obtener de <http://www.abaforum.es/martim/lcms.htm> e ICCLIB de Graeme Gill, accesible desde <http://web.access.net.au/argyll/>. LCMS está escrito en C y el código fuente está disponible bajo licencia GNU, de forma que es portable a otras plataformas. Sin embargo, las funciones que este sistema provee son muy pocas comparadas contra ColorSync e ICM. Por otro lado, ICCLIB es una pequeña librería que implementa funciones básicas de salida y entrada en perfiles ICC mediante dos utilerías: ICCLU e ICCDUMP. Ambas utilerías funcionan en modo texto y ejecutan conversiones de color usando perfiles ICC y muestran información general del perfil, respectivamente.

Al nivel de los Módulos de Manejo de Color en MacOS y Windows, las maquinarias se están rediseñando para tomar en cuenta varios efectos fisiológicos y psicológicos que modifican el *aspecto* del color. Estas maquinarias son muy sofisticadas y son tecnología propietaria, de forma que existe muy poca información sobre ellas para el público en general. Sin embargo, todos estos CMM's propietarios afirman que pueden extender la igualación colorimétrica simple para tomar en cuenta las diferencias en la iluminación, condiciones de visión, colores de fondo y varios otros

efectos. Ninguna de estas maquinarias está disponible para hacer pruebas, de forma que no pudimos probar todas estas afirmaciones.

Este es un resumen muy breve del estado del arte en manejo de color. Claramente, ColorSync provee la única opción real para el manejo de color profesional. Todavía no existe una solución independiente de la plataforma. Más aún, todas las afirmaciones hechas por los creadores de ColorSync son válidas únicamente cuando los colores son juzgados bajo condiciones de visualización estrictamente controladas. Aún los modelos de apariencia del color que están siendo introducidos en la actualidad como parte de los CMM's en esta plataforma, sufren de las mismas fallas esenciales derivadas del uso de los perfiles ICC: la dependencia del iluminante.

Terminamos esta sección estableciendo las siguientes conclusiones:

1. No hay una solución disponible en la actualidad que pueda ser usada para proveer igualación de colores en ambientes de oficina, casa o trabajo comunes.
2. Todas las soluciones disponibles en la actualidad están diseñadas para tratar condiciones de iluminación estrictas que fuerzan al usuario a comprar emuladores caros para juzgar las igualaciones visualmente.
3. No hay un sistema de manejo de color que pueda proveer funciones de igualación de color entre diferentes sistemas operativos. La mayor parte del tiempo, el usuario estará ligado con MacOS.

De lo expuesto arriba, podemos ver claramente la necesidad de un sistema de manejo de color multiplataforma. Este sistema debe ser lo suficientemente robusto para garantizar la igualación visual de colores a través de diferentes dispositivos, condiciones de iluminación, y sistemas operativos, al mismo tiempo que permita emplear fuentes de luz comunes. Estos son los objetivos de nuestra tesis.

## **1.2 Definición de términos.**

La colorimetría, como cualquier otra ciencia, tiene su propio conjunto de términos técnicos. Antes de proceder es importante que recordemos el significado de algunos de estos términos.

### 1.2.1 Definición de las cantidades básicas usadas en radiometría.

**Energía Radiante:** es la energía propagada en forma de ondas electromagnéticas o corrientes de partículas (cuantos o fotones).

**Radiación:** es el proceso de emitir o transferir energía radiante. Algunas veces, sin embargo, la radiación también se identifica con la energía radiante en sí misma.

**Energía radiante monocromática:** es la energía radiante de una sola frecuencia. En la práctica, este término se extiende para la energía radiante con un rango angosto de frecuencias que puede ser descrita especificando una sola frecuencia.

El **espectro de energía radiante** es la energía radiante entendida como un agregado de componentes monocromáticos. Este término también se usa para las imágenes producidas por la dispersión de energía radiante en sus componentes monocromáticos.

**Potencia Radiante (o Flux Radiante)** es la energía radiante emitida, transferida o recibida a través de una superficie, por una unidad de tiempo.

**Intensidad Radiante** (de una fuente en una dirección dada) es el cociente del poder radiante emitido por la fuente en un elemento infinitesimal de ángulo sólido conteniendo la dirección dada, entre el elemento de ángulo sólido.

La **Radiancia** en una dirección dada sobre un punto de una superficie de una fuente o receptor, o en un punto en el camino del rayo, es el cociente de la potencia radiante saliendo, llegando a, o pasando a través de un elemento de superficie en este punto siendo propagado en las direcciones definidas por un cono elementario conteniendo la dirección dada, entre el producto del ángulo sólido del cono y el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie en un plano perpendicular a la dirección dada.

La **Concentración espectral** en una longitud de onda dada de una unidad radiométrica  $X_e$  está dada por la cantidad de la unidad en particular, teniendo longitudes de onda en un intervalo infinitesimal conteniendo a la longitud de onda dada, dividida por el ancho del

intervalo. La notación usual es  $X_{e\lambda} = dX_e / d\lambda$ . Por ejemplo, si  $X_e$  es la potencia radiante, entonces  $P_e$ , la concentración espectral de potencia radiante está dada por  $P_{e\lambda} = dP_e / d\lambda$  y es simplemente referenciada como potencia espectral radiante.

La **Función (Curva) de Distribución Espectral** caracteriza la variación de la concentración espectral de una unidad radiométrica con respecto a la frecuencia. Su gráfica correspondiente es llamada la curva de distribución espectral. Su símbolo es:  $\{X_{e\lambda}d\lambda\}$  que se convierte en  $\{P_{e\lambda}d\lambda\}$  para la **función (curva) de distribución espectral de potencia radiante**.

Una **función (curva) de distribución espectral relativa** da la concentración espectral de una unidad radiométrica (por ejemplo, especifica sólo los valores relativos de esta cantidad en cada longitud de onda). Su símbolo es  $\{X_e(\lambda)d\lambda\}$  que se convierte en  $\{P_e(\lambda)d\lambda\}$  para la **función (curva) de distribución espectral relativa**.

### 1.2.2 Señales de excitación de los conos.

La visión humana es producida por dos tipos de fotorreceptores encontrados en la retina del ojo: los bastones y los conos. La percepción del color se produce en su mayor parte por estos últimos, de los cuales existen tres tipos. Cada tipo de cono tiene una respuesta espectral característica. Las señales de excitación de los conos son las cantidades de excitación que se producen en cada cono fotorreceptor cuando la retina percibe un color.

### 1.2.3 Color

En el *International Lighting Vocabulary* encontramos la siguiente definición de color:

**Color:** Atributo de la percepción visual que consiste en la combinación de contenido cromático y acromático. Este atributo puede ser descrito por colores cromáticos como amarillo, naranja, café, rojo, rosa, verde, azul, púrpura, etc., o por nombre acromáticos como blanco, gris, negro, etc., y calificado con los adjetivos brillante, opaco, claro, oscuro, etc., o por combinaciones de tales nombres.

Para los propósitos de esta tesis, usaremos la siguiente definición de color:

**Color:** es la sensación subjetiva producida en el cerebro de una persona debido a la excitación de sus ojos producida por la incidencia de la energía radiante comprendida entre los 380nm y 730nm aproximadamente.

En esta definición establecemos que el color es una sensación subjetiva. El color *no* es una característica física de la materia, puesto que en la ausencia de un observador, las cosas carecen de él. También debemos notar la diferencia entre color y *estímulo de color*:

**Estímulo de color:** Energía radiante producida por un iluminante, por la reflexión de la luz en un objeto reflejante o por la transmisión de la luz a través de un objeto transmisivo.

Mientras que el color es una sensación subjetiva, un estímulo de color tiene una definición específica en un sentido matemático. Desde este punto de vista, podemos definir a la colorimetría como:

**Colorimetría:** Rama de la ciencia del color encargada de la medición y especificación de los estímulos del color; ciencia de la medición del color.

#### 1.2.4 Tono.

**Tono:** Atributo de la sensación visual de acuerdo a la cual, un área parece ser semejante a uno de los colores percibidos: rojo, amarillo, verde, azul o a las combinaciones de ellos.

**Color acromático:** Color percibido carente de tono.

**Color cromático:** Color percibido que posee un tono.

#### 1.2.5 Brillantez y Claridad.

**Brillantez:** Atributo de la sensación visual de acuerdo a la cual un área parece emitir más o menos luz.

**Claridad:** La brillantez de un área juzgada en relación con la brillantez de un área iluminada de forma semejante que parece ser blanca o altamente transmisiva.

**Nota:** Sólo los colores relacionados (definidos después) exhiben claridad.

### 1.2.6 Colorido y Croma.

**Colorido:** Atributo de la sensación visual de acuerdo a la cual el color percibido de un área parece ser más o menos cromático.

**Nota:** Para un estímulo de color de una cromaticidad dada y, en el caso de los colores relacionados, de un factor de luminancia dado, este atributo usualmente se incrementa conforme la luminancia aumenta, excepto cuando la brillantez es muy alta.

**Croma:** El colorido de un área juzgada como la proporción de brillantez de un área iluminada de forma semejante que parece ser blanca o altamente transmisiva.

**Nota:** Para unas condiciones de visualización dadas y a niveles de luminancia dentro del rango de la visión fotópica, un estímulo de color percibido como un color relacionado, de una cromaticidad dada, y desde una superficie que tiene un factor de luminancia dado, exhibe aproximadamente una croma constante para todos los niveles de luminancia excepto cuando la brillantez es muy alta. En estas mismas circunstancias, a un nivel dado de iluminación, si el factor de luminancia se incrementa, la croma también aumenta, por lo general.

### 1.2.7 Saturación.

**Saturación:** El colorido de un área juzgada en proporción a su brillantez.

**Nota:** Para condiciones de visualización dadas y a niveles de luminancia dentro del rango de la visión fotópica, un estímulo de color de una cromaticidad dada exhibe aproximadamente una saturación constante para todos los niveles de luminancia, excepto cuando la brillantez es muy alta.

### 1.2.8 Colores relacionados y no relacionados.

**Color no relacionado:** Color percibido como perteneciente a un área u objeto visto de forma aislada con respecto a otros colores.

**Color relacionado:** Color percibido como perteneciente a un área u objeto visto en relación con otros colores.

### 1.2.9 Igualaciones de Brillantez-Colorido contra Claridad-Croma.

Como hemos visto, para especificar de forma completa la apariencia de un color se necesitan cinco dimensiones, a saber:

- Brillantez.
- Claridad.
- Colorido.
- Croma.
- Tono.

La saturación es redundante puesto que puede ser derivada de estos atributos. Puede verse fácilmente que una igualación de brillantez-colorido no siempre es posible. Piense por ejemplo en una fotografía de un autobús amarillo tomada a medio día. La escena original tendrá una brillantez y colorido altos y para obtener los mismos efectos en una reproducción impresa, la fotografía tendría que brillar literalmente. Como se explica en [44], es más práctico producir igualaciones de claridad-croma en este caso. En otras palabras: sólo los atributos relativos se preservan.

### 1.3 *Introducción a la Colorimetría.*

Habiendo definido los términos básicos de la colorimetría, procedemos ahora a presentar una breve introducción a esta ciencia. La colorimetría es el fundamento sobre el cual nuestro sistema fue construido. Se pueden escribir libros enteros sobre este tema [3], así que una descripción detallada está fuera del alcance de este documento, sin embargo describimos los métodos más comunes. El lector interesado debe consultar [3], [11], y [24] para una descripción más exhaustiva de este tema. También pueden encontrarse buenas introducciones a este tema en [32], [44], y [67].

### 1.3.1 Fundamentos de colorimetría.

Como se definió con anterioridad, la colorimetría es la ciencia de la medición y especificación de los estímulos de color. La filosofía completa de la colorimetría de tres colores puede ser expresada en un pequeño conjunto de axiomas. Estos axiomas son el resultado de experimentos y son estrictamente verdaderos bajo las condiciones de visualización usadas en ellos.

### 1.3.2 Axiomas de la colorimetría.

1. La mezcla de no más de tres luces de color puede igualar cualquier color.
2. Una igualación de color hecha bajo un nivel de radiancia se mantiene sobre cualquier otro nivel de radiancia.
3. El ojo no puede diferenciar los componentes de una mezcla de luces coloreadas.
4. La luminancia de una mezcla es igual a la suma de las luminancias de sus constituyentes.
5. Las igualaciones de color obedecen la ley de la adición; si un color **M** iguala a un color **N**, y un color **P** iguala a un color **Q**, entonces la mezcla aditiva de los colores **M** y **P** iguala a la mezcla aditiva de los colores **N** y **Q**, en otras palabras:

$$(\mathbf{M} = \mathbf{N}) \wedge (\mathbf{P} = \mathbf{Q}) \Rightarrow (\mathbf{M} + \mathbf{P} = \mathbf{N} + \mathbf{Q})$$

Donde el símbolo "=" debe leerse como "igual" y el símbolo "+" debe interpretarse como la mezcla aditiva de dos colores. Los otros símbolos tienen el significado usual empleado en lógica.

6. Las igualaciones de color obedecen a la ley de la substracción; si la mezcla aditiva de dos colores **M** y **P** igualan a la mezcla aditiva de los colores **N** y **Q**, y si el color **P** iguala al color **Q**, entonces el color **M** iguala al color **N**. En otras palabras:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{P} = \mathbf{N} + \mathbf{Q}) \wedge (\mathbf{P} = \mathbf{Q}) \Rightarrow (\mathbf{M} = \mathbf{N})$$

7. Las igualaciones del color obedecen la ley transitiva; si el color **M** iguala al color **N** y si el color **N** iguala al color **P**, entonces el color **M** iguala al color **P**:

$$(\mathbf{M} = \mathbf{N}) \wedge (\mathbf{N} = \mathbf{P}) \Rightarrow (\mathbf{M} = \mathbf{P})$$

8. Una igualación de color puede ser formulada como una ecuación. Por ejemplo, si decimos que el color  $\mathbf{C}$  es igualado por la mezcla aditiva de  $\mathbf{m}$  unidades del color  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{n}$  unidades del color  $\mathbf{N}$  y  $\mathbf{p}$  unidades del color  $\mathbf{P}$ , entonces podemos escribir:

$$\mathbf{C} = \mathbf{mM} + \mathbf{nN} + \mathbf{pP}$$

La representación vectorial de los colores se sigue de la ecuación anterior. En este caso, las coordenadas que corresponden al color  $\mathbf{C}$  están dadas por las cantidades  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{n}$  y  $\mathbf{p}$ , donde los símbolos  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$  y  $\mathbf{P}$  representan los vectores unitarios de los ejes del sistema.

### 1.3.3 Los experimentos fundamentales y los valores triestímulo.

Para el establecimiento del espacio de color CIE independiente de dispositivos y el observador colorimétrico estándar se necesitaron una serie de experimentos de igualación de colores, llamados los experimentos fundamentales [24]. En estos experimentos, un campo visual estaba dividido en dos partes. Una parte mostraba una muestra, mientras que la otra mostraba la mezcla aditiva de tres luces. El experimentador modificaba entonces las cantidades de las luces que se aplicaban para formar la mezcla hasta que ambas mitades del campo visual eran igualadas. Las muestras eran estímulos monocromáticos de color que barrían todo el espectro visible. Algunas veces, sin importar de qué forma el experimentador ajustara las luces, la igualación era imposible. En este caso, una de las luces se movía de un lado del campo visual al otro. Esto es equivalente, matemáticamente, a abstraer un color de otro. Las cantidades de luz necesarias para igualar todo el rango de luces monocromáticas son llamadas las *funciones de igualación del color* (CMF: Color Matching Functions)

Puesto que algunos valores en las funciones de igualación del color eran negativos (teniendo en mente el significado físico de esto), uno puede pensar que la elección de las luces primarias es errónea. Pero de hecho es posible probar que sin importar cuál sea el conjunto de las luces primarias, todas tendrán valores negativos en cierto rango. Para evitar este inconveniente, la CIE escogió un conjunto de primarios que sólo producían valores positivos en todas las longitudes de onda. Al hacer esto, las luces primarias tenían que ser *imaginarias*. Mientras que las luces usadas en el experimento real eran llamadas R, G y B, estas nuevas luces se llamaron X, Y y Z. Las

funciones de igualación de color son llamadas  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ , mientras que las funciones imaginarias son llamada  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ . El espacio de color creado de esta forma, CIEXYZ o simplemente XYZ, está referenciado con respecto a las propiedades de igualación del color del ser humano, así que este sistema es independiente de dispositivos.

Las funciones de igualación del color expresan las cantidades relativas de los primarios (reales o imaginarios) que deben ser mezcladas para igualar un color monocromático en cada longitud de onda específica. Cualquier estímulo de color puede ser expresado como una mezcla aditiva de sus constituyentes monocromáticos. Por las reglas de la colorimetría se sigue que las funciones de igualación del color pueden ser usadas para obtener la cantidades de los primarios que deben mezclarse (estas cantidades son llamadas valores triestímulo) para igualar cualquier estímulo de color dado, al igualar sus constituyentes monocromáticos. Puesto que las funciones de igualación del color están referenciados con respecto a un observador estándar, entonces los valores triestímulo producirán igualaciones para la mayoría de los observadores. Más detalles sobre estos experimentos se pueden encontrar en [3], [11], [24], [25] y [67].

Procedemos ahora a mostrar cómo se pueden calcular los valores triestímulo de un estímulo de color dado. Para este ejemplo usaremos la distribución espectral de potencia radiante medida para el punto blanco de un monitor (ver Fig 1.1, y Tabla 1.1).

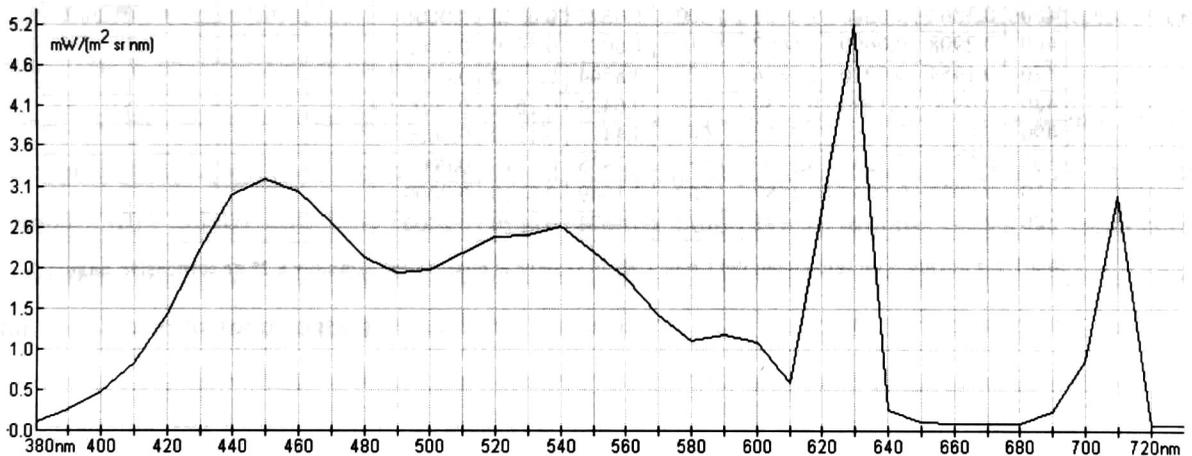


Fig 1.1. Gráfica de la distribución espectral de energía radiante del color blanco de un monitor.

$\lambda$	mW / (m <sup>2</sup> sr nm)	$\lambda$	mW / (m <sup>2</sup> sr nm)
380	0.1150	560	1.9462
390	0.2519	570	1.4793
400	0.4831	580	1.1378
410	0.8565	590	1.2306
420	1.4898	600	1.1364
430	2.3165	610	0.6150
440	3.0083	620	2.7787
450	3.2068	630	5.2014
460	3.0525	640	0.2579
470	2.6536	650	0.1047
480	2.2064	660	0.0862
490	2.0052	670	0.0895
500	2.0590	680	0.0883
510	2.2586	690	0.2390
520	2.4719	700	0.9027
530	2.4889	710	3.0012
540	2.6015	720	0.0743
550	2.2765	730	0.0730

Tabla 1.1. Distribución espectral de energía radiante de un color blanco de un monitor.

$\lambda$	x	y	z	$\lambda$	x	y	z	$\lambda$	x	y	z
380	0.0014	0.0000	0.0065	530	0.1655	0.8620	0.0422	680	0.0468	0.0170	0.0000
390	0.0042	0.0001	0.0201	540	0.2904	0.9540	0.0203	690	0.0227	0.0082	0.0000
400	0.0143	0.0004	0.0679	550	0.4334	0.9950	0.0087	700	0.0114	0.0041	0.0000
410	0.0435	0.0012	0.2074	560	0.5945	0.9950	0.0039	710	0.0058	0.0021	0.0000
420	0.1344	0.0040	0.6456	570	0.7621	0.9520	0.0021	720	0.0029	0.0010	0.0000
430	0.2839	0.0116	1.3856	580	0.9163	0.8700	0.0017	730	0.0014	0.0005	0.0000
440	0.3483	0.0230	1.7471	590	1.0263	0.7570	0.0011				
450	0.3362	0.0380	1.7721	600	1.0622	0.6310	0.0008				
460	0.2908	0.0600	1.6692	610	1.0026	0.5030	0.0003				
470	0.1954	0.0910	1.2876	620	0.8544	0.3810	0.0002				
480	0.0956	0.1390	0.8130	630	0.6424	0.2650	0.0000				
490	0.0320	0.2080	0.4652	640	0.4479	0.1750	0.0000				
500	0.0049	0.3230	0.2720	650	0.2835	0.1070	0.0000				
510	0.0093	0.5030	0.1582	660	0.1649	0.0610	0.0000				
520	0.0633	0.7100	0.0782	670	0.0874	0.0320	0.0000				

Tabla 1.2. Funciones de Igualación del Color CIE 1931 para el observador estándar a 2° de subtensión angular<sup>1</sup>.

Podemos obtener los valores triestímulo de estas distribuciones espectrales usando las fórmulas siguientes<sup>2</sup>:

<sup>1</sup> La subtensión angular es el tamaño aparente, medido en grados, que ocupa un área o campo visual.

<sup>2</sup> Las fórmulas originales son integrales definidas, no sumatorias. Para una discusión de porqué esto es así vea [3]. Hemos usado los límites de 380nm y 730nm en nuestras formulas puesto que el Spectrolino de GretagMacbeth sólo produce mediciones en este rango.

$$\begin{aligned}
 X &= k \sum_{\xi=380}^{730} S(\xi) x(\xi) \\
 Y &= k \sum_{\xi=380}^{730} S(\xi) y(\xi) \\
 Z &= k \sum_{\xi=380}^{730} S(\xi) z(\xi)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

$$k = 683 \text{ lumens/watt}$$

Donde:

$S(\lambda)$  es la distribución espectral de potencia radiante de la muestra.

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  y  $\bar{z}$ , son las funciones de igualación del color (ver Tabla 1.2)

- $k$  es un factor para normalizar.

El valor 683 lm/W es usado porque la función  $\bar{y}$  fue forzada por la CIE a corresponder con la función de eficiencia luminosa fotópica del ojo humano que, a su vez, tiene un máximo de 683 lm/W [3], [24], [25]. De esta forma, el valor triestímulo  $Y$  provee una correlación directa con la brillantez así como también con la cantidad del verde primario que debe aplicarse a la mezcla para igualar a  $S(\lambda)$ . Usando este valor para  $k$  se obtienen valores que pueden ser relacionados inmediatamente con unidades de luminancia absoluta, así que se dice que los valores obtenidos de esta forma fueron calculados usando *colorimetría absoluta*.

Las fórmulas anteriores multiplican cada longitud de onda del estímulo  $S(\lambda)$  por cada una de las funciones de igualación del color. Esto es equivalente a preguntar cuánto se necesita de cada luz primaria para igualar cada longitud de onda constituyente de  $S(\lambda)$ . Entonces, todas las cantidades necesarias para igualar cada longitud de onda se suman para producir el resultado final. Para nuestro ejemplo los valores triestímulo para la muestra son:  $X=132.4061$ ,  $Y=140.9015$ , y  $Z=190.3449$ . Nótese que el punto blanco del monitor tiene un gran contenido de azul. Regresaremos a este hecho en un capítulo posterior.

$\lambda$	Reflectancia	$\lambda$	Reflectancia
380	0.0571	560	0.0335
390	0.0602	570	0.0349
400	0.0711	580	0.0516
410	0.0856	590	0.1042
420	0.0951	600	0.1799
430	0.0955	610	0.2419
440	0.0917	620	0.2794
450	0.0851	630	0.2996
460	0.0782	640	0.3112
470	0.0725	650	0.3194
480	0.0669	660	0.3266
490	0.0636	670	0.3326
500	0.0629	680	0.3377
510	0.0580	690	0.3415
520	0.0459	700	0.3453
530	0.0364	710	0.3483
540	0.0340	720	0.3513
550	0.0348	730	0.3557

Tabla 1.3. Reflectancia espectral de una muestra de papel café.

Ahora considérese el espectro de reflectancia mostrado en la Tabla 1.3. La *reflectancia* se define como la razón de la luz incidente entre la luz reflejada de una superficie. No tiene unidades puesto que sólo especifica, para cada longitud de onda, cuánta luz se refleja. Similarmente, sólo los números entre 0.0 y 1.0 son posibles en una reflectancia espectral, mientras que cualquier valor positivo es posible para mediciones emisivas. Los espectros de reflectancia se usan para objetos que no son capaces de emitir luz propia, así que estos espectros no son en sí mismos estímulos de color. Para producir un estímulo de color a partir de una reflectancia espectral, uno debe multiplicarla por la distribución espectral de energía radiante de alguna fuente de luz. Así que, en este caso, las fórmulas para calcular los valores triestímulo son:

$$\begin{aligned}
 X &= k \sum_{\lambda=380}^{730} R(\lambda) L(\lambda) \bar{x}(\lambda) \\
 Y &= k \sum_{\lambda=380}^{730} R(\lambda) L(\lambda) \bar{y}(\lambda) \\
 Z &= k \sum_{\lambda=380}^{730} R(\lambda) L(\lambda) \bar{z}(\lambda)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda=380}^{730} L(\lambda) \bar{y}(\lambda)}$$

Donde  $R(\lambda)$  es la reflectancia (o transmitancia) de la muestra, y el nuevo factor  $L(\lambda)$  es la distribución espectral de potencia radiante de la fuente de luz usada para iluminar la muestra. Nótese que el producto  $S(\lambda) L(\lambda)$  produce una distribución espectral de potencia radiante, que es el estímulo de color que produciría la muestra si fuera iluminada por  $L(\lambda)$ . Una vez más, cuando multiplicamos esta expresión por cada función de igualación del color, estamos calculando las cantidades de las luces primarias que deben mezclarse para igualar este estímulo de color. Note también, que la única forma de obtener un valor  $Y = 100$ , en este caso, sería si la reflectancia (transmitancia) de la muestra fuera exactamente 1.0 en cada longitud de onda, pero esto es, por definición, un difusor (transmisor) perfectamente reflejante. Recuérdese también que el producto  $R(\lambda)L(\lambda)$  es por sí mismo otra distribución espectral de potencia radiante, así que sus valores triestímulo pueden ser calculados usando (1.1) también.

Las mediciones emisivas de las fuentes de luz prácticas son un poco difíciles. Factores como la distancia desde la fuente de luz y el ángulo en que se recibe la luz tienden a modificar la potencia de las mediciones. Así que en la mayoría de los casos, en lugar de usar los valores medidos del espectro, se escala de forma que el valor a 560nm sea 100. Además de crear las CMF's, la CIE también estandarizó las distribuciones espectrales de energía radiante para los iluminantes estándar. Estos iluminantes recibieron nombres como A, B y C, para fuentes de luz comunes, y nombres comenzando con D más un número para distribuciones representativas de luz de día, tales como D50 (ver Tabla 1.3), D55 (luz de día con una temperatura de color correlacionada de 5500°K) y D65. El número al lado de la D representa la temperatura del cuerpo negro cuya cromaticidad se aproxima más a la cromaticidad del iluminante estándar. Sin embargo, debemos hacer énfasis en que la temperatura de color correlacionada se refiere sólo a la cromaticidad mostrada. Esto no implica que las distribuciones espectrales sean iguales, ni que, por ejemplo, una lámpara con una temperatura de color de 6500°K esté operando a dicha temperatura.

$\lambda$	Potencia relativa	$\lambda$	Potencia relativa
380	24.49	560	100.0
390	29.87	570	97.74
400	49.31	580	98.92
410	56.51	590	93.50
420	60.03	600	97.69
430	57.82	610	99.27
440	74.82	620	99.04
450	87.25	630	95.72
460	90.61	640	98.86
470	91.37	650	95.67
480	95.11	660	98.19
490	91.96	670	103.00
500	95.72	680	99.13
510	96.61	690	87.38
520	97.13	700	91.60
530	102.10	710	92.89
540	100.75	720	76.85
550	102.32	730	86.51

**Tabla 1.4. Distribución espectral del iluminante estándar D50.**

Finalmente, se puede ver fácilmente que la nueva fórmula para  $k$  mostrada en (1.2), automáticamente elimina cualquier escalamiento hecho a la distribución espectral de la fuente de luz. Así que realmente no importa si la distribución espectral (SPD) de la fuente de luz fue normalizada o no, puesto que los valores triestímulo serán iguales. En este sentido, no hay forma de relacionar el valor triestímulo  $Y$  con una medición absoluta de luminancia, así que decimos que los valores triestímulo producidos de esta forma fueron calculados usando *colorimetría relativa*. Para nuestro ejemplo, los valores triestímulo de la muestra de papel café, usando el iluminante estándar D50 son:  $X = 14.5520$ ,  $Y = 8.9548$  y  $Z = 6.5886$ .

Otro hecho que es pertinente mencionar es que los valores triestímulo para los iluminantes estándar pueden ser calculados usando colorimetría relativa y el difusor perfectamente reflejante.

Debemos advertir acerca del uso de los términos *colorimetría absoluta* y *colorimetría relativa*. El ICC usa estos términos para indicar dos intentos de producción, que se refieren a algoritmos de mapeo entre gamuts (GMA Gamut Mapping Algorithms). En este contexto, sin embargo, empleamos estos términos para indicar si los valores triestímulo pueden o no ser relacionados con unidades de luminancia absoluta (estos términos son empleados en este mismo sentido en [3] y [44]). Más aún, dentro de los perfiles ICC, los valores triestímulo se dividen entre 100. Así que el valor para  $k$  expresado en (1.1) se convierte en 6.83 y los valores triestímulo calculados con anterioridad se cambian a  $X = 1.3240$ ,  $Y = 1.4090$ ,  $Z = 1.9034$  para el blanco de monitor y a  $X = 0.1455$ ,  $Y = 0.0895$  y  $Z = 0.0658$  para la muestra de papel café.

La CIE también definió algunos otros espacios de color como el  $L^*u^*v^*$ ,  $L^*a^*b^*$  y  $L^*C^*h^*$ . Pero todos estos espacios son transformaciones del espacio XYZ original. El espacio CIEXYZ no es perceptualmente uniforme, esto es, la distancia euclidiana entre dos puntos no tiene relación con la diferencia percibida entre los colores. Los espacios que se acaban de mencionar están diseñados para ser perceptualmente uniformes para la gran mayoría de los observadores. De interés particular es el espacio CIEL $^*a^*b^*$  puesto que se ha convertido en el estándar en la industria para especificar diferencias entre los colores. También es parte del formato del perfil ICC. El espacio CIEXYZ fue construido con muchos observadores, y revisado en los 70s. El espacio  $L^*a^*b^*$  también es el producto de varias revisiones hechas a otros espacios perceptualmente uniformes, como el espacio  $L^*u^*v^*$  (que fue a su vez, una revisión del espacio  $U^*V^*W^*$ , derivado de una revisión del diagrama CIE 1960 UCS [3]). El espacio  $L^*a^*b^*$  fue revisado nuevamente en el modelo CIECAM97 [44,45]. Pero esta revisión requiere que se usen ciertos factores constantes que sólo están disponibles para un conjunto limitado de condiciones de visualización estándar. Puesto que nuestra investigación concierne el uso de iluminantes no estándar, las fórmulas revisadas no pudieron ser empleadas. Sin embargo, para compensar esta falta, la diferencia perceptual mínima fue medida siempre que fue posible para poner los resultados experimentales en contexto. Las fórmulas para transformar valores XYZ en  $L^*a^*b^*$  son:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16, \text{ para } Y/Y_n > 0.008856 \quad (1.3)$$

$$L^* = 903.3 \frac{Y}{Y_n}, \text{ para } Y/Y_n \leq 0.008856 \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} a^* &= 500 \left[ f \left( \frac{X}{X_n} \right) - f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right] \\ b^* &= 200 \left[ f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - f \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$f(t) = t^{1/3}, \text{ para } t > 0.008856 \quad (1.6)$$

$$f(t) = 7.787t + \frac{16}{116}, \text{ para } t \leq 0.008856 \quad (1.7)$$

Donde:

$X_n, Y_n, Z_n$  son los valores triestímulo del punto blanco de referencia, y  $X, Y, Z$  son los valores triestímulo a ser convertidos. Así, el espacio  $L^*a^*b^*$  siempre es relativo con respecto a algún punto blanco. En el sistema  $L^*a^*b^*$ , tener una  $L^*$  de 100 (esta coordenada provee una correlación directa con la *claridad*) significa que el color tiene la misma claridad que el blanco de referencia, y valores mayores que 100 predicen claridades mayores que las del blanco de referencia. La fórmula de diferencia del color es:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (1.8)$$

Usando esta fórmula, una  $\Delta E^*$  de 1 corresponde con la diferencia apenas notable entre dos colores, y es usada ampliamente para fijar márgenes para el control de la calidad. El lector debe consultar [3] para más detalles sobre este y otros espacios de color relacionados.

Para concluir esta sección, deseamos enfatizar que el simple uso de la colorimetría no garantiza necesariamente una igualación visual entre dos colores en diferentes medios. En la siguiente sección discutiremos algunos efectos fisiológicos y psicológicos que modifican la apariencia del color. Esto es importante, porque estos fenómenos no son tomados en cuenta en la colorimetría simple. La colorimetría es suficiente cuando las condiciones de visualización están estrictamente controladas. Pero las condiciones reales presentes en la mayoría de los ambientes en que se visualiza el color provocan que estos fenómenos modifiquen el color percibido. Puesto que esta tesis incluye tales condiciones de visualización es importante mencionar algunos de estos efectos.

## **1.4 La apariencia del color.**

### **1.4.1 Efectos psicológicos y fisiológicos.**

En la sección anterior se describimos los métodos usados actualmente para medir estímulos de color. Dados estos métodos uno podría pensar que el problema de igualar colores entre diferentes medios se resuelve igualando sus valores triestímulo. Generalmente éste no es el caso, puesto que estamos midiendo el *estímulo de color*, mas no el *color en sí* (para una discusión a fondo sobre este tema, vea [26]). Puesto que el color es una sensación subjetiva, es fácil que se altere por efectos psicológicos que no pueden ser predichos a partir del estímulo de color. Algunos de estos efectos son:

- **Memoria del color.** Este fenómeno se refiere a la asociación de cierto color a objetos bien conocidos y reconocibles dentro de una escena.
- **Constancia del color.** Se refiere al fenómeno por el cual el color de un objeto se mantiene más o menos igual sin importar los cambios de la cromaticidad del iluminante.
- **Descontar el iluminante.** Se refiere a la habilidad que tiene un observador para descontar automáticamente los efectos de la iluminación ambiente sobre los colores percibidos. Por
- **Reconocimiento de objetos.** Una vez que un objeto ha sido reconocido y los mecanismos de la memoria del color y descontar el iluminante han ocurrido, la mente del observador rellena el color apropiado para los objetos en la escena. Un ejemplo clásico de esto es la “percepción” de color en fotografías en blanco y negro donde aparecen objetos familiares [44].

El lector interesado debería consultar [44] para una discusión más detallada de estos efectos.

#### 1.4.2 Contraste simultáneo, encrespamiento, y distribución.

Algunos efectos ópticos pueden causar que la apariencia del color cambie, algunos de los más importantes son:

- **Contraste simultáneo:** causa un cambio en la apariencia del color cuando el color del fondo es modificado. Este cambio aparente del color sigue la teoría de los colores opuestos de la visión del color. En otras palabras, un fondo claro induce que un estímulo cercano parezca más oscuro, un fondo oscuro produce una apariencia más clara, el rojo induce al verde, el verde al rojo, y el azul induce amarillo y viceversa.
- **Encrespamiento:** es el incremento en la magnitud de las diferencias del color cuando el fondo sobre el cual se comparan los dos estímulos es similar en color a los estímulos en sí mismos.
- **Distribución:** es la mezcla aparente de los estímulos de color con su entorno. Este efecto es completo cuando existe fusión espacial entre los colores y el observador no puede distinguir los colores individuales (como en una pantalla de *semitono*). Este efecto ocurre a frecuencias donde la fusión no ocurre, es decir, los colores todavía pueden ser distinguidos entre sí, pero ya comienzan a mezclarse.

Más efectos y ejemplos pueden encontrarse en [44].

### 1.4.3 Condiciones de visualización.

Las condiciones bajo las cuales se observa un color también pueden modificar su percepción. La descripción de estas condiciones es importante para el experimento que realizamos para validar nuestro sistema.

El color de un estímulo depende tanto del estímulo en sí mismo, como de la presencia de otros estímulos cercanos. La situación espacial de los estímulos puede simplificarse definiendo un número mínimo de componentes importantes dentro del campo visual. Uno de los conjuntos más extensos de componentes fue propuesto por Hunt [44], de acuerdo a su definición, el campo visual está dividido en cuatro componentes (la Fig 1.2 muestra una representación gráfica de estos componentes):

1. El estímulo.
2. El campo próximo.
3. El fondo.
4. El entorno.

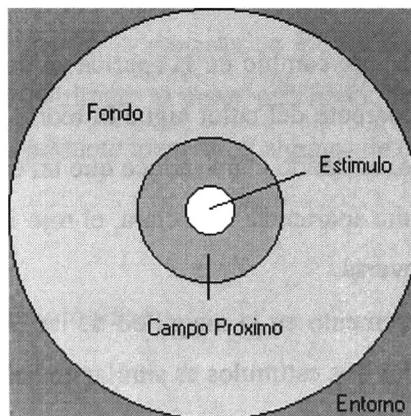


Fig 1.2. Especificación de los componentes del campo visual

#### 1.4.3.1 Estímulo.

El estímulo es el elemento de color para el cual se desea hacer la medición de apariencia del color. Típicamente, el estímulo se toma como un parche de color uniforme de  $2^\circ$  de subtensión angular. Se

considera que el observador estándar de la CIE 1931 es válido para estímulos de 1° a 4° de subtensión angular. La visión tricromática se rompe para estímulos de tamaño substancialmente menor, mientras que el observador estándar suplementario CIE 1964 debe ser usado con estímulos mayores o iguales a 10° de subtensión angular.

#### 1.4.3.2 Campo próximo.

El campo próximo es el ambiente inmediato del estímulo que se extiende desde aproximadamente 2° desde el borde del estímulo en todas, o casi todas, las direcciones. La definición del campo próximo es útil para modela efectos de contraste simultáneo locales.

#### 1.4.3.3 Fondo.

El fondo se define como el ambiente del estímulo que se extiende a partir de 10° desde el borde del estímulo (o el campo próximo, si está definido) en todas, o casi todas las direcciones. La especificación del fondo es absolutamente necesaria para modelar el contraste simultáneo.

#### 1.4.3.4 Entorno.

El entorno es el resto del campo visual fuera del fondo. En situaciones particulares, el entorno puede ser considerado como el cuarto completo o el ambiente en el cual la imagen (o el estímulo) es observado.

#### 1.4.3.5 Modos de visualización.

Discutiremos ahora otro aspecto de la visión de color que modifica el color percibido: la forma en que el color es observado. La Sociedad Óptica de América (OSA) define los siguientes modos de visión:

- **Iluminante:** En este modo, el color se percibe como perteneciente a una fuente de luz. Este es un “modo objeto” (el color parece pertenecer a un objeto) y puede ser tipificado como “resplandor”

- **Iluminación:** En este modo el color se atribuye a las propiedades que prevalecen en la iluminación, en lugar de los objetos. Este es un modo de visión “no-objeto” y es mediado por la presencia de objetos iluminados que reflejan la luz y producen sombras.
- **Superficie:** En este modo, el color se percibe como perteneciente a una superficie. Este es un “modo objeto”
- **Volumen:** En este modo, el color se percibe como perteneciente al grueso de una sustancia más o menos transparente y uniforme. Este es un “modo objeto” y requiere transparencia y una estructura tridimensional.
- **Película:** En este modo (también conocido como *modo de apertura*), el color se percibe a través de una apertura sin conexión alguna con un objeto. Este es un “modo no-objeto” Todos los otros modos de visión pueden reducirse a éste.

#### 1.4.4 Adaptación cromática.

Uno de los efectos fisiológicos más importantes en la apariencia del color es la adaptación cromática. La *adaptación* es la habilidad de un organismo para cambiar su sensibilidad a un estímulo en respuesta a cambios en las condiciones de estimulación. En la visión de color, hay tres tipos de adaptación: adaptación a la luz, adaptación a la oscuridad y adaptación cromática. Los primeros dos se refieren a cambios en la sensibilidad del ojo humano cuando el nivel de luminancia general se incrementa o decrecienta.

**La adaptación cromática** es la habilidad que tiene el sistema visual humano para ajustarse a diferentes cromaticidades en la iluminación para preservar, aproximadamente, la misma apariencia del color en los objetos. Este fenómeno puede ser entendido mejor cuando se considera un sistema que no es capaz de hacer adaptación cromática. Por ejemplo, una cámara fotográfica. Si se toma una fotografía de una imagen impresa mientras es iluminada bajo luz de tungsteno y luego cambiamos la iluminación a luz fluorescente y tomamos otra foto, notaremos una diferencia en la tonalidad general de las fotos: la primera aparece con un tono más amarillo que la segunda. Mientras que los colores permanecen más o menos iguales según nuestra percepción (principio de la constancia del color). Esto sucede porque la cámara no puede sufrir una adaptación cromática. La adaptación ocurre porque los conos y bastones en el ojo se vuelven menos sensibles a la cromaticidad de la iluminación prevaleciente. Más detalles sobre la adaptación cromática pueden verse en [3], [44], y [67].

#### 1.4.5 Versión impresa contra reproducción en pantalla.

Puesto que el experimento que diseñamos estaba diseñado para comparar colores desplegados en un monitor contra colores impresos, también es pertinente mencionar los problemas que tales comparaciones conllevan. De acuerdo a [44], cuando un observador mira una imagen impresa, su cerebro activa los mecanismos de adaptación cromática, mientras que al observar la reproducción de la misma imagen en pantalla tales mecanismos no se activan. Esto representa un gran problema puesto que necesitamos evaluar muestras impresas contra colores desplegados simultáneamente. Debe ser notado que este problema se encuentra en todos los experimentos donde la adaptación cromática se lleva a cabo usando dos fuentes de luz diferentes. Por ejemplo, algunos métodos experimentales necesitan que el observador memorice un color para luego hacer una igualación contra el color recordado. Sin embargo, este método requiere un período de entrenamiento para que los observadores aprendan a especificar colores en términos de un espacio de color uniforme como el sistema de color Munsell (más detalles al respecto pueden encontrarse en [3] y [44]).

Para los propósitos de este trabajo, sólo la adaptación cromática será tomada en cuenta como parte de sistema. Las condiciones de visualización son importantes para el diseño del experimento que se realizó para validar el sistema.



## Capítulo 2. Manejo de Color Multiplataforma.

---

El objetivo de este capítulo es presentar la solución de la primera meta de esta tesis, es decir, construir un Sistema de Manejo de Color (CMS) multiplataforma que siga el estándar ICC. Discutimos brevemente el estándar ICC. Presentamos algunos problemas detectados en aplicaciones de manejo de color profesionales de terceros, y cómo los solucionamos. Finalmente mostramos los resultados de las pruebas hechas para validar que nuestro sistema soporta los perfiles ICC.

---



## 2.1 La solución ICC al problema del manejo de color.

Habiendo discutido los sistemas de manejo de color actuales y la colorimetría, procedemos ahora a mostrar cómo solucionamos el primero de los problemas establecidos al principio de la tesis, a saber, la implementación de un sistema de manejo de color multiplataforma con soporte para perfiles ICC.

Debería ser claro, por lo discutido hasta ahora, que cualquier solución al problema del manejo del color debe utilizar, por lo menos, colorimetría y adaptaciones cromáticas, puesto que es muy probable que se usen dispositivos con puntos blancos diferentes. Como se ha mencionado con anterioridad, el ICC estableció un conjunto de condiciones de visualización de referencia para definir un espacio de color independiente de dispositivos. Los dispositivos son caracterizados y medidos con respecto a este espacio de color estándar de forma que los colores pueden ser mapeados fácilmente de un dispositivo a otro.

Las condiciones de visualización de referencia consisten –entre otras cosas– de un iluminante D50 ideal y un difusor perfectamente reflejante [1][2]. Todas las mediciones deben ser hechas en XYZ o  $L^*a^*b^*$  formando lo que se conoce como un *Espacio de Conexión de Perfiles* (PCS Profile Connection Space). Esto quiere decir que para las mediciones de medios reflejantes semitransparentes, que el iluminante que debe ser usado para los cálculos colorimétricos debe ser el D50 [1]. Para los despliegues autoluminosos como los monitores y escáners, las coordenadas medidas deben transformarse de forma que el punto blanco del medio corresponda con el punto blanco del PCS. Esto puede realizarse con una transformación de adaptación cromática o con un mapeo simple. En la práctica, sin embargo, la última opción es más usada.

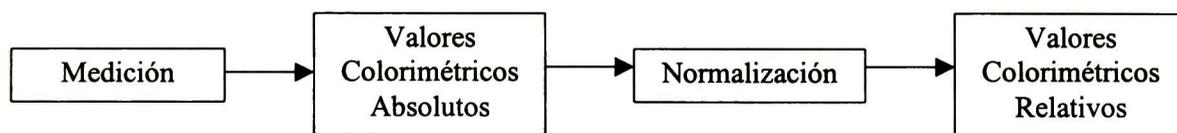


Fig 2.1. Diagrama del proceso típico de caracterización de un dispositivo usando el estándar ICC.

La Fig 2.1 muestra el proceso típico que se sigue para caracterizar un dispositivo usando el estándar ICC. Primero, se produce y mide un subconjunto de todos los colores que un dispositivo es capaz de reproducir. El subconjunto debe ser lo suficientemente grande como para abarcar una porción significativa del gamut del dispositivo. Existen algunos estándares como el IT8.7/3 [32] que indican

cuáles colores deben ser medidos. Los datos obtenidos en esta etapa son llamados *absolutos colorimétricos*, aunque este término no significa lo mismo que en la sección 1.3, puesto que los valores de, por ejemplo, una impresora, pueden calcularse usando *colorimetría relativa*. Antes bien, este término se emplea aquí para indicar que el punto blanco del medio no ha sido mapeado. Estos valores son procesados para hacer que el punto blanco del dispositivo coincida con el punto blanco del PCS, es decir, los valores triestímulo del D50: 0.9642, 1.0, 0.8249. El estándar ICC provee unas fórmulas para esta conversión [1], que reproducimos en seguida:

$$\begin{aligned} X_R &= X_A(X_i / X_{MW}) \\ Y_R &= Y_A(Y_i / Y_{MW}) \\ Z_R &= Z_A(Z_i / Z_{MW}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Donde:

$X_R, Y_R, Z_R$  son los valores colorimétricos relativos (valores normalizados).

$X_A, Y_A, Z_A$  son los valores colorimétricos absolutos (los datos medidos).

$X_i, Y_i, Z_i$  son los valores triestímulo para el punto blanco del PCS (D50).

$X_{MW}, Y_{MW}, Z_{MW}$  son los valores triestímulo para el punto blanco del dispositivo.

Puede verse fácilmente que estas fórmulas simplemente escalan un conjunto de coordenadas de forma que el punto blanco del dispositivo sea mapeado al punto blanco del PCS. Esto se aplica aún para dispositivos de salida y semitransparentes, donde los valores medidos se calculan usando la distribución espectral del D50. En este caso, aunque los valores ya están referenciados con respecto al D50, son procesados de todas maneras para forzar a que el punto blanco coincida con el D50. Una vez que los valores han sido escalados de la forma descrita, son llamados *valores colorimétricos relativos*.

Una vez que los valores colorimétricos relativos han sido calculados, son procesados una vez más para tomar en cuenta la compresión de gamuts, es decir, para generar los intentos de producción que ya se han descrito.

Puesto que un intento de producción absoluto colorimétrico puede ser derivado de un intento relativo colorimétrico, y viceversa mediante la fórmula (2.1), sólo los datos para el intento relativo se almacenan en el perfil. Los datos para los otros intentos de producción siempre se encuentran en los perfiles de salida (aunque los datos pueden repetirse, es decir, un intento de saturación puede tener los mismos datos que un intento relativo colorimétrico), pero son opcionales para el resto.

En el estándar ICC sólo hay dos formas para describir un dispositivo: el primer modelo utiliza N funciones gamma de entrada y una matriz, y el segundo modelo usa N funciones gamma de entrada, una Tabla de Búsqueda de Colores (CLUT: Color LookUp Table), y M funciones gamma de salida. El primer modelo es utilizado para dispositivos que presentan un comportamiento más o menos lineal como los monitores y escáners. El segundo modelo puede emplearse con cualquier dispositivo.

Teóricamente, para mapear un color de un dispositivo a otro, uno tiene que escoger primero un intento de producción, transformar las coordenadas de dispositivo a coordenadas del PCS, y luego invertir el modelo para el dispositivo destino. Los intentos de producción definen las formas en que se prefiere mapear los colores que quedan fuera de gamut, por ejemplo, un intento perceptual raramente producirá imágenes con colores igualados entre diferentes dispositivos, pero las imágenes generadas en el dispositivo destino retendrán las características relativas como la claridad, y el contraste produciendo imágenes aceptables la mayor parte del tiempo. Para nuestros propósitos, sin embargo, deseamos poder hacer igualaciones colorimétricas para poder juzgar qué tan bien se igualan los colores a través de diferentes medios.

## **2.2 Verificando la validez del sistema.**

Para verificar que nuestro sistema podía predecir los colores de forma correcta a partir de la información almacenada en los perfiles ICC, y para verificar la validez de los algoritmos implementados, primero producimos dos perfiles usando un software de terceros (El ProfileMaker Professional 3.0 de LOGO). Caracterizamos un monitor y una impresora. Puesto que nuestras pruebas estarían limitadas a verificar que las mediciones tomadas con los instrumentos igualaban a los valores predichos, usamos un intento de producción absoluto colorimétrico durante todas las pruebas.

En la primera prueba, un monitor fue caracterizado y luego el sistema se utilizó para desplegar un conjunto de colores cuyas coordenadas RGB eran usadas para predecir los valores triestímulo que serían medidos por el instrumento. El ambiente donde el monitor fue caracterizado y probado no se modificó. Además, siempre posicionamos el Spectrolino de GretagMacbeth en el centro de la pantalla para evitar cualquier variación en el color debida a la distribución espacial del color en la pantalla. Finalmente, usamos el mismo programa para caracterizar y medir el monitor (El MeasureTool de LOGO) para evitar cualquier error que podría producirse al usar programas de medición diferentes.

Sorprendentemente, aún cuando el Spectrolino estaba configurado para producir mediciones emisivas de valores triestímulo absolutos [75][76], y estábamos usando un intento colorimétrico absoluto todo el tiempo, las diferencias entre los valores predichos y los medidos estaba más allá de los errores que podían ser atribuidos a las variaciones en el instrumento o el monitor (El manual del Spectrolino [74] afirma que su variabilidad en la concordancia entre instrumentos es, en promedio  $0.3\Delta E^*$  para el D50 a  $2^\circ$ , y  $0.8\Delta E^*$  como máximo para esas mismas condiciones, con una repetitibilidad a corto plazo de  $0.03\Delta E^*$  como valor promedio). Algunas de las mediciones pueden apreciarse en la Tabla 2.1.

Valor RGB del dispositivo	Valor $L^*a^*b^*$ predicho	Valor $L^*a^*b^*$ medido
1, 0, 0	50.7659, 73.3086, 63.5029	60.3, 79.7, 61.6
0, 1, 0	86.4005, -82.200, 88.6683	101.1, -97.6, 80.9
0, 0, 1	41.4351, 68.497, -93.9235	49.5, 74.0, -147.6
1, 1, 1	99.998, -0.002, 4.322E-4	119.1, -6.1, -42.6

**Tabla 2.1. Valores  $L^*a^*b^*$  predichos y medidos para un monitor.**

Calculemos ahora la diferencia perceptual entre los valores  $L^*a^*b^*$  predichos y los medidos para el punto blanco del monitor. Usando la ecuación (1.8) con los valores mostrados (99.998, -0.002, 4.322E-4 y 119.1, -6.1, -42.6) se obtiene una  $\Delta E^*$  de 47.08. Como se ha dicho anteriormente, es una práctica común asignar una  $\Delta E^*$  de 1 a la diferencia perceptual apenas discernible, y usarla como control de calidad. Es obvio que algo realmente debe estar fallando cuando vemos que nuestras predicciones tienen un valor  $\Delta E^*$  tan grande con respecto a los valores medidos.

Además, notamos que debe haber algo incorrecto cuando vemos que el valor del componente  $L^*$  medido para el punto blanco del monitor está por encima de 100. Esto sólo puede pasar si el punto blanco de referencia se ha escogido de forma incorrecta en las ecuaciones (1.3)-(1.7) para la transformación de XYZ a  $L^*a^*b^*$  (se pudo comprobar posteriormente que este era el caso puesto que el MeasureTool estaba usando las coordenadas del D50 como punto blanco de referencia, en lugar de las coordenadas del punto blanco del monitor). Para evitar este problema, decidimos medir los colores otra vez pero en el sistema XYZ, los valores se muestran abajo:

Valor RGB del dispositivo	Valor XYZ predicho	Valor XYZ medido
1, 0, 0	0.3631, 0.1906, 0.0141	0.5261, 0.2845, 0.0352
0, 1, 0	0.3574, 0.6879, 0.0699	0.5205, 1.0287, 0.1826
0, 0, 1	0.2435, 0.1213, 0.7407	0.3489, 0.18003, 1.8234
1, 1, 1	0.9641, 0.9999, 0.8248	1.3786, 1.4768, 2.03767

**Tabla 2.2. Valores XYZ medidos y predichos para un monitor.**

Se pensó que si el MeasureTool estaba usando el punto blanco de referencia incorrecto, entonces las mediciones en el espacio XYZ estarían exentas de este error y producirían los valores correctos. Pero como puede verse, este no es el caso tampoco. En este punto pensamos, por supuesto, que nuestro sistema estaba mal así que procedimos a verificarlo una y otra vez, sin lograr avance alguno. El código parecía ser correcto, pero sin embargo, los valores predichos siempre eran inaceptables bajo cualquier criterio.

Después de algún tiempo nos dimos cuenta de un hecho muy particular acerca de los valores triestímulo medidos: la razón X:Y:Z en ambos conjuntos de datos es aproximadamente la misma. Esto nos llevó a descubrir que los valores medidos pueden ser obtenidos multiplicando los valores predichos por tres factores de corrección. Pero el punto era, ¿porqué? Si examinamos atentamente los valores predichos para el punto blanco veremos que son muy parecidos a los valores del punto blanco del D50: (0.9642, 1.0, 0.8249). Así que, el problema era que estábamos realizando un intento de producción relativo colorimétrico en lugar de un intento absoluto colorimétrico (recuérdese cómo en los intentos relativos, el punto blanco del medio es forzado a igualar los valores triestímulo del D50). Una vez más, revisamos nuestros algoritmos, pero descubrimos que los valores almacenados en los perfiles eran incorrectos. Lo que sucedía era que el ProfileMaker estaba escribiendo perfiles con información errónea. En lugar de almacenar el valor absoluto para el punto blanco del medio (necesarios para realizar un intento absoluto colorimétrico), estaba escribiendo los valores triestímulo para el D50. Así que, cuando creíamos realizar un intento absoluto colorimétrico usando los valores incorrectos para el punto blanco del medio, en realidad terminábamos realizando un intento relativo colorimétrico.

Este extraño error no se esperaba en un software de terceros puesto que es usado como herramienta profesional para manejar el color en procesos de calidad, especialmente considerando su alto costo. Sin importar de qué forma se ajustara la luminancia del monitor o se cambiara el punto blanco de otra forma, el ProfileMaker siempre almacenaba los valores triestímulo para el D50 en el perfil. Esto efectivamente hacía que el perfil fuera inútil por sí mismo para producir intentos absolutos

colorimétricos, forzando a que el usuario usara intentos relativos todo el tiempo. Sin embargo, cuando corregimos este error, medimos los mismos datos otra vez y obtuvimos resultados aceptables (mostrados en la Tabla 2.3).

Valor RGB del dispositivo	XYZ predicho	XYZ medido	$\Delta E^*$
1, 0, 0	0.4779, 0.2593, 0.0322	0.479, 0.259, 0.033	0.6086157
0, 1, 0	0.4704, 0.9355, 0.15901	0.479, 0.943, 0.165	1.2069495
0, 0, 1	0.3205, 0.1650, 1.6827	0.319, 0.165, 1.657	1.1039625
1, 1, 1	1.269, 1.36, 1.874	1.269, 1.36, 1.874	0

Tabla 2.3. Valores XYZ predichos y medidos para un monitor cuando el punto blanco del medio correcto fue usado.

No es de sorprender que los valores triestímulo para el punto blanco sean exactamente iguales, puesto que la ecuación (2.18) fuerza a que esto suceda. Las  $\Delta E^*$  fueron calculadas usando los valores XYZ medidos para el punto blanco del monitor. Lo que es significativo, sin embargo, es que todos los otros valores son mucho más parecidos ahora. El mismo procedimiento puede ser aplicado para los datos mostrados en la Tabla 2.2. Pensando que quizá el mismo error estaría presente en los perfiles de impresora, caracterizamos una impresora y la probamos con unos cuantos colores impresos. En este caso, las  $\Delta E^*$ s se calcularon usando el punto blanco del medio almacenado dentro del perfil mismo. Los resultados de estas mediciones pueden verse debajo:

Valor CMYK	L*a*b* predicho	L*a*b* medido	$\Delta E^*$
0, 0.94, 0, 0	51.299, 62.26, -2.9042	50.9, 62.2, -2.8	0.4167237
0.69, 0.20, 0, 0	54.883, -18.579, -45.8323	56.0, -23.2, -44.7	4.88706796
0.94, 0, 0, 0	54.507, -19.701, -46.3672	55.3, -23.6, -45.5	4.07223352
0, 0, 1.0, 0	88.834, -7.364, 79.9815	89.2, -6.6, 81.3	1.56719311
0.38, 0.38, 0.38, 0	62.312, 1.033, -27267	64.5, 0.4, -3.2	2.32638043
0.2, 1.0, 0.69, 0	45.54, 53.305, 19.1308	45.2, 53.0, 17.6	1.59748979

Tabla 2.4. Valores L\*a\*b\* medidos y predichos para una impresora.

Los resultados sugieren que el punto blanco del medio almacenado en las impresoras es correcto. Sin embargo, dejamos abierta la posibilidad de que el programador proporcionara sus propios valores para el punto blanco del medio para impresoras también. Una vez que tuvimos la confianza suficiente para afirmar que nuestro sistema estaba funcionando razonablemente bien, y sabiendo cómo corregir los perfiles ICC para usarlos adecuadamente, procedimos a realizar pruebas más extensas.

### 2.3 Pruebas en impresoras.

Para probar que los algoritmos implementados para manejar el modelo CLUT de procesamiento del color en los perfiles ICC era correcto, caracterizamos una impresora y entonces intentamos predecir los valores coloriméricos que serían medidos para ese mismo conjunto de colores. El sentido común dicta que los errores deberían ser cero o algo cercano a él, puesto que estamos usando el mismo conjunto de datos para caracterizar y para probar. La carta de caracterización /prueba usada fue la “TC 3.5 CMYK DTP41.TIF”, que es un archivo estándar usado por el ProfileMaker para caracterizar impresoras usando el DTP41 (un espectrofotómetro manufacturado por X-Rite que se usa para medir tiras de colores de forma automática), que íbamos a usar. El proceso de caracterización consistía de dos etapas. En la primera etapa, el MeasureTool se usaba para leer las tiras de colores y almacenar de manera automática los valores medidos dentro de un archivo de texto. En la segunda etapa, este archivo de texto y un archivo de referencia conteniendo los valores CMYK impresos se usaban como entradas al ProfileMaker para generar el perfil.

De forma similar, utilizamos el archivo de referencia y el perfil generado como entradas para nuestro sistema, que entonces generaba los valores coloriméricos predichos para ser comparados con los valores medidos (almacenados en el archivo de texto generado por el MeasureTool). Luego, la  $\Delta E^*$  se calculaba entre los valores predichos y los valores medidos, usando el punto blanco correcto. Este punto blanco se corregía también en los perfiles, usando el valor medido para evitar cualquier error que pudiera ser introducido por el ProfileMaker.

El ProfileMaker permite al usuario seleccionar dos tipos diferentes de intentos de producción perceptuales para los perfiles de impresoras: el modo “Paper Gray Axis” adapta el eje gris de la separación al punto blanco del papel, y el modo “Preserve Gray Axis” donde las separaciones retienen la apariencia del original, ayudando a mantener los grises neutrales de forma independiente del papel [75]. Puesto que estos eran intentos perceptuales, no deberían modificar los intentos absolutos que íbamos a usar. Sin embargo, generamos un perfil para cada tipo de intento perceptual. Finalmente, el ProfileMaker permite al usuario seleccionar el tipo de separación que se usa para imprimir los colores. Este algoritmo de separación debe coincidir con los mecanismos de separación usados en la realidad. Así que los igualamos con los algoritmos empleados por el PhotoShop 5.5 que

usamos para imprimir la carta de caracterización. En total, se probaron 864 colores, los resultados de estas pruebas pueden verse en seguida:

	Componente L*	Componente a*	Componente b*
Error mínimo:	0.001407290813638439	2.143339784055342E-5	6.618018261441705E-4
Error máximo:	4.127340880261386	4.643645870447096	4.18439256384166
Error promedio:	0.5090859897891459	0.5934380632530081	0.6582483477844421
$\Delta E^*$ promedio:	1.02		

Tabla 2.5. Resultados para el perfil que de eje gris del papel.

	Componente L*	Componente a*	Componente B*
Error mínimo:	4.69687388829243E-4	2.143339784055342E-5	5.610231767150253E-4
Error máximo:	4.409902081864942	4.829733126105314	4.298526519350316
Error promedio:	0.5089544185600898	0.6157118510891512	0.6689343473169186
$\Delta E^*$ promedio:	1.04		

Tabla 2.6. Resultados para el perfil que preserva el eje gris.

Es extraño notar que los errores sí cambian si se cambia el tipo de intento perceptual usado. Sin embargo, en ambos casos, la  $\Delta E^*$  es aceptable, confirmando que nuestros algoritmos trabajan bien. Qué contienen los perfiles y cómo se relaciona con las mediciones originales, sin embargo, no es responsabilidad nuestra. Así que el usuario debe verificar que el software que está usando realmente produzca perfiles ICC confiables.

Otro hecho extraño que podemos obtener de estas pruebas es que los colores usados para crear el perfil y para hacer las pruebas fueron *exactamente los mismos*. Se midieron sólo una vez, así que no puede haber variaciones en el instrumento que introduzcan errores. Sin embargo, al final terminamos con una  $\Delta E^*$  cercana a 1. ¿Cómo podemos explicar este error? Primero, debemos considerar cómo se acomodan los colores dentro de la carta de caracterización. En esta imagen, hay 27 tiras con 16 colores en cada una, haciendo un total de 432 colores. Cada color corresponde con un valor CMYK dado. Al examinar el archivo de referencia o la imagen de caracterización, descubrimos que estos valores CMYK no están espaciados uniformemente en todo el rango. Más aún: el CLUT que se almacena en los perfiles tiene 9 puntos de retícula y 4 dimensiones, que produce un total de 6561 colores. Así que es obvio que algunos colores almacenados en el perfil deben ser adivinados. Otro hecho extraño es que el tipo de intento perceptual seleccionado sí modifica los valores almacenados en el intento absoluto. Esto es particularmente significativo puesto que usamos los mismos datos de entrada para generar ambos perfiles. Así que debemos

concluir que el ProfileMaker aplica algún tipo de algoritmo que modifica los valores originales medidos e introduce de esta forma algunos errores en el perfil mismo. Finalmente, pudimos comprobar después que la selección del tipo de separación también modifica los valores almacenados en los perfiles para la conversión de coordenadas de dispositivo a coordenadas PCS, mientras que teóricamente sólo deberían modificar los valores en la dirección opuesta (convertir valores PCS en valores CMYK).

No probamos la conversión de valores colorimétricos en valores de dispositivo por dos razones: primero, el modelo matemático usado para la conversión en este sentido es idéntico al modelo usado para la conversión en el sentido contrario, la cual ya hemos probado que es correcta; y segundo, la conversión de PCS a CMYK necesariamente introducirá errores que es imposible distinguir de errores de software. Esta afirmación requiere algo de análisis: ¿qué queremos decir con exactitud cuando decimos que la transformación de PCS a CMYK *necesariamente* introducirá errores? Para comprender esto debemos imaginar cómo los colores son producidos en un sistema de cuatro colores primarios. Por ejemplo, ¿de cuántas formas se puede producir el color negro? Un color negro puede ser producido aplicando 100% de negro, pero también puede ser producido aplicando 100% de cyan, magenta, amarillo y alguna cantidad menor de negro. De forma similar, la mayoría de los colores pueden ser producidos por más de una combinación de coordenadas CMYK. Así que, en principio, un valor colorimétrico XYZ puede ser realizado por una variedad de valores CMYK diferentes. De esta forma no podemos afirmar que al obtener un valor CMYK diferente del esperado, estamos ante un error de software.

## **2.4 Pruebas en monitores.**

Estas pruebas tenían como objetivo validar los algoritmos empleados para implementar el modelo función gamma-matriz. La carta de caracterización usada en este caso consistía de sólo 99 colores, así que usamos un programa que desplegaba 343 colores diferentes en pantalla y los medía usando el MeasureTool. Los colores estaban distribuidos uniformemente a través de todo el gamut del monitor. Para cada color desplegado, se calculaban sus correspondientes valores XYZ y  $L^*a^*b^*$ , aunque sólo los valores XYZ fueron medidos, puesto que el MeasureTool utiliza el valor D50 para su conversión de XYZ a  $L^*a^*b^*$ , independientemente del punto blanco del medio, como ya se ha mencionado. Los valores  $L^*a^*b^*$  correspondientes a los valores XYZ medidos fueron calculados posteriormente usando el valor del punto blanco del medio correcto. Este punto blanco fue calculado promediando cinco mediciones sucesivas de un color blanco desplegado en pantalla. Este

valor fue usado en vez del valor almacenado en el perfil para producir el intento absoluto colorimétrico. Todas las mediciones hechas tanto para el proceso de caracterización como para las pruebas se realizaron en el mismo ambiente, además, el instrumento siempre se colocaba en el centro de la pantalla para evitar cualquier variación que pudiera producirse de otra forma. Los resultados de esta prueba se muestran en seguida:

	Componente X	Componente Y	Componente Z
Error mínimo:	5.099944448233584E-5	1.372965862667108E-5	1.184606159898571E-5
Error máximo:	0.02699999999999947	0.029932342529296774	0.04113803694910878
Error promedio:	0.004422518556112185	0.005849641883273802	0.008523103222032475

**Tabla 2.7. Resultados de las pruebas del monitor.**

Los números pueden ser engañosos porque el espacio XYZ no es perceptualmente uniforme. Así que ahora mostramos los resultados de la misma prueba pero usando valores  $L^*a^*b^*$ :

	Componente $L^*$	Componente $a^*$	Componente $b^*$
Error mínimo:	9.040318144428738E-4	0.007484011006695823	0.007592225133265629
Error máximo:	2.572421458345185	7.457863042106396	7.086530214602234
Error promedio:	0.44299877550058625	1.0189712131153825	1.278534373547478
$\Delta E^*$ promedio:	1.69		

**Tabla 2.8. Resultados de la prueba del monitor en el espacio  $L^*a^*b^*$**

Como podemos ver, estos resultados muestran que nuestro modelo funciona bien, teniendo en cuenta que el ProfileMaker produce perfiles de monitor erróneos. Los errores también pueden atribuirse, en parte, a la variabilidad del instrumento y a los errores que se introducen una vez que el dispositivo ha sido modelado con modelos matemáticos simples. Sin embargo, aún los monitores más avanzados que se usan específicamente con fines colorimétricos como el Reference Calibrator de Barco sólo puede garantizar una  $\Delta E^*$  mínima de 1 (ver [www.barco-usa.com](http://www.barco-usa.com)). Así que, lograr una  $\Delta E^*$  de 1.69 en un monitor común puede considerarse como satisfactorio. Al final, estas pruebas sirvieron para validar que los algoritmos implementados en nuestro sistema eran correctos.

En este punto, ya podíamos asegurar que el sistema podía predecir colores de forma correcta, con cierto grado de precisión, si los perfiles ICC correctos se proporcionaban. Sin embargo, debido a la carencia de recursos había muy poco que hacer aparte de esto: las pruebas visuales con humanos no eran posibles. Habiendo satisfecho la primera meta, seguimos investigando cómo resolver la siguiente meta (proponer una nueva solución que permitiera usar varias fuentes de luz para el

manejo de color). Así pues, procedimos a desarrollar una nueva solución que pudiera ser usada bajo una variedad de iluminantes y, al final, probar la validez del sistema usando observadores humanos usando tecnología fácilmente accesible.



## Capítulo 3. Una solución diferente: los Perfiles Espectrales.

---

En este capítulo discutimos la solución producida para satisfacer la segunda y tercera meta de la tesis. Presentamos los nuevos *perfiles espectrales* que inventamos para resolver estos problemas. Se describe un problema relacionado con la caracterización de impresoras y la solución implementada. El modelo matemático detrás de los perfiles espectrales se describe brevemente. Se presentan los resultados de las pruebas realizadas con estos perfiles, y probamos que estos perfiles tienen una precisión más alta cuando se les compara contra los perfiles ICC normales. Finalmente mostramos los resultados de los experimentos realizados para validar nuestro sistema con observadores humanos.

---



### **3.1 El manejo de color espectral.**

Para resolver la segunda meta de esta tesis, intentamos una nueva solución para el problema del manejo del color: los *perfiles espectrales*. En esta solución, las distribuciones espectrales del color, en lugar de su especificación colorimétrica, se almacenan en un archivo para producir igualaciones de color. La ventaja más obvia con respecto a la solución ICC es la posibilidad de producir *igualaciones espectrales*. Esto es, en lugar de producir igualaciones *metaméricas* igualando valores triestímulo, esta nueva solución tiene el potencial de proveer igualaciones al nivel de las distribuciones espectrales de los colores. Cualquier igualación hecha en este nivel se mantiene sin importar que el iluminante usado se cambie. Otra ventaja no tan obvia es que las igualaciones metaméricas hechas con el método ICC sólo se mantendrán si el metamerismo humano es igual al metamerismo de los instrumentos usados para medir el color. Es posible que dos colores parezcan metaméricos para un dispositivo de medición dado, pero no para un humano. Así que los instrumentos reportarían colores iguales mientras que el observador humano reportaría una diferencia. Una igualación espectral no presenta este problema.

Sin embargo, en una igualación entre diferentes medios, las características espectrales de los dispositivos suelen variar considerablemente. Haciendo que las igualaciones espectrales sean impracticables forzándonos a regresar a las igualaciones metaméricas. Sin embargo, una caracterización espectral de una impresora (un *perfil espectral*) no forzaría al usuario a quedarse con un tipo de iluminante dado, siempre que la distribución espectral de la fuente de luz fuera más o menos estable durante su tiempo de vida útil. Por otro lado, el proceso de caracterización se haría *una sola vez*. Si el usuario decide cambiar el tipo de iluminante sólo tendría que especificar la nueva distribución espectral a ser usada. Puesto que los perfiles de monitor son, por sí mismos, independientes del iluminante, nuestro principal interés se centro en producir perfiles espectrales de impresoras. Ahora analizaremos este problema en detalle.

### **3.2 Produciendo perfiles espectrales para impresoras.**

Antes de proceder, hagamos una declaración explícita del problema que estamos tratado de resolver: queremos ser capaces de predecir, para cualquier valor CMYK dado, el espectro de reflectancia correspondiente que sería medido si un parche de color con tales valores CMYK fuera impreso y medido con un espectrofotómetro. En otras palabras, queremos una función que mapee valores

CMYK en vectores de reflectancia espectral. Teóricamente, si imprimiéramos todos los valores CMYK posibles, los midiéramos y almacenáramos estos datos en un archivo, terminaríamos con un perfil espectral perfecto. Nótese, sin embargo, que aún si pudiéramos hacer esto, habrían errores debidos a la variabilidad de los dispositivos e instrumentos. Por otro lado, asumiendo que los valores CMYK se codifican usando 8 bits por canal, tendríamos que imprimir y medir  $256^4 = 4294967296$  colores diferentes, lo cual es al mismo tiempo innecesario y demasiado grande de almacenar.

Los procesos actuales de caracterización [58] son o bien de este tipo, o intentan ajustar un conjunto de ecuaciones a unas cuantas mediciones. Sin embargo, todos estos procedimientos están diseñados específicamente para tomar mediciones colorimétricas, y algunos de los supuestos que se dan por hecho en algunos de estos métodos no pueden aplicarse al caso de los espectros de reflectancia. Por ejemplo, en las ecuaciones Neugebauer, se asume que los valores colorimétricos de las tintas se suman para producir todos los demás. No podemos aplicar este método con nuestro problema puesto que los valores colorimétricos están ligados con un tipo de iluminante y eso es precisamente lo que tratamos de evitar.

En la práctica, entonces, sólo teníamos dos opciones: construir un LUT (LookUp Table, Tabla de Búsqueda) con reflectancias espectrales, y ajustar un conjunto de polinomios para predecir cada componente del espectro de reflectancia. Como se verá en una sección posterior, la caracterización espectral de los monitores es muy fácil puesto que la ley de la mezcla aditiva de colores es válida para estos dispositivos. Sin embargo, esto no sucede con las impresoras, pero quizá exista un modelo que pueda simplificar la caracterización de estos dispositivos si se investiga más al respecto. Hay algunos estándares que fijan las cantidades de las tintas que deben de imprimirse para caracterizar impresoras, como el IT8.7/3 [32]. Este estándar consiste de 182 parches de color producidos por todas las combinaciones de las tintas a intervalos uniformemente espaciados. Teóricamente, *cómo* se imprime la carta de caracterización no tiene importancia siempre que el mismo proceso de impresión sea usado todo el tiempo. En la práctica esto no sucede, porque algunos procesos de impresión modifican los valores CMYK reales de formas no predecibles, como demostraremos a continuación.

Puesto que implementamos el sistema en Java, parecía que sería una buena idea imprimir las cartas de caracterización y prueba usando las herramientas proporcionadas por Java. De esta forma tendríamos un control completo sobre el proceso de impresión. Al menos esa *era* la idea. Así que en Java 1.3 [46], [13] la impresión se maneja de la siguiente forma:

1. Primero se crea un objeto `PrinterJob`.
2. Luego, se usa el método `setPrintable()` del objeto `PrinterJob` creado para especificar qué objeto se va a imprimir.
3. Finalmente, para imprimir el objeto, se llama al método `PrinterObject.print()`.

El objeto pasado como parámetro al método `setPrintable()` debe implementar la interfaz `java.awt.print.Printable`, la cual de acuerdo con la documentación de Java [46] debe implementar el siguiente método:

```
print(Graphics graphics, PageFormat pageFormat, int pageIndex)
```

Imprime una página en el índice especificado en el contexto `Graphics` especificado.

Es decir, los objetos imprimibles deben ser capaces de dibujarse a sí mismos en un objeto `Graphics`. Pero si revisamos la clase `java.awt.Graphics` [46] nos encontramos con que la única forma de especificar un color es a través de la clase `java.awt.Color`. De acuerdo a la documentación:

La clase `Color` se usa para encapsular colores en el espacio de color por defecto `sRGB` o colores en espacios de color arbitrarios identificados por un `ColorSpace`.

Esto significa que los objetos `Color` pueden especificar colores en cualquier espacio de color siempre que la instancia adecuada de `ColorSpace` sea usada. Así que lo que tenemos que hacer ahora es crear una instancia de un espacio de color `CMYK`. Si revisamos la documentación para esta clase, nos encontramos con que sólo puede producir *de forma directa* instancias del espacio `CIEXYZ`, un espacio de color de escalas de gris, el espacio `PYCC`, un espacio `RGB` lineal, y el espacio `RGB` estándar (`sRGB`). Pero no hay una forma directa de crear un espacio `CMYK`. Sin embargo, si revisamos la documentación, veremos que la clase `java.awt.color.ICC_ColorSpace` es una subclase de `java.awt.color.ColorSpace`, así que puede ser usada para especificar colores

también. Ahora, esta nueva clase puede crear instancias de los mismos espacios de color más cualquier otro espacio de color pero *sólo si el perfil ICC adecuado es proporcionado*.

Así, para poder especificar colores en CMYK (que deben usarse para imprimir la carta de caracterización para crear el perfil espectral), debemos usar la instancia adecuada de `ColorSpace`. Pero la clase `ColorSpace`, por sí misma, no puede producir espacios CMYK. Sin embargo, la clase `ICC_Profile` puede ser usada para producir un espacio CMYK y es una subclase directa de `ColorSpace`. ¡Pero la clase `ICC_Profile` requiere que se use un perfil ICC en primer lugar!

Debería ser obvio ahora por qué no podemos imprimir cartas de caracterización en Java. Y puesto que sólo estuvimos usando la documentación original de Sun Microsystems todo el tiempo, este problema estará presente sin importar el sistema operativo que se use para implementar Java.

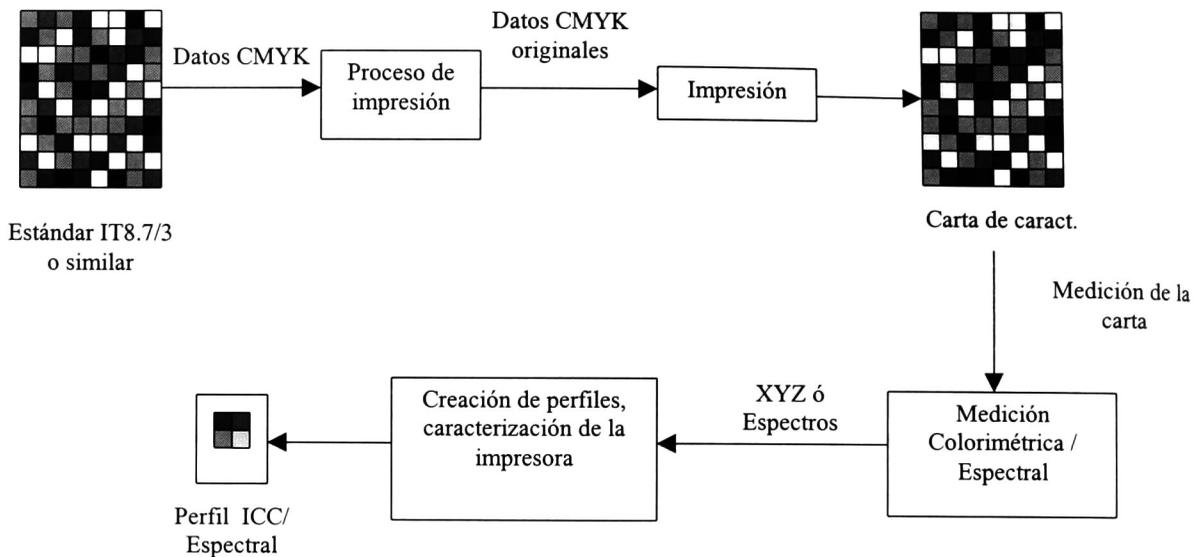
Uno puede pensar que este problema puede ser evitado usando otro lenguaje. Sin embargo, la falla también está presente al nivel de la API en el sistema operativo Windows. Sucede que Windows utiliza el equivalente a un objeto `Graphics` llamado un *contexto de dispositivo*. El contexto de dispositivo de una impresora usa la misma API que el de un monitor, que, a su vez, sólo es capaz de producir colores RGB [17].

Así que las opciones se reducen a intentar aprender un lenguaje de impresión de bajo nivel como el PCL (un lenguaje usado para especificar trabajos de impresión), o cambiar de sistema operativo esperando que el problema no se presente otra vez. Sin embargo, esta última solución no es muy buena puesto que estaríamos atando al usuario a usar un solo sistema operativo. Afortunadamente existe una mejor solución: PostScript. Este lenguaje es un estándar en la industria que ha sido establecido y adoptado en todo el mundo. Además: PostScript tiene instrucciones que permiten que el usuario especifique valores CMYK de forma directa, así que las probabilidades de imprimir exactamente los valores CMYK que se necesitan se incrementan.

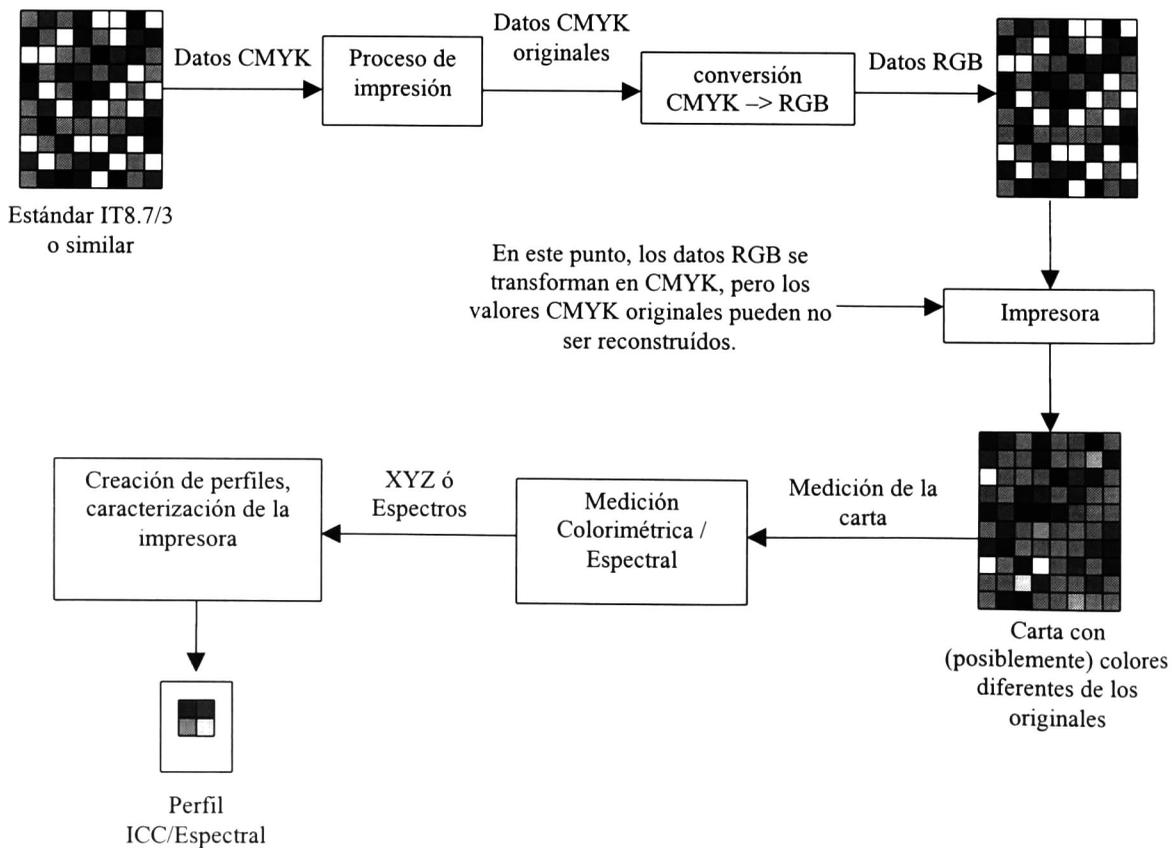
Antes de describir cómo caracterizamos la impresora, queremos hacer algunas advertencias. Hay un algo riesgo de que las cartas de caracterización impresas en Windows no mantengan adecuadamente sus valores CMYK originales y de esta forma, el objetivo original de estas cartas será nulificado. *Cualquier* programa que corra bajo Windows y utilice su API *necesariamente tendrá* que obtener un contexto de dispositivo para la impresora en un momento u otro. Los contextos de dispositivo no pueden usarse para imprimir valores CMYK, así que los valores originales de la carta de

caracterización deben ser transformados a RGB usando algún algoritmo de conversión X. Entonces, estos valores se envían al manejador de la impresora, que debe, a su vez, convertir los valores RGB en CMYK, usando (probablemente) un algoritmo diferente de X (hay varias formas de convertir RGB en CMYK). Si no podemos asegurar que los valores CMYK originales serán impresos, entonces no podremos construir una función que mapee de CMYK a XYZ o a reflectancias espectrales con confianza. Nosotros resolvimos este problema abriendo una conexión directa TCP/IP a la impresora y enviando el código fuente PostScript a través de ella. Asumimos, entonces que los valores CMYK originales estaban siendo impresos sin modificación. Así que, al final, tenemos las siguientes situaciones:

### Proceso ideal de caracterización de impresoras:

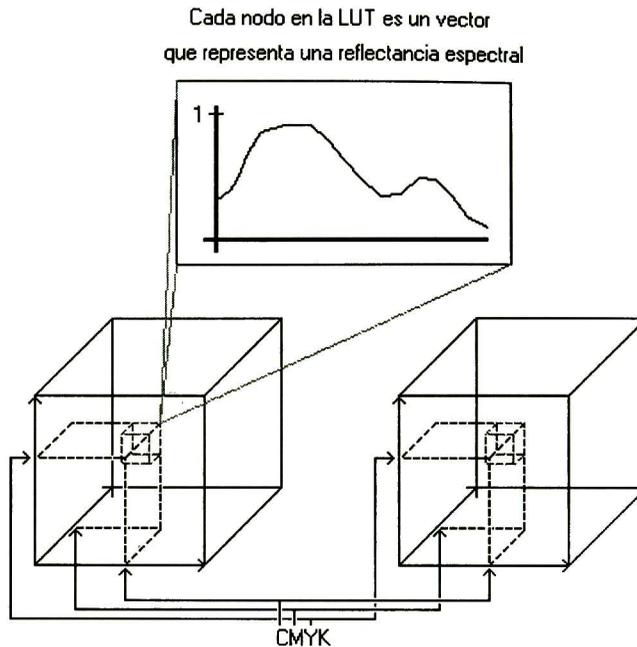


### Proceso real de caracterización de impresoras usando la API de Windows:



Para caracterizar la impresora se generó una carta de caracterización que barría todo el rango posible de colores a intervalos discretos igualmente espaciados. Para cada tinta, cuatro valores y todas sus combinaciones se imprimieron. De esta forma, nuestra carta de caracterización consistía de  $4^4 = 256$  colores, el cual es un buen tamaño comparado con el estándar IT8.7/3. De forma adicional, para probar nuestro perfil, se imprimieron 400 colores aleatorios distribuidos a lo largo de toda el gamut de colores reproducibles.

Cada color en la carta de caracterización se colocó en un nodo de un LUT de 4 dimensiones. Así que nuestra tabla de búsqueda multidimensional consistía de cuatro dimensiones, con cuatro puntos de retícula por dimensión. Cada punto consistía en un vector de 36 números (esta cantidad de valores está dada por las limitaciones del hardware, el Spectrolino sólo produce 36 mediciones en cada espectro). Este LUT es equivalente a tener 36 LUT's con nodos conteniendo un solo dato. Esto sugiere una arquitectura en paralelo que podría tomar ventaja de este hecho y acelerar los cálculos usando múltiples procesadores. Para producir un espectro dado un valor CMYK a la entrada, los valores primero se normalizaban para que quedaran dentro del intervalo  $[0.0, 1.0]$ , y se usaban como índices en la tabla de búsqueda. Entonces, el sub-hipercubo más pequeño que contenía al dato pedido se encontraba y los vectores que quedaban en cada vértice del hipercubo se interpolaban linealmente para producir la respuesta final (Ver Fig. 3.1).



**Fig 3.1.** Diagrama que muestra el sub-hipercubo más pequeño que contiene a la coordenada CMYK pedida.

Con este algoritmo, predecimos las reflectancias espectrales de la carta de prueba que contenía los 400 colores. Puesto que estábamos calculando reflectancias espectrales, teníamos que mezclar algún tipo de iluminante para obtener valores colorimétricos y poder aplicar la fórmula  $\Delta E^*$  para diferencias en color (Ecuación 1.8) para poder así cuantificar las diferencias perceptuales. Para evitar una elección de iluminante arbitraria, utilizamos la distribución espectral ideal del iluminante equi-energético, el cual es la forma más pura de luz blanca. Esto hizo que efectivamente nuestros valores colorimétricos fueran tan neutrales como fuera posible puesto que el resultado de mezclar el iluminante equi-energético con cualquier reflectancia espectral produce la forma de esta última sin cambios. Para juzgar los errores utilizamos dos criterios: medimos las diferencias en las “áreas bajo la curva” entre las distribuciones espectrales predichas y las medidas. También medimos las diferencias perceptuales usando la fórmula  $\Delta E^*$ . El “área bajo la curva” era sólo la adición de las potencias radiantes, justo como las sumatorias usadas para calcular los valores colorimétricos [3][32]. Los resultados de estas pruebas de muestran en la Tabla 3.1.

Diferencia mínima en área:	6.796636141519485E-4
Diferencia máxima en área:	3.044181009551526
Diferencia promedio en área:	0.640152417656716
$\Delta E^*$ Mínima:	0.02641022165906184
$\Delta E^*$ Máxima:	1.7078501946948028
$\Delta E^*$ Promedio:	0.35768818873417485

**Tabla 3.1. Pruebas en el perfil espectral de impresora.**

La  $\Delta E^*$  máxima que fue producida fue de 1.7, que puede considerarse como aceptable, mientras que la  $\Delta E^*$  promedio fue de tan sólo 0.35, muy por debajo del umbral de la diferencia apenas discernible. Sin embargo, es posible que esta  $\Delta E^*$  fuera incrementada por las variaciones entre mediciones sucesivas debidas al instrumento, a las variaciones del color debidas a la posición en la que se imprimió el color sobre el papel, y finalmente, a las variaciones debidas a las diferencias entre diferentes hojas de papel tomadas del mismo lote. Para ver hasta qué grado estas variables podrían modificar nuestras mediciones, imprimimos un conjunto de colores en cuatro diferentes posiciones de mismo papel. El conjunto de colores consistía de cuatro tiras de diferentes gradientes de cyan, magenta, amarillo y negro pasando del 20% de aplicación al 100%. Estas tiras se imprimieron en cada esquina del papel. Este patrón se imprimió en cuatro diferentes papeles tomados aleatoriamente del mismo lote que se usó para crear nuestro perfil. Obviamente, este lote también fue usado para imprimir las cartas de caracterización y prueba antes mencionadas.

Debe notarse que puede haber otras formas de caracterizar a las impresoras. En nuestra solución, discretizamos el gamut de la impresora para almacenarla en un archivo, y luego interpolamos linealmente entre los valores conocidos para reconstruir el gamut completo. Pensamos que podría haber métodos alternativos para reducir el tamaño del archivo, para mejorar la calidad de las predicciones. Un método comúnmente usado en problemas similares [70,71] en el análisis espectral, emplea eigenvalores. Quizá este método pueda ser modificado para usarlo con las reflectancias espectrales de las tintas. Pero puesto que nuestro método produjo resultados aceptables (cerca de tres veces más precisos que sus contrapartes ICC, en promedio) estos métodos no fueron probados y se dejaron para futuras investigaciones.

Para cuantificar la variación producida por el Spectrolino entre mediciones sucesivas, medimos un color blanco (papel sin imprimir), el cyan, magenta, amarillo y negro al 100%, cinco veces en secuencia sobre el mismo lugar. Para probar la variación del color debida la posición del color con relación a la página, medimos los colores correspondientes en cada esquina de la página (por

ejemplo, la esquina inferior izquierda, magenta al 60% contra el magenta al 60% en la esquina superior derecha del mismo papel). Y finalmente, para medir las variaciones entre diferentes papeles, comparamos los valores medidos para colores correspondientes a través de diferentes papeles (por ejemplo, esquina superior izquierda, cian al 20% del papel 1 contra la esquina superior izquierda, cian al 20% del papel 5). De nuevo, usamos la fórmula  $\Delta E^*$  fórmula (Ecuación 1.8) para obtener las diferencias perceptuales. Puesto que esta fórmula requiere el uso de un punto blanco de referencia, usamos el punto blanco promediado producido por la primera prueba. Al igual que en el caso anterior, usamos el iluminante equi-energético para evitar cualquier dependencia del iluminante. Los resultados se muestran en la Tabla 3.2.

$\Delta E^*$ promedio entre mediciones sucesivas:	0.25543
$\Delta E^*$ promedio para el mismo papel en diferentes posiciones:	0.23557
$\Delta E^*$ promedio a través de diferentes papeles:	0.19133
$\Delta E^*$ promedio total para estas variables:	0.22744

Tabla 3.2. Variación en el instrumento, posición del papel y variaciones entre diferentes papeles.

Podemos ver que sólo debido a las variaciones en el instrumento, la posición del color y las diferencia entre diferentes papeles, obtenemos una  $\Delta E^*$  de 0.22744. Debe notarse también que, en cualquier caso, la precisión de este método es mayor que la precisión encontrada en los perfiles ICC. Ahora que hubimos caracterizado exitosamente una impresora, intentamos caracterizar un monitor.

### 3.3 Produciendo perfiles espectrales para los monitores.

El perfil del monitor se produjo mostrando 16 diferentes gradientes de rojo, verde y azul en el monitor. Dejamos que pasara un segundo entre el momento en que el color era desplegado y la toma de la medición con el Spectrolino para permitir que los fósforos se estabilizaran. Construimos un perfil con 16 \* 3 distribuciones espectrales de potencia radiante usando este método. Todas las mediciones se tomaron en el centro de la pantalla. Para predecir el espectro de cualquier valor RGB dado, usábamos primero cada valor RGB como índice en el LUT de una dimensión donde cada punto del LUT era un vector con 36 valores (otra vez, esta limitación está dada por el Spectrolino). De esta forma se termina con tres distribuciones espectrales que serían las que se medirían si cada canal se desplegara de forma separada. Ahora, puesto que los colores de un monitor siguen la ley de la mezcla aditiva de los colores, simplemente sumamos estos espectros, componente por

componente para producir la predicción final del espectro que sería medido si el valor RGB se desplegara y midiera.

Probamos nuestro perfil y algoritmo desplegando un conjunto de 343 colores no aleatorios espaciados uniformemente a través de todo el gamut del monitor (los mismos colores usados para probar el perfil ICC del monitor). De forma adicional, la selección de la cantidad de puntos por canal en el conjunto de colores de prueba fue tal que ningún color de prueba era igual a uno de los colores usados para construir el perfil, eliminando la probabilidad de ejecutar una prueba inútil (por ejemplo, especificar un color que estaría almacenado en el perfil espectral). Usamos los mismos dos criterios utilizados para el perfil espectral de las impresoras para juzgar la precisión de nuestro método: calculamos las diferencias en “áreas bajo la curva” entre los espectros predichos y los medidos, y usamos la fórmula  $\Delta E^*$  para calcular las diferencias perceptuales. Las “áreas bajo la curva” se aproximaron haciendo una sumatoria simple de cada componente del espectro, así que las diferencias al final eran realmente las diferencias acumuladas en todo el espectro. La fórmula de la diferencia perceptual  $\Delta E^*$  necesita una transformación previa del espacio XYZ al  $L^*a^*b^*$ . Esta transformación requiere que se especifique un punto de referencia blanco. En este caso, cinco mediciones del punto blanco del monitor se promediaron para obtener valores  $L^*a^*b^*$ . Los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 3.3.

Diferencia mínima en área:	0.0679666666666666762
Diferencia máxima en área:	1.1028000000000002
Diferencia promedio en área:	0.39915830903789884
$\Delta E^*$ mínima:	0.008102259418159419
$\Delta E^*$ máxima:	0.6005324017336023
$\Delta E^*$ promedio:	0.181511640602009

Tabla 3.3. Pruebas hechas al perfil espectral de un monitor.

Es notable ver que la mayor  $\Delta E^*$  de error es apenas de 0.6 mientras que la  $\Delta E^*$  promedio es de sólo 0.18. Esto es, este perfil tiene una precisión mucho mayor que la de su contraparte ICC.

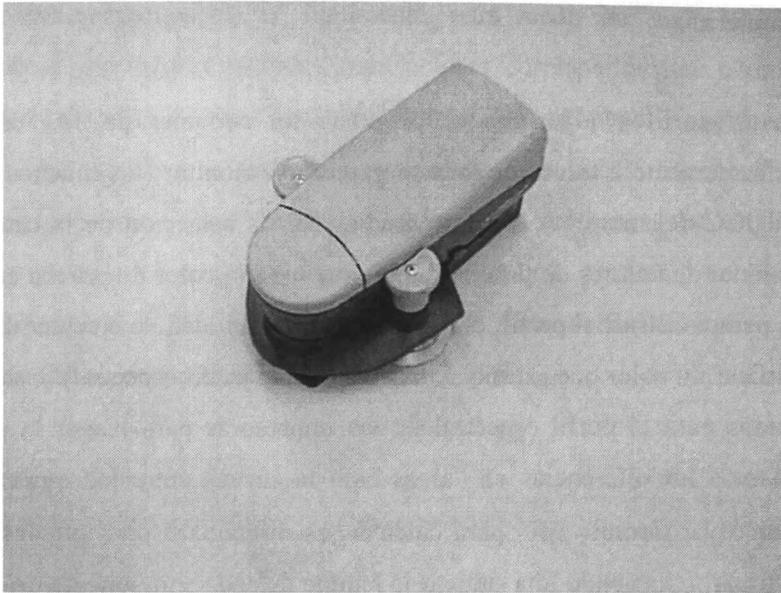
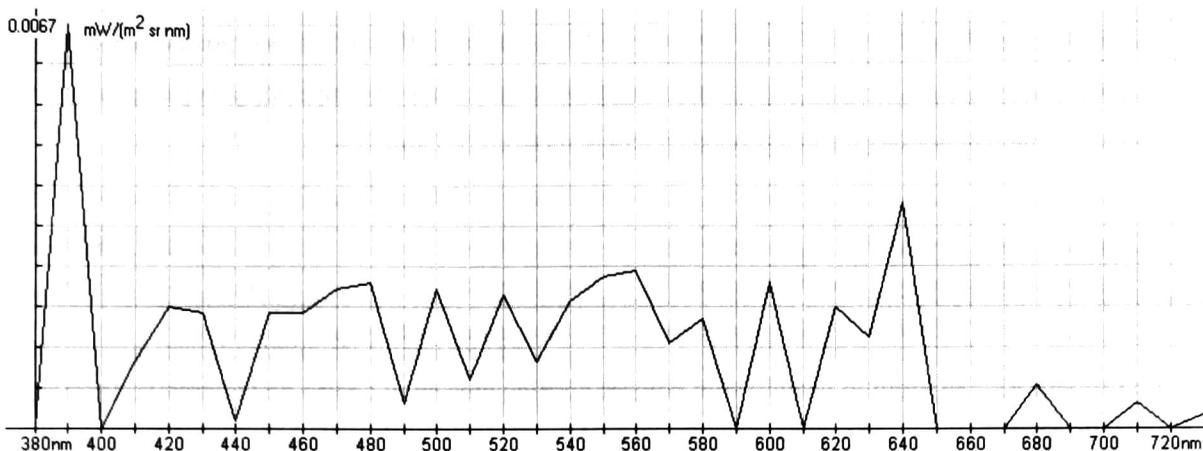
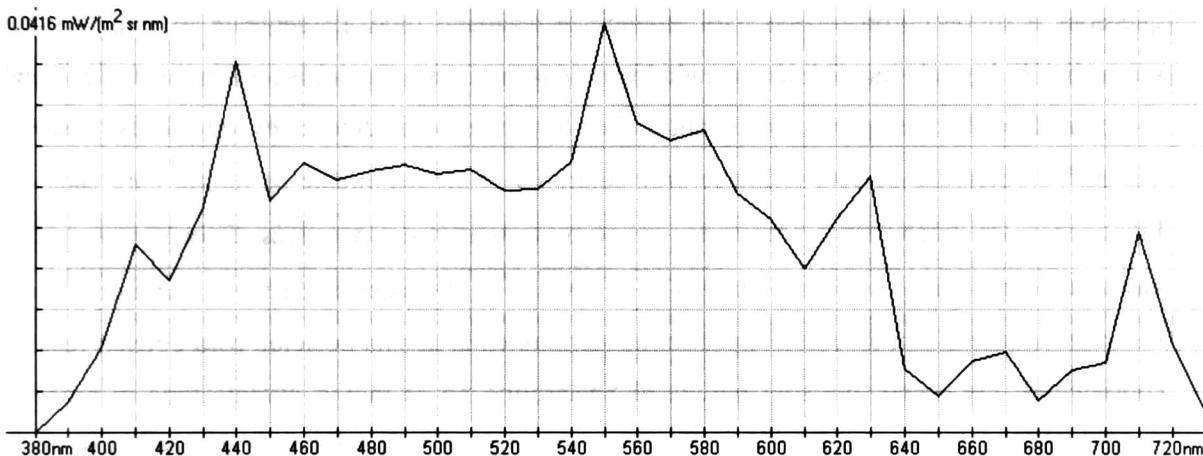


Fig 3.2. Spectrolino de GretagMacbeth con los accesorios de succión puestos.

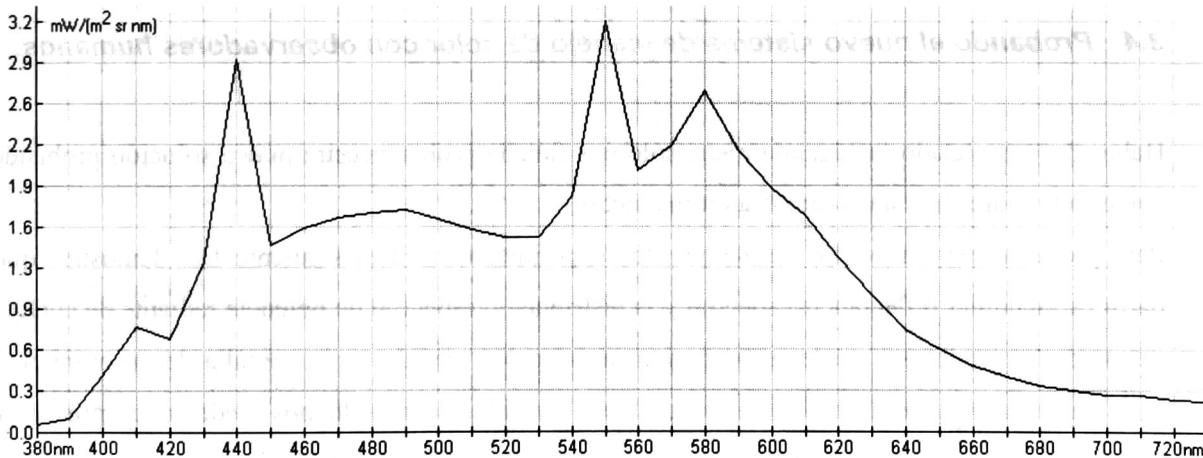
Sin embargo, hay tres fuentes de variabilidad en estas pruebas: la posición del color con relación al monitor puede producir algo de variación, las variaciones entre mediciones sucesivas del mismo color en la misma posición debidas a la precisión propia del instrumento y la presencia de brillo en la pantalla. Puesto que al Spectrolino se le debe colocar un par de accesorios de succión que a su vez están cubiertos por una pantalla de plástico (ver Fig 3.2) todas las mediciones hechas fueron en ausencia de brillo, así que este factor no fue de importancia para las pruebas. Sin embargo, para asegurarnos de que esta pantalla de plástico realmente nos estaba protegiendo del brillo, medimos un color negro en la pantalla con y sin los accesorios de succión en el centro de la pantalla. Cuando los accesorios de succión estaban puestos, sólo se registraba ruido aleatorio por debajo de los  $0.0067 \text{ mW}/(\text{m}^2)(\text{sr})(\text{nm})$  en cada componente espectral (ver Fig. 3.3). Sin embargo, al quitar los accesorios de succión se puede distinguir claramente la forma del espectro de la iluminación prevaeciente (Fig 3.5) mezclado con la medición. Aunque el nivel de la señal es pequeño, se le puede distinguir sin problemas del ruido aleatorio de la medición y por lo tanto, modifica los valores medidos. El pico más alto en la medición sin la protección de plástico es de  $0.0416 \text{ mW}/(\text{m}^2)(\text{sr})(\text{nm})$  la cual representa un incremento del 620% de la potencia del espectro (ver Fig. 3.4) con respecto al pico más alto presente en la medición tomada con la protección de plástico. Vale la pena notar también que el perfil es válido con respecto a las evaluaciones visuales sólo si se juzga en un ambiente libre de reflejos brillantes.



**Fig 3.3. Distribución espectral de potencia radiante de un color negro desplegado en un monitor con los accesorios de succión puestos en el Spectrolino.**



**Fig 3.4. Distribución espectral de potencia radiante de un color negro desplegado en un monitor, tomada sin los accesorios de succión, nótese os picos en 410, 440 y 550nm que corresponden con los de la fuente de luz del ambiente.**



**Fig 3.5. Distribución espectral de potencia radiante de la fuente de luz. Nótese los picos en 410, 440 y 550nm que corresponden a los de la Fig 3.4.**

Para medir hasta qué punto los dos factores mencionados arriba modificaban nuestras mediciones, desplegamos el blanco, rojo al 100%, verde al 100% y azul al 100% en cinco posiciones distintas de la pantalla, a saber, el centro, la izquierda, el lado derecho, la parte superior y la parte inferior de la pantalla. Los resultados de estas pruebas pueden verse en la Tabla 3.4

$\Delta E^*$ promedio entre mediciones sucesivas:	0.25982425252813107
$\Delta E^*$ promedio debida a la posición espacial de los colores:	3.9460830123155155

**Tabla 3.4. Variaciones debidas a la posición del color en la pantalla del monitor.**

La primera  $\Delta E^*$  se produjo usando sólo colores desplegados en el centro de la pantalla. Primero, una serie de  $\Delta E^*$ 's se calcularon entre mediciones sucesivas del mismo color, y luego estas  $\Delta E^*$ 's eran promediadas. Este procedimiento se repetía para todos los colores y así se producían cinco  $\Delta E^*$ 's, que eran, a su vez, promediadas para producir el resultado final. La segunda  $\Delta E^*$  fue producida promediando los colores medidos en cada lugar de la pantalla, y luego, las diferencias se calculaban comparando cada color promediado contra el color promedio medido en el resto de las posiciones. Las  $\Delta E^*$ 's obtenidas de esta forma se promediaron y el procedimiento se repitió para cada color. Finalmente, las cinco  $\Delta E^*$ 's producidas así se promediaron una vez más. Debemos notar que la variación máxima de los colores a través de la pantalla es alrededor de  $\Delta E^* = 6.3$ . Así que debemos ser muy cuidadosos en colocar el Spectrolino siempre en la misma posición para obtener resultados consistentes. De hecho, fue sólo porque el Spectrolino no se movió durante todo el proceso de caracterización y prueba que pudimos llegar a los valores  $\Delta E^*$  tan bajos que mostramos en la Tabla 3.3.

### **3.4 Probando el nuevo sistema de manejo de color con observadores humanos.**

Habiendo completado la segunda meta, sólo nos faltaba probar nuestra nueva solución probándola con observadores humanos (nuestra última meta).

Para probar nuestro modelo, diseñamos dos experimentos con el siguiente fin: demostrar que a partir de cualquier reflectancia espectral y la distribución espectral de potencia radiante de cualquier fuente de luz podíamos predecir la apariencia del color medido en la pantalla de un monitor. En otras palabras, el experimento tenía como objetivo verificar que podíamos predecir con precisión la apariencia de los colores impresos desplegándolos en la pantalla de un monitor.

De esto puede deducirse fácilmente que si la validación tenía éxito, entonces el origen de la reflectancia espectral no tenía que ser necesariamente un color impreso. Puede usarse, en cambio, la

predicción generada con un perfil espectral, eliminando la necesidad de imprimir el color. En este caso, estaríamos haciendo una *simulación de impresión (softproof)* de la imagen: una predicción de cómo se vería la imagen si se imprimiera y visualizara bajo el iluminante seleccionado.

También puede verse que si el modelo se invierte, entonces podemos forzar a que los colores en la salida se vean como los colores desplegados en el monitor (hasta donde los gamuts de los dispositivos lo permitan, por supuesto). Así se puede preservar la apariencia del color en diferentes dispositivos usando cualquier fuente de luz.

Los experimentos se condujeron con un monitor más grande que el usado para probar los perfiles espectrales y con una pantalla plana. Este monitor permitía que el usuario modificara la cromaticidad de su punto blanco. También se probaron las variaciones del color en este monitor siguiendo la misma metodología que se mencionó con anterioridad. Los resultados de estas pruebas pueden verse en la Tabla 3.5.

$\Delta E^*$ promedio entre mediciones sucesivas:	0.49803614755241615
$\Delta E^*$ promedio debida a la posición espacial de los colores:	6.679472366799309

Tabla 3.5. Variaciones en el monitor usado para el experimento debidas a mediciones sucesivas y al posicionamiento espacial de los colores.

### 3.5 Configuración del experimento.

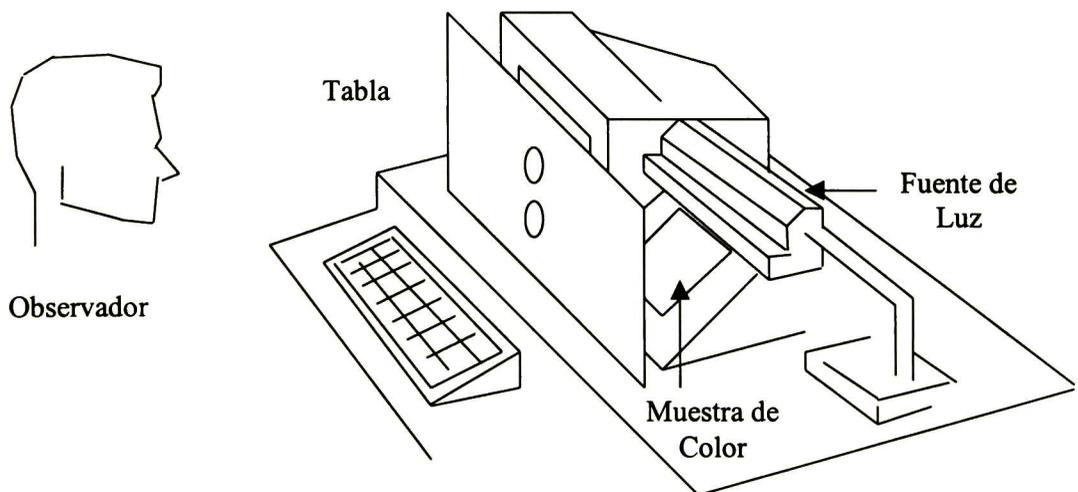


Fig 3.6. Configuración del experimento.

Se diseñaron dos experimentos. El primer experimento se usó para probar las igualaciones de claridad-croma y el segundo para probar las igualaciones de brillantez-colorido

Para el primer experimento se imprimieron 12 tonos diferentes que abarcaban todo el rango tonal a tres diferentes niveles de claridad, produciendo un total de 36 colores.

Para evitar los efectos de la adaptación cromática, construimos una tabla con dos hoyos, uno directamente sobre el otro. La tabla era lo suficientemente grande como para que el observador no pudiera observar ni el monitor ni la muestra del color impreso detrás de ella. Así, los observadores no estarían expuestos directamente a ningún punto blanco, puesto que las luces del cuarto se apagaban, previniendo de esta forma la adaptación cromática. Atrás de la tabla instalamos un arreglo de espejos de forma que pudiéramos colocar la muestra del papel y la lámpara separados del monitor y aún así poder ver ambos colores juntos simultáneamente.

Escogimos colocar los hoyos uno directamente sobre el otro (ver Fig. 3.6) porque una comparación lado a lado tentaría a los observadores a usar un ojo distinto para cada muestra. Usando el arreglo descrito, sin embargo, preveníamos esto y al mismo tiempo se cancelaban los efectos que podrían darse por las diferencias en la percepción del color entre los diferentes ojos del observador. Los hoyos tenían un tamaño tal que al ser vistos a una distancia de 50cm, subtendían un ángulo visual de  $2^\circ$  para habilitar el uso del observador colorimétrico estándar CIE 1931 que se usó para calcular los valores colorimétricos.

Para evitar en la medida de lo posible las comparaciones subjetivas de las diferencias de color, empleamos el siguiente método:

1. Medimos la reflectancia espectral de cada color impreso, produciendo una lista  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_{36}$  de mediciones espectrales. Estos datos se almacenaron para ser usados más tarde.
2. Medimos la distribución espectral de potencia radiante  $\mathbf{L}$  de la fuente de luz usada.
3. Cada reflectancia espectral  $\mathbf{R}_i$ ,  $1 \leq i \leq 36$  se multiplicaba, elemento por elemento con la distribución de la fuente de luz usada  $\mathbf{L}$  para producir nuevas distribuciones espectrales de potencia radiante  $\mathbf{S}_i$ .
4. Usando la ecuación (1.1) calculamos los valores colorimétricos predichos  $XYZ_i$   $1 \leq i \leq 36$  para cada  $\mathbf{S}_i$  producida en el paso anterior.
5. Para cada  $XYZ_i$   $1 \leq i \leq 36$  producida en el paso 4, creamos una lista de valores colorimétricos  $C_{ij}$  tales que:

$$C_{i6} = XYZ_i$$

$$\Delta E^*(C_{ij}, C_{i6}) = |j - 6|, \text{ para cada } 1 \leq i \leq 11 \quad (3.1)$$

Donde:

$\Delta E^*(C_{ij}, C_{i6})$  significa la diferencia  $\Delta E^*$  (calculada con la ecuación 1.8) entre el color  $C_{ij}$  y el color  $C_{i6}$ .

En otras palabras, colocamos nuestra predicción en medio de la lista, y variamos ligeramente sus coordenadas de forma que la diferencia  $\Delta E^*$  entre cualesquier dos colores adyacentes fuera 1. El rango de la variación era aproximadamente  $\pm 5 \Delta E^*$  alrededor de la predicción. Para producir estas variaciones los valores triestímulo básicos se convirtieron primero al espacio  $L^*a^*b^*$  (ver ecuaciones 1.3-1.7) usando el punto blanco de referencia del monitor y luego al espacio  $L^*C^*h^*$  usando las siguientes fórmulas [3]:

$$L^* = L^*$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (3.2)$$

$$h^* = \arctan(a^* / b^*)$$

Donde:

$L^*$  es la *claridad*.

$C^*$  es la *croma*, y

$h^*$  es el *tonos*.

Una vez en el espacio  $L^*C^*h^*$ , la claridad y la croma se dejaban constantes mientras que se variable el tono hasta que se alcanzaba la  $\Delta E^*$  deseada. Decrementamos el tono para todos los colores colocados antes de la predicción, y lo incrementamos para el resto. Los valores  $L^*C^*h^*$  resultantes se convertían otra vez en valores XYZ, y finalmente, en valores RGB usando el perfil espectral del monitor. Nótese que no se hizo ninguna transformación de adaptación cromática puesto que nuestra configuración experimental previene que esto suceda.

El color mostrado inicialmente al observador siempre era aleatorio. Le enseñamos a los observadores los conceptos de una igualación de claridad-croma y de brillantez-colorido, y les pedimos que escogieran el color que hiciera la mejor igualación de claridad-croma de la lista de

colores  $C_{ij}$ . De esta forma, si nuestras predicciones producían las mejores igualaciones, entonces el observador las escogería, produciendo una  $\Delta E^*$  de 0. Por otra parte, entre más se desviara el observador con respecto a nuestra predicción, la  $\Delta E^*$  se incrementaba, hasta llegar a un máximo de 5. Esto nos dio una medida de qué tan bien funcionaba nuestro sistema. Más aún, si el observador juzgaba que ningún color de la lista producía una igualación aceptable, entonces tenía que reportarlo y se anotaba el número de color (estos colores se muestran bajo la columna “No igualados” en la Tabla 3.6). Y viceversa, si los observadores también reportaban una igualación de brillantez-colorido completa cuando esta sucedía (los colores mostrados bajo la columna “Igualación perfecta” en la Tabla 3.6).

Puesto que usamos la fórmula  $\Delta E^*$  común para calcular las diferencias de colores, también necesitamos un contexto para ver cómo se relacionaban estos valores  $\Delta E^*$  con diferencias perceptuales reales. Así que los observadores tenían que realizar un pequeño experimento preliminar antes de que las muestras impresas fueran desplegadas. En este pequeño experimento preliminar, cuatro colores (rojo, verde, azul y amarillo con croma y claridad medianas) se desplegaban en dos cuadros adyacentes, uno sobre otro. Inicialmente, ambos cuadros tenían el mismo color y el observador tenía que modificar uno de los colores hasta que veía la mínima diferencia discernible. Los colores sólo variaban en tono, reteniendo una croma y claridad constantes. Estas variaciones se calcularon usando el método descrito anteriormente para variar las predicciones de color. Los colores se escogían de forma que cualquier color dentro de un rango de  $\pm 6 \Delta E^*$  estuviera dentro del gamut del monitor. Este experimento preliminar también sirvió como una pequeña sesión de entrenamiento. Al final de este pequeño experimento, cuatro valores  $\Delta E^*$  se producían:  $\Delta E_r^*$ ,  $\Delta E_v^*$ ,  $\Delta E_{az}^*$ ,  $\Delta E_{am}^*$ . Para calcular la diferencia apenas discernible total para cualquier observador, estos valores se promediaban (los números listados bajo “ $\Delta E_{prom}$ ” en las tablas 3.6 y 3.7).

Las muestras impresas se iluminaban con una luz común de tungsteno a  $0^\circ$  mientras que las muestras se observaban a  $45^\circ$ . Esta configuración se escogió para imitar la geometría de medición empleada en el Spectrolino. La brillantez de esta lámpara se ajustaba de forma que la mayoría de los colores retuviera la misma brillantez que sus contrapartes en el monitor. Los valores coloriméricos se calculaban usando colorimetría absoluta tanto para el monitor como para las muestras impresas. Decidimos no usar colorimetría relativa para las muestras impresas para habilitar la posibilidad de hacer igualaciones de brillantez-colorido. De otro modo, cualquier igualación de este estilo sería sólo producto del azar.

Este experimento comprendió 18 observadores, de los cuales 14 fueron hombres y 4 fueron mujeres. Las edades de los individuos estaban entre 22 y 30 años. Los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

E/S	$\Delta E_{\text{prom}}$	No igualados	Igualación Perfecta	$\Delta E^*$
24F	9.5	12,14,23,25,26,27,28	Ninguno reportado	2.551
24F	5.5	1,4,8,9,18,20,25,26,27,28	Ninguno reportado	3.807
28M	4	5,6,10,18,19,21,22,25,26,27,28	17	2.892
28M	4.75	8,13,14,25,26,27,28,35,36	10,22,30	2.615
24F	4.5	5,20,22,25,26,27,28,36	11,14,15,21,24,29,34,35	2.535
30M	3	5,6,22,23,25,26,27,28,31,34,35,36	16	3.125
24M	6.75	Ninguno reportado	Ninguno reportado	3.638
27M	4.75	5,8,9,10,12,18,19,20,22,23,24,25,28,30,31,32,34	13,14,15,16,17,29	3.684
26M	5.5	2,5,6,9,10,18,19,21,22,24	7,8,11,12,13,14,15,16,17,20,23,25,26,28,29,31,32,33,35,36	3.346
27M	9	8,10,27,34	Ninguno reportado	3.375
24M	3.75	10,18,25,34	11,26	3.612
25M	3	5,8,25,27,28,30,34	24,29,36	4.241
25M	4.75	1,2,9	13,14,15,16	2.181
27F	3	7,11,28,32,33,34,35	13,19,31	3.862
24M	6.75	10	11,13,14,16,17,19	2.485
25M	11.75	25,34	22,23,25,30,32,33,35	2.882
24M	6.25	1,23,24,25,27,28	5,10,13,18,22,28,29,30,33	3.300
22M	4.5	7,9,21,22,33	13,14,15,16,18,19,26	2.419

Tabla 3.6. Resultados del primer experimento. E/S significa Edad/Sexo,  $\Delta E_{\text{prom}}$  es la diferencia apenas discernible promedio.  $\Delta E^*$  muestra la diferencia promedio entre la predicción y el color escogido.

En total se probaron 648 colores, 126 (19.44%) de los cuales estaban fuera de gamut. Mientras que 123 (18.98%) colores fueron observados como no igualados. De estos colores no igualados 42 (34.14%) estaban fuera de gamut y 81 (65.81%) estaban dentro.

525 colores (81.01%) fueron observados como igualaciones completas de claridad-croma, de éstos, 80 colores (15.23%) fueron observados como igualaciones de brillantez-colorido. Debe notarse que no es posible hacer igualaciones de brillantez-colorido en diferentes medios usando el estándar ICC, puesto que los valores triestímulo se calculan usando *colorimetría relativa* en este estándar. Si tales igualaciones se dan, es pura coincidencia. Así que tener 80 colores como igualaciones de brillantez-colorido es un hecho que no debe ser ignorado.

Los datos presentados arriba producen un  $\Delta E^*$  promedio de 3.1416 entre los colores predichos y los seleccionados como igualaciones. Este valor puede parecer no muy bueno si se le compara contra el estándar tradicional de hacer  $\Delta E^* = 1$ , sin embargo, estos valores deben ser puestos en

contexto. La diferencia apenas discernible promedio reportada por los observadores en el experimento preliminar fue de  $\Delta E^* = 5.61$ . También es necesario decir que la diferencia perceptual apenas discernible varió con el tono de las muestras. Por ejemplo, la mayoría de los observadores encontraron más difícil distinguir entre los tonos verdes (la  $\Delta E_v^*$  para la mayoría de los observadores era notablemente más alta que el resto) mientras que los tonos azules eran más fácilmente distinguidos (la  $\Delta E_{az}^*$  era con frecuencia la menor de todas). Esto sugiere que la uniformidad del espacio  $L^*a^*b^*$  no se mantiene para los iluminantes comunes no estandarizados.

Para el segundo experimento, el usuario tenía libertad completa para elegir el color en pantalla. Se le pedía al observador que produjera sólo igualaciones de brillantez-colorido. Para modificar el color, el observador disponía de seis teclas, tomadas en pares. El primer par incrementaba y decrementaba la claridad, el segundo par variaba la croma, y el tercero modificaba el tono. Así, el observador realmente estaba produciendo valores  $L^*C^*h^*$ , que eran convertidos en colores RGB a través del perfil del monitor.

Para cada color impreso, una predicción se generaba y se mostraba inicialmente, almacenando sus valores  $L^*C^*h^*$  correspondientes. Las predicciones y los valores  $L^*C^*h^*$  se calculaban usando las mismas fórmulas descritas para el primer experimento. Cuando el usuario terminaba de hacer la igualación, los valores  $L^*C^*h^*$  finales se almacenaban y la diferencia  $\Delta E^*$  entre la predicción y el color que producía la igualación se calculaba. Una vez más, si nuestra predicción producía la mejor igualación, entonces su  $\Delta E^*$  sería cero.

En este experimento, la diferencia perceptual apenas discernible  $\Delta E^*$  también se midió. Las muestras impresas fueron las mismas que se usaron en el primer experimento, pero sólo las muestras impares fueron usadas, reduciendo a la mitad (18) la cantidad de muestras usadas. Hicimos esto debido a que la complejidad del experimento y la dificultad para lograr las igualaciones aumentaron. Los experimentos largos tienden a aburrir al observador y como consecuencia, la atención que se pone en la igualación descende. Para este experimento se usaron 15 personas, de las cuales, 5 eran mujeres y 10 fueron barones. Las edades de los individuos variaban entre los 22 y 48 años. Los resultados de este experimento se pueden apreciar en la Tabla 3.7.

E/S	$\Delta E_{\text{prom}}$	No igualados	$\Delta E^*$
30M	3	3, 35	7.262
24F	9.5	9,13,19,21,23,31,35	9.988
23M	6.5	3,9	4.212
25M	4.75	Ninguno reportado	9.654
31F	8.5	Ninguno reportado	13.650
22M	4.5	5	10.852
20F	8.75	3	15.946
23M	2.75	1,3,7,19,21	11.864
27F	2.75	Ninguno reportado	8.857
23M	4.5	Ninguno reportado	16.752
29M	6.75	Ninguno reportado	5.219
48M	6	5,23	12.813
44M	4.5	Ninguno reportado	10.887
39M	2.75	19	10.091
23F	4.5	Ninguno reportado	9.313

**Tabla 3.7. Resultados del segundo experimento. E/S significa Edad/Sexo,  $\Delta E_{\text{prom}}$  significa la diferencia apenas discernible promedio. La columna  $\Delta E^*$  muestra la diferencia entre la predicción y el color seleccionado.**

En total, 270 colores fueron probados para el segundo experimento. 22 colores (8.14%) fueron observados como no igualables. 248 colores (91.85%) se aprobaron como igualaciones de brillantez-colorido completas. Todos los colores fuera de gamut y los no igualables se ignoraron para el análisis de las  $\Delta E^*$  promedio. Al final, la  $\Delta E^*$  promedio entre la predicción y los colores que lograban la igualación fue de 10.491. Y la diferencia apenas discernible  $\Delta E^*$  fue de 5.33. Debemos notar que la diferencia entre la predicción y la igualación es mayor que en el primer experimento. Debemos recordar también que el usuario tuvo completa libertad en este experimento, y que la igualación de los colores debía ser de brillantez-colorido. Este tipo de igualación no es posible usando los perfiles ICC.

Para concluir este capítulo, afirmamos que, con un 81.01% de los colores aprobados como igualaciones de claridad-croma y un 91.85% de los colores aprobados como igualaciones de brillantez-colorido completas, estos experimentos verificaron que nuestra nueva solución realmente estaba produciendo buenos resultados. Con estos resultados pudimos establecer que nuestro sistema era capaz de hacer simulación de impresión (*softproofing*) y de preservar la apariencia de los colores a través de diferentes medios con un grado razonable de precisión. La precisión de los resultados es afectada de forma adversa debido a la gran variabilidad entre los observadores y la no uniformidad del espacio  $L^*a^*b^*$ . Sugerimos que para lograr una precisión mayor, los observadores deberían ser escogidos de forma que sus variaciones sean mínimas. Pero esto también limitaría el valor de los resultados, y puesto que estaríamos usando un grupo especial de observadores, en lugar de una

muestra representativa de la mayoría de los observadores humanos, el observador estándar de la CIE 1931 no estaría completamente habilitado.

# Capítulo 4. Una simulación de impresión.

---

Este capítulo describe cómo nuestro sistema puede ser empleado para construir aplicaciones subsidiarias. En particular, delineamos un algoritmo que puede ser usado para hacer simulaciones de impresión. También describimos una transformación de adaptación cromática común que puede ser usada con nuestro algoritmo. Durante el capítulo se muestran otras fallas de los perfiles ICC que no se presentan en los nuevos perfiles espectrales.

---



#### 4.1 Igualando colores entre diferentes dispositivos.

Hemos probado que nuestro sistema soporta los perfiles ICC y que nuestra nueva solución consistente en perfiles espectrales también funciona. Mostramos ahora cómo podemos usar toda esta tecnología para crear una aplicación útil de simulación de impresión. Una *simulación de impresión* o *softproof* intenta simular cómo se vería una imagen si se imprimiera y visualizara bajo un cierto conjunto de condiciones de iluminación y visión. Es obvio que, para poder proveer esta opción, debemos ser capaces de igualar colores entre diferentes dispositivos. Así que, en la siguiente discusión, atacaremos este problema antes de proponer la solución para hacer una simulación de impresión.

Como hemos visto, el color en sí mismo es una sensación subjetiva. Esta sensación es influenciada por muchos factores psicológicos y fisiológicos, algunos de los cuales se discutieron en secciones previas. A pesar de todos estos factores, un estímulo de color todavía puede ser medido y usado para igualar la *apariencia* de los colores si se cumplen ciertas condiciones de visualización estrictas.

Un *estímulo de color* es una distribución espectral de potencia radiante que llega al ojo y produce la sensación de un color en la mente. La diferencia entre un estímulo de color y un color es que un mismo estímulo de color puede producir varios colores diferentes en la mente de un mismo observador dependiendo de su estado fisiológico y psicológico, las condiciones de visualización y el ambiente donde el estímulo es observado. También debemos considerar las diferencias entre los observadores: es un hecho bien conocido [3, 44] que el color percibido por una persona varía de acuerdo a su edad, y que aún en un mismo observador existen diferencias entre sus ojos que producen colores diferentes.

Sabiendo que un estímulo de color es un espectro radiante, uno puede pensar que la última meta de un sistema de manejo de color sería la de reproducir exactamente estos estímulos espectrales, y de esta forma, producir colores igualados entre dispositivos y condiciones de visualización diferentes. Aún si tuviéramos la tecnología para reproducir cualquier distribución espectral en cualquier dispositivo a voluntad, la simple reproducción del espectro no siempre produce una igualación de colores, como demostraremos a continuación.

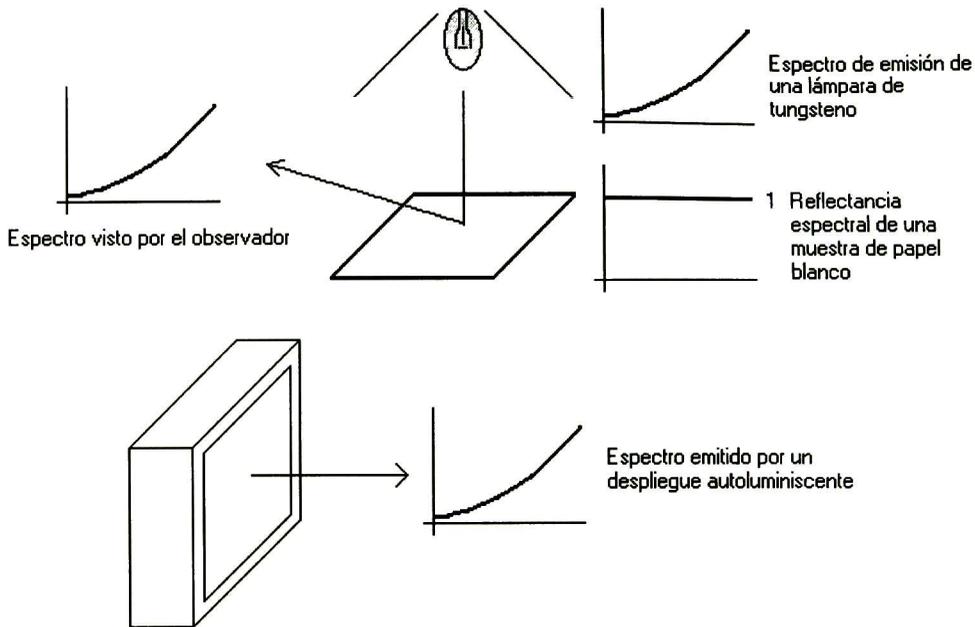


Fig 4.1. Situación de un experimento de igualación espectral ideal.

Imagínese la situación mostrada en la Fig. 4.1. Estamos en un cuarto iluminado por una sola lámpara de tungsteno que provee luz amarillenta. Ahora supongamos que tenemos una hoja de un papel perfectamente blanco en este cuarto, esto es, esta hoja de papel tiene una reflectancia espectral igual a 1.0 en todas sus longitudes de onda. En otras palabras, este papel refleja de forma perfecta la luz en todas sus frecuencias y uniformemente en todas direcciones (se dice que es una superficie *isotrópica*, y estas dos condiciones definen un *difusor perfectamente reflejante*). Supongamos también que tenemos un despliegue gráfico autoluminiscente (como un monitor) que puede ser ajustado para igualar con exactitud cualquier distribución espectral de potencia radiante. Las preguntas son: ¿de qué color veríamos al papel en este cuarto? Y ¿qué distribución espectral debe ser desplegada en el monitor para igualar el color observado del papel? El sentido común nos hace seguir esta serie de razonamientos:

La única luz en el cuarto es una lámpara de tungsteno. La luz de tungsteno no radia igual en todas las longitudes de onda. De hecho el espectro de este tipo de luz se parece a una rampa que se incrementa hacia las longitudes de onda mayores, es por esto que la luz de tungsteno tiene esa tonalidad amarilla característica. Ahora, puesto que nuestra muestra de papel refleja la luz de perfectamente bien en todas las frecuencias, la luz que es reflejada desde esta superficie sería una copia exacta de la luz que incide sobre ella. Así que la respuesta a la primera pregunta sería que la

luz que proviene del papel se percibiría de color amarillo, justo como la luz de tungsteno que la ilumina. Ahora, para igualar este color en el despliegue autoluminoso, sólo tendríamos que igualar la distribución espectral de la fuente de luz.

Esto sería de hecho suficiente si no fuera por la presencia de los mecanismos que modifican la apariencia del color que hemos descrito en capítulos anteriores. Así que ahora tenemos que considerar qué sucedería si un observador humano juzgara el color del papel teniendo todos estos efectos en cuenta. Primero de los efectos psicológicos descritos, *descontar el iluminante* y el *reconocimiento de los objetos* estarían en acción. No habría efectos ópticos debidos al contraste simultáneo puesto que el papel es de color uniforme. Sin embargo, después de un rato, el observador se adaptaría cromáticamente al punto blanco del papel. Así que el observador humano reportaría que el papel es de color *blanco* a pesar del hecho de que la distribución espectral que le llega a los ojos indicaría un color amarillo.

Por otro lado, cuando el observador mirara en el despliegue autoluminiscente, se adaptaría al punto blanco del monitor. Así, el color que juzgaría como blanco en el monitor sería diferente del color juzgado como blanco mientras observa el papel, a menos que los puntos blancos de ambos medios fueran igualados. Asumiendo que el punto blanco del monitor corresponde al iluminante equienergético, el observador humano reportaría un color *amarillo* viniendo de la pantalla del monitor, aún cuando la distribución espectral es la misma que la que emana del papel (esta situación es común en la práctica, puesto que las luces de oficina suelen tener una cromaticidad amarilla, mientras que los monitores suelen tener una cromaticidad azulada en sus puntos blancos).

El efecto que hemos descrito puede ser fácilmente experimentado en situaciones prácticas. Por ejemplo, tómese una hoja de papel blanca dentro de un cuarto iluminado por luz de tungsteno. Después de un minuto (tiempo suficiente para que los mecanismos de adaptación cromática hayan surtido efecto en el ojo), intente juzgar el color del papel. Sin duda alguna, el papel seguirá viéndose blanco aún cuando sabemos que el espectro proveniente del papel predice un color amarillo.

Lo que esto significa, en la práctica, es que la mera reproducción de distribuciones espectrales de energía radiante no siempre produce colores iguales en diferentes medios, puesto que la mayor parte de las veces, el observador se adaptará a un conjunto de condiciones de visualización y el *color percibido* diferirá entre los diferentes dispositivos aún cuando estén reproduciendo exactamente el mismo *estímulo de color*. No es necesario decir que, la reproducción de valores triestímulo también sufre de estos inconvenientes puesto que estos últimos se derivan de los primeros.

Ahora tenemos otro problema: dispositivos diferentes rara vez tienen respuestas espectrales similares. Esto significa que la mayor parte del tiempo no podemos esperar reproducir la distribución espectral de energía radiante de una copia impresa en la pantalla de un monitor puesto que las características espectrales de los fósforos de monitor difieren considerablemente de las características espectrales de las tintas usadas para imprimir sobre el papel. Sin embargo, es posible aún así desplegar colores en un monitor que igualen a los de una copia impresa. Esto se debe a un efecto conocido como *metamerismo*. Esto significa, en términos sencillos, que un mismo *color* puede ser reproducido por una variedad de *estímulos de color* diferentes. ¿Cómo es esto posible? Como hemos visto, en 1931 la CIE condujo una serie de experimentos [24] cuyo objetivo era encontrar las funciones de igualaciones del color para el observador promedio con visión normal del color. Si multiplicamos una distribución espectral de energía radiante por cada una de estas funciones y calculamos las áreas bajo las curvas de los espectros resultantes obtenemos los valores triestímulo. Si dos estímulos de color producen los mismos valores triestímulo, entonces estos estímulos producirán colores iguales siempre que ambos estímulos sean observados bajo las mismas condiciones usadas para obtener las funciones de igualación del color.

Así que, si intentamos proporcionar una igualación de color entre diferentes medios con características espectrales distintas, entonces *debemos* hacer igualaciones metaméricas. Sin embargo, en nuestro caso, la limitación de que ambos estímulos deben ser vistos bajo las mismas condiciones no puede ser cumplida, puesto que estaremos observando un despliegue autoluminoso por un lado, y una copia impresa que depende de un iluminante externo, por el otro. Así que la simple reproducción de valores triestímulo *no* será suficiente en este caso. De hecho, si medimos los valores triestímulo del papel blanco iluminado por la luz de tungsteno, y reproducimos esos mismos valores en la pantalla del monitor, el observador vería un color amarillo en la pantalla, pero el papel retendría su color blanco.

Ahora, recordemos los valores triestímulo calculados para el punto blanco del monitor producidos en la subsección 1.3. El punto blanco de los monitores suele tener un alto contenido de azul, pero puesto que el observador se adapta a esa cromaticidad, los blancos desplegados en los monitores permanecen siendo blancos. En la misma forma en que la pieza de papel permanece siendo blanca al ser iluminada por luz de tungsteno sin importar su evidente tonalidad amarilla. De esta forma, si en lugar de desplegar los valores triestímulo medidos para la pieza de papel, los transformamos primero en los valores triestímulo que producirían un color equivalente cuando se despliegan en un monitor, entonces resolveríamos este problema. En otras palabras, el tono amarillento medido en el papel sería intercambiado por un tono azulado para ser desplegado en el monitor. Y puesto que el

observador se adaptaría a cada conjunto de condiciones de visualización, este cambio en tono produciría una igualación visual. Tales transformaciones matemáticas son llamadas *transformaciones de adaptación cromática* y tienen un fundamento matemático y experimental sólido. Ahora que hemos justificado por qué tenemos que usar estas transformaciones, explicaremos cómo se producen.

#### 4.2 Datos de colores correspondientes.

*Los colores correspondientes* son dos estímulos que son visualizados bajo diferentes condiciones que se igualan en la apariencia del color. Por ejemplo, un estímulo especificado por los valores triestímulo  $XYZ_1$ , al ser visto en un conjunto de condiciones de visualización, puede parecer igual que un segundo estímulo especificado por los valores triestímulo  $XYZ_2$ , al ser vistos bajo un conjunto de condiciones de visualización diferentes.  $XYZ_1$  y  $XYZ_2$ , junto con las especificaciones de las condiciones de visualización, representan un par de colores correspondientes. Es importante notar, sin embargo, que  $XYZ_1$  y  $XYZ_2$  son raramente idénticos. Los datos de colores correspondientes son importantes tanto para crear nuevos modelos de adaptación cromática como para evaluar el desempeño de los modelos existentes.

#### 4.3 Modelos de adaptación cromática.

Un modelo de adaptación cromática permite predecir los datos de colores correspondientes. La forma general del modelo puede ser expresada como se muestra abajo:

$$L_a = f(L, L_{\text{white}}, \dots) \quad (4.1)$$

$$M_a = f(M, M_{\text{white}}, \dots) \quad (4.2)$$

$$S_a = f(S, S_{\text{white}}, \dots) \quad (4.3)$$

Este modelo genérico de adaptación cromática está diseñado para predecir tres señales de conos  $L_a$ ,  $M_a$  y  $S_a$ , después de que todos los efectos de adaptación cromática han actuado sobre las señales de conos iniciales:  $L$ ,  $M$ , y  $S$ . Tal modelo requiere, como mínimo, las excitaciones de los conos para el estímulo adaptante  $L_{\text{white}}$ ,  $M_{\text{white}}$  y  $S_{\text{white}}$ . Es muy posible que un modelo preciso requiera de información adicional también (representada por los puntos suspensivos).

Un *modelo de adaptación cromática* puede ser convertido en una *transformación de adaptación cromática* al combinar el modelo en el sentido normal para un conjunto de condiciones de visualización con el modelo inverso para un segundo conjunto. Con frecuencia tal transformación se expresa en términos de los valores triestímulo, como se muestra a continuación:

$$XYZ_2 = f(XYZ_1, XYZ_{\text{white1}}, XYZ_{\text{white2}}, \dots) \quad (4.4)$$

Para modelar de forma precisa los mecanismos fisiológicos de la adaptación cromática, uno debe expresar los estímulos en términos de las excitaciones de los conos, LMS, en lugar de los valores triestímulo XYZ. Afortunadamente, las excitaciones de conos pueden ser aproximadas razonablemente mediante una transformación lineal (una matriz de 3×3). Así, tal como se expresa en [44], una transformación de adaptación cromática genérica puede ser descrita como sigue:

1. Comience con los valores triestímulo CIE ( $X_1 Y_1 Z_1$ ) para la primera condición de visualización.
2. Transforme estos valores a excitaciones de conos ( $L_1 M_1 S_1$ ).
3. Incorpore la información acerca del primer conjunto de condiciones de visualización ( $VC_1$ ) usando el modelo de adaptación cromática para predecir las señales de conos adaptadas ( $L_a M_a S_a$ ).
4. Invierta el proceso para el segundo conjunto de condiciones de visualización ( $VC_2$ ) para determinar el correspondiente color in términos de excitaciones de conos ( $L_2 M_2 S_2$ ) y finalmente, los valores triestímulo CIE ( $X_2 Y_2 Z_2$ ).

Debemos enfatizar una cosa: la transformación de adaptación cromática predice pares de colores correspondientes. Estos son colores que se igualan en apariencia a través de un cambio en el iluminante usado. Una transformación de adaptación cromática, digamos de D50 a D65 *no* convierte valores triestímulo en D50 a los valores que hubieran sido medidos si un iluminante D65 hubiera sido usado en vez del D50. Lo que la transformación *si* hace es determinar los valores triestímulo correspondientes a un estímulo que produce, para un observador estándar adaptado cromáticamente a la cromaticidad de D65, una igualación visual al estímulo de color original al ser visto por el observador estándar que se ha adaptado a la cromaticidad del iluminante D50. Regresaremos a este hecho en el futuro, cuando discutamos las limitaciones de la solución ICC al problema del manejo del color.

#### 4.4 El modelo de von Kries.

Todos los modelos de adaptación cromática modernos tienen sus raíces, tanto conceptualmente como matemáticamente en las hipótesis de Johannes von Kries [28]. von Kries estableció algunas ideas que aún ahora están siendo “redescubiertas” Su idea principal era proponer un modelo simple de adaptación cromática que serviría como base para investigaciones futuras. von Kries no delineó un conjunto específico de ecuaciones que representen lo que ahora se llama el modelo de von Kries, la ley de proporcionalidad de von Kries o los coeficientes de von Kries. Él simplemente delineó su hipótesis en estas palabras:

Esto puede concebirse en el sentido de que los componentes individuales presentes en el órgano de la visión son independientes unos de otros y que cada uno se fatiga o adapta de acuerdo a su función.

La interpretación moderna de las hipótesis de von Kries en términos de un modelo de adaptación cromática se expresan abajo:

$$L_a = k_L L \quad (4.5)$$

$$M_a = k_M M \quad (4.6)$$

$$S_a = k_S S \quad (4.7)$$

$L$ ,  $M$  y  $S$  representan las respuestas de conos iniciales;  $k_L$ ,  $k_M$ , y  $k_S$  son los coeficientes usados para escalar las señales de conos iniciales (análogas al control de ganancia); y  $L_a$ ,  $M_a$ , y  $S_a$  son las señales de conos después de la adaptación. Las ecuaciones recién mostradas representan un modelo de control simple de la ganancia de la adaptación cromática en la que cada uno de los tres tipos de conos tiene un coeficiente de ganancia separado. Un aspecto clave de cualquier modelo es cómo los valores particulares de  $k_L$ ,  $k_M$ , y  $k_S$  se obtienen. En la mayoría de las instancias modernas del modelo de von Kries los coeficientes se toman como las inversas de las respuestas cónicas  $L$ ,  $M$ , y  $S$  para el blanco de la escena o el estímulo más brillante, como se ilustra a continuación:

$$k_L = 1 / L_{\max} \text{ o } k_L = 1 / L_{\text{white}} \quad (4.8)$$

$$k_M = 1 / M_{\max} \text{ o } k_M = 1 / M_{\text{white}} \quad (4.9)$$

$$k_S = 1 / S_{\max} \text{ o } k_S = 1 / S_{\text{white}} \quad (4.10)$$

Estas ecuaciones son una representación matemática de la afirmación de von Kries de que “cada uno se fatiga de acuerdo a su función” Dadas las interpretaciones previas de los coeficientes de ganancia, el modelo de von Kries puede ser usado para calcular los colores correspondientes entre dos condiciones de visualización calculando las señales de post-adaptación para la primera condición, igualándolas con las señales de post-adaptación para la segunda condición de visualización y luego invirtiendo el modelo para las segundas condiciones. Ejecutando estos pasos resulta en las transformaciones dadas en seguida:

$$L_2 = (L_1 / L_{\max 1}) L_{\max 2} \quad (4.11)$$

$$M_2 = (M_1 / M_{\max 1}) M_{\max 2} \quad (4.12)$$

$$S_2 = (S_1 / S_{\max 1}) S_{\max 2} \quad (4.13)$$

En algunos casos, se más conveniente expresar los modelos de adaptación cromática en términos de una transformación con matrices. La interpretación del modelo de von Kries se expresa en notación matricial en la siguiente forma:

$$\begin{array}{c} L_a \\ M_a \\ S_a \end{array} \left| = \right| \begin{array}{ccc} 1/L_{max} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1/M_{max} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1/S_{max} \end{array} \left\| \begin{array}{c} L \\ M \\ S \end{array} \right. \quad (4.14)$$

La notación matricial puede ser extendida para calcular los colores correspondientes a través de dos condiciones de visualización y para incluir de manera explícita la transformación (matriz M, dada abajo) desde valores triestímulo CIE (XYZ) a respuestas de conos relativas (LMS). Si concatenamos todas las transformaciones y las fundimos en una sola matriz obtenemos:

$$\begin{array}{c} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{array} \left| = M^{-1} \right| \begin{array}{ccc} L_{max 2} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & M_{max 2} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & S_{max 2} \end{array} \left\| \begin{array}{ccc} 1/L_{max 1} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1/M_{max 1} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1/S_{max 1} \end{array} \right| \begin{array}{c} X_1 \\ M Y_1 \\ Z_1 \end{array} \quad (4.15)$$

Hay una variedad de formas para transformar valores CIE triestímulo en respuestas de conos. En seguida mostramos la matriz Hunt-Pointer-Estévez [4], [44], [3], para transformar valores XYZ en señales LMS con normalización a D65:

$$\text{EHP} = \begin{vmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9182 \end{vmatrix} \quad (4.16)$$

En esta matriz, los números se calcularon de forma que cuando los valores triestímulo para el D65 se conviertan en señales de conos terminemos con  $L = M = S = 1$ . Mostramos ahora la misma matriz pero con normalización al iluminante equi-energético [44], [67]:

$$\text{EHP} = \begin{vmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.1834 & 0.04641 \\ 0.0 & 0.0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.17)$$

Hay otros modelos de adaptación cromática como la teoría Retinex [44], el modelo de Nayatani et al. [44], el modelo de Bradford [44], etc. Sin embargo, todos estos modelos transforman valores XYZ en alguna forma de respuestas de conos, aplican entonces una transformación más o menos complicada, y finalmente invierten la conversión para obtener un nuevo conjunto de valores triestímulo adaptados. Cada modelo se construyó con base en un conjunto de datos de colores correspondientes y está orientado, por lo tanto, a una aplicación específica, así que ningún modelo funciona perfectamente bien en todas las situaciones. Por otro lado, el modelo de von Kries tiene un desempeño aceptable [44], y es recomendado por el estándar ICC en [1], [2] y en [4]. En este último documento, sin embargo, se asume que el punto blanco del monitor siempre será D65, lo cual no siempre es cierto, porque algunos monitores pueden estar ajustados a otros puntos blancos como el D50 o el D93.

#### **4.5 Fallas de los perfiles ICC.**

Antes de mostrar cómo una simulación de impresión puede hacerse, regresemos a nuestro primer experimento mental y veamos cómo lo podemos resolver usando perfiles ICC: deseamos igualar la apariencia del color de un trozo de papel iluminado por una lámpara de tungsteno en la pantalla de un monitor. Para empezar, si usáramos intentos colorimétricos absolutos, los valores triestímulo de la pieza de papel se calcularían muy probablemente con respecto al D50 *no* con respecto a la luz de tungsteno. Entonces estos valores se transformarían al espacio de color del monitor y se

desplegarían. Una vez más, si el observador se adaptara al punto blanco del papel lo vería blanco. Similarmente, si se adapta al punto blanco del monitor, vería un color amarillo en pantalla.

¿Pero qué pasaría si se usara un intento colorimétrico relativo? Los valores triestímulo para el blanco del papel serían exactamente los valores triestímulo del D50, debido a la normalización (ver la ecuación 2.1). Entonces si usamos un intento colorimétrico relativo para obtener los valores RGB correspondientes para el D50, serían exactamente los valores que producen un color blanco en la pantalla del monitor, debido a la normalización. Así que el observador vería un color blanco viniendo de la pantalla y una pieza de papel blanca. Este es, sin embargo, un procedimiento erróneo produciendo un solo resultado correcto.

Primero se debe recordar que una igualación hecha bajo un tipo de iluminación puede no mantenerse bajo otra, debido al metamerismo. Así que primero debemos corregir nuestro experimento y usar un iluminante D50 en lugar de la luz de tungsteno. Sin embargo el D50 es una distribución espectral estadística que fue estandarizada al tomar varias mediciones de luz de día. Así que tendríamos que usar un *emulador* de D50 en su lugar para iluminar al papel. Los emuladores intentan reproducir la distribución espectral estadística, pero no son perfectos. Así que aún con los emuladores de mayor calidad disponibles, la distribución espectral no igualaría exactamente la del D50 y algunas diferencias en los colores serán evidentes (estas diferencias pueden llegar a ser tan grandes como  $\Delta E^* = 2.5$  [44]).

Dejemos este problema a un lado e imaginemos que de hecho disponemos de un emulador de D50 perfecto. Esto es, la luz que proviene de nuestra fuente de luz iguala perfectamente al D50. Todavía hay otro problema que resolver: el estado de adaptación cromática del observador. De hecho, en una comparación ideal, el observador se adaptaría a un punto blanco que sería común tanto para la muestra impresa como para el monitor. Algunos monitores permiten que se ajuste su punto blanco, pero si nuestro monitor no pudiera ser ajustado, entonces tendríamos que usar una transformación de adaptación cromática para producir los valores triestímulo correctos que igualaran a la copia impresa. Una transformación de adaptación cromática conlleva transformar los valores triestímulo en valores de respuestas de conos, aplicar algún algoritmo en este dominio y luego transformarlos en valores triestímulo de nuevo. Es claro que una simple normalización como la que se implementa en el estándar ICC *no es* una transformación de adaptación cromática, y por tanto no tiene un fundamento matemático ni experimental sólido para apoyarlo.

¿Qué se puede concluir de esta discusión? Primero, para producir una igualación de color entre diferentes medios, la solución ICC  *fuerza* al usuario a juzgar las igualaciones en ambientes altamente especializados: las copias impresas siempre deben ser juzgadas bajo un emulador de D50 y los monitores deben ser ajustados a la misma cromaticidad. Más aún, no se garantiza de ninguna forma que una igualación hecha a este nivel se mantendrá más allá de estas condiciones limitadas de visualización. Así que el usuario que desea introducir y asegurar el manejo de color en su proceso de impresión es *forzado* a comprar equipos caros. Sabiendo al mismo tiempo, que estas igualaciones de color sólo se mantendrán bajo una sola condición estricta y especializada de visualización.

¿Qué sucede si quisiéramos modificar el iluminante usado en el perfil ICC? Digamos, por ejemplo que queremos imprimir imágenes para ser vistas bajo luz fluorescente estándar. ¿Hay alguna manera de utilizar los perfiles ICC para solucionar este problema? Sabemos que una transformación de adaptación cromática *preserva* la apariencia de los colores cuando el iluminante usado se cambia. Pero las transformaciones de adaptación cromática *no* pueden ser usadas para predecir cuáles serían los valores colorimétricos que serían medidos si se cambiara el iluminante. Así que, por ejemplo, si tuviéramos un color siendo iluminado por D50 y quisiéramos cambiar a D65, tendríamos que usar una transformación de adaptación cromática para producir valores triestímulo que producirían, para un observador adaptado cromáticamente al D65 los mismos colores que un observador adaptado al D50 observaría en el ambiente original.

Lo que necesitamos es una manera de transformar un conjunto de valores colorimétricos en otro conjunto que sería medido si la fuente de luz se cambiara. ¿Pero es posible hacer esto con los datos disponibles? Lo que encontramos en todos los perfiles ICC son valores XYZ o  $L^*a^*b^*$ . En el caso de los dispositivos reflejantes o semitransparentes, debemos usar un iluminante para generar estos valores. Conocemos la distribución espectral del iluminante, puesto que es el iluminante estándar D50, y conocemos las CMF's, pero no conocemos la reflectancia/transmitancia usada para calcular los valores. ***Así que el problema se reduce a encontrar el espectro de reflectancia/transmitancia dados un conjunto de valores triestímulo, la distribución espectral de potencia radiante del iluminante y las funciones de igualación del color.*** Si pudiéramos calcular este espectro de alguna forma, entonces podríamos insertar cualquier iluminante y usarlo para producir nuevos valores triestímulo. Entonces podríamos usar transformaciones de adaptación cromática para preservar la apariencia de los colores bajo los nuevos iluminantes a través de diferentes medios. Nótese, sin

embargo, que los monitores no sufren de esta falla puesto que estos dispositivos son autoluminosos y no necesitan de fuentes de luz externa para producir color.

Sin embargo, existe otro gran problema: el metamerismo. Estímulos de color diferentes pueden producir el mismo color. Así que en principio un mismo conjunto de valores colorimétricos puede ser producido por una variedad de reflectancias o transmitancias espectrales. Si tuviéramos un algoritmo que calculara una reflectancia o transmitancia espectral a partir de los datos mencionados. ¿cómo podríamos garantizar que el espectro reconstruido corresponde con el original? Para ilustrar este problema, tómese por ejemplo, la reflectancia mostrada en la Tabla 4.1. Esta reflectancia produce los mismo valores triestímulo calculados para la muestra de papel café usada en la sección 1.3 si se usa D50 como iluminante. Es decir esta distribución es un metámero de aquella bajo esta iluminación. De hecho, esta distribución fue producida al intentar adivinar el espectro de reflectancia original de esa misma muestra a partir de sus valores triestímulo.

$\lambda$	Reflectancia	$\lambda$	Reflectancia
380	0.99818	560	0.000208
390	0.99312	570	0.000220
400	0.96162	580	0.000287
410	0.86572	590	0.01870
420	0.55604	600	0.05465
430	0.08118	610	0.07534
440	0.0	620	0.22843
450	0.0	630	0.46385
460	0.0	640	0.62536
470	0.0	650	0.77480
480	0.0	660	0.86700
490	0.30901	670	0.92646
500	0.35586	680	0.96226
510	0.25835	690	0.98391
520	0.07806	700	0.99154
530	0.000044	710	0.99562
540	0.000131	720	0.99823
550	0.000189	730	0.99902

Tabla 4.1. Reflectancia espectral que produce una igualación metamérica con respecto a la muestra de papel café de la sec. 1.3

Si producimos un algoritmo que calculara la reflectancia/transmitancia espectral a partir de un conjunto de valores triestímulo, ¿cómo podríamos asegurar que el algoritmo no está generando un metámero? La respuesta es que *no hay forma* de saber si el espectro calculado es un metámero o no. Así que tampoco puede ser usado con seguridad para calcular los valores triestímulo que serían medidos si se cambiara el iluminante. Esto significa que los valores triestímulo medidos para un dispositivo no autoluminiscente están ligados de manera irreversible con el iluminante usado. Esto

también implica que los perfiles ICC no pueden ser usados para producir igualaciones de color en ambientes diferentes de los propuestos por el estándar. A menos, por supuesto, que el ICC especificara un conjunto de condiciones de visualización diferentes. Nótese que esta falla estará presente en cualquier sistema de manejo de color que implemente la solución ICC. Porque este es un problema inherente a la forma como se calculan los valores colorimétricos que estos perfiles contienen.

Debemos concluir entonces, que la solución ICC es apropiada para un solo conjunto de condiciones de iluminación y visualización. También el uso de los perfiles ICC fuerza al usuario a comprar equipo caro que no garantiza que la igualación se mantenga en otros tipos de iluminación. En el capítulo anterior comprobamos cómo los perfiles espectrales pueden ser usados para igualar colores entre diferentes medios usando iluminantes comunes. Pero las pruebas de estos perfiles se condujeron bajo condiciones muy estrictas de visualización. Para poder usar este tipo de perfiles con condiciones más comunes, y para habilitar la simulación de impresión, se deben tomar en cuenta las transformaciones de adaptación cromática, como se discute en seguida.

#### **4.6 Simulación de impresión usando fuentes de luz comunes.**

Antes de mostrar el algoritmo en detalle, hagamos una declaración explícita del problema que deseamos resolver. Dadas las siguientes entradas al sistema:

1. Una imagen RGB.
2. El perfil espectral del monitor que se usará para visualizar la simulación.
3. El perfil espectral de la impresora que se simulará.
4. La distribución espectral de potencia radiante de la luz que será usada para ver la imagen impresa.

El problema es crear una imagen RGB que al ser desplegada en pantalla iguale la apariencia de los colores que esta imagen tendría si fuera impresa y visualizada bajo el iluminante dado. Debe notarse que este problema *puede* ser resuelto usando los perfiles ICC siempre que se usen los emuladores correctos y se observen las restricciones señaladas con anterioridad. El siguiente algoritmo es entonces válido para ambos tipos de perfiles. De hecho, la única diferencia *esencial* entre ambos perfiles es la habilidad para cambiar de iluminantes con facilidad.

Para producir una simulación de la imagen, nosotros seguimos estos pasos:

1. Sean  $Red_i$ ,  $Green_i$ ,  $Blue_i$  los componentes rojos, verdes y azules del  $i$ -ésimo pixel de la imagen. Normalice todos los componentes  $Red_i$ ,  $Green_i$ ,  $Blue_i$  para  $0 \leq i \leq N - 1$ , donde  $N$  es el número de pixels in la imagen original, de forma que cada componente quede en el intervalo  $[0.0, 1.0]$ .
2. Transforme cada tripleta ( $Red_i$ ,  $Green_i$ ,  $Blue_i$ )  $0 \leq i \leq N - 1$ , en la imagen original en sus valores ( $C_i$ ,  $M_i$ ,  $Y_i$ ,  $K_i$ ) correspondientes usando uno de los varios algoritmos conocidos (ver, por ejemplo [8]).
3. Transformar cada valor ( $C_i$ ,  $M_i$ ,  $Y_i$ ,  $K_i$ ) en sus correspondientes valores triestímulo ( $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ ) usando el perfil espectral de la impresora y la distribución espectral de potencia radiante de la fuente de luz usada. Este cálculo debe ser realizado usando *colorimetría relativa* (ver ecuación 1.2) para producir igualaciones de claridad-croma. (Si usáramos perfiles ICC, esta conversión debería hacerse con un intento *absoluto colorimétrico*).
4. Calcule los valores triestímulo del punto blanco del medio para la impresora:  $MW_{printer}$ , y los valores triestímulo para el punto blanco del medio del monitor:  $MW_{monitor}$ .
5. Calcule una transformación de adaptación cromática desde  $MW_{printer}$  hasta  $MW_{monitor}$  usando uno de los varios algoritmos disponibles (como el modelo de von Kries, discutido anteriormente).
6. Aplique la transformación de adaptación cromática calculada en el paso anterior para cada valor triestímulo ( $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ ), produciendo nuevos valores triestímulo ( $X'_i$ ,  $Y'_i$ ,  $Z'_i$ ).
7. Transforme los valores triestímulo adaptados ( $X'_i$ ,  $Y'_i$ ,  $Z'_i$ ) en nuevos valores ( $R'_i$ ,  $G'_i$ ,  $B'_i$ ) usando el perfil espectral del monitor y ensamblando la nueva imagen con estos datos, desnormalizando los valores si es necesario. (Si usáramos perfiles ICC, esta transformación podría hacerse con cualquier intento de producción, aunque un intento absoluto colorimétrico se sugiere).

Usando este método, las imágenes generadas serán igualaciones de claridad-croma con respecto a sus respectivas contrapartes impresas. Este método está basado en tres supuestos:

1. El observador se adapta al punto blanco del papel cuando mira la versión impresa de la imagen.
2. El observador se adapta al punto blanco del monitor cuando mira la versión desplegada de la imagen.

3. La transformación de adaptación cromática empleada en el paso 5 es verdadera sin importar la distribución espectral de potencia radiante usada como entrada.

Los primeros dos supuestos deben ser verdaderos para poder aplicar la transformación de adaptación cromática. El tercer supuesto debe ser verdadero para que dicha transformación produzca buenos resultados. Si cualquiera de estos supuestos no se mantiene (por ejemplo, si hay adaptación cromática incompleta), entonces no se pueden obtener buenos resultados. Más aún si el monitor fue caracterizado en un ambiente libre de reflejos, entonces las mismas condiciones deben estar presentes cuando el observador mire la imagen en pantalla. Así que una comparación lado a lado no sería posible a menos que el monitor estuviera protegido de alguna forma contra la fuente de luz usada para visualizar la imagen impresa. Y aún así, tal protección prevendría que el observador se adaptara cromáticamente de forma completa al mirar la versión impresa puesto que la fuente de luz no producirá una iluminación de ambiente.

Dadas todas las limitaciones mencionadas, se implementó una aplicación que usaba este algoritmo y las librerías de nuestro sistema para generar simulaciones de impresión. Esta aplicación también permitía al usuario imprimir la imagen para verificar la simulación. Desafortunadamente, juzgar visualmente tales imágenes era altamente subjetivo y por esta misma razón, no muy fácil de analizar como las diferencias  $\Delta E^*$  empleadas anteriormente. Por otro lado, hay una alta probabilidad de que las transformaciones de adaptación cromática empleadas no produzcan buenos resultados al ser usadas con fuentes de luz comunes. Y puesto que no es el propósito de esta tesis analizar y resolver este problema, no se planearon experimentos.

Terminamos este capítulo afirmando que las aplicaciones subsidiarias pueden ser implementadas fácilmente usando nuestro sistema como punto de partida. De hecho, la única cosa que un programador debe implementar (si es que es necesario), es una transformación de adaptación cromática. Nuestro sistema provee una implementación del modelo común de von Kries para este propósito. Muchas otras aplicaciones pueden desarrollarse que tomen ventaja del sistema subyacente discutido en esta tesis. Por ejemplo, para forzar a que las imágenes impresas se vean como las originales desplegadas en el monitor, los valores originales en RGB se convertirían en XYZ, luego se adaptarían del punto blanco del monitor al punto blanco de la impresora, y entonces se transformarían de regreso al sistema CMYK. Pero tales aplicaciones están fuera del alcance de esta investigación.



# Conclusiones y trabajo futuro.

---

Este capítulo presenta las conclusiones finales. Hacemos un recuento de las metas que fueron satisfechas. Mencionamos las ventajas y desventajas de nuestra solución. Finalmente se especifican algunos punto que pueden ser explotados para investigaciones futura, e incluimos sugerencias para un método de caracterización de impresoras más compacto.

---



## **Metas logradas.**

De la investigación realizada, y la solución descrita aquí, podemos concluir lo siguiente:

1. Se implementó un sistema de manejo de color multiplataforma que soporta tanto perfiles ICC como los nuevos perfiles espectrales.
2. Hemos mostrado que la solución ICC para el manejo de color funciona, pero tiene algunas fallas. Los perfiles ICC sólo pueden ser usados para condiciones de iluminación estrictas que no se encuentran en situaciones de oficina o trabajo típicas. Propusimos una solución a este problema creando nuevos perfiles basados en perfiles espectrales. Estos perfiles almacenan distribuciones espectrales de potencia radiante, para los monitores y reflectancias espectrales, para impresoras, proporcionando de esta forma perfiles *universales*, que pueden ser usados en una variedad de condiciones de iluminación.
3. También probamos que por lo menos un paquete profesional de manejo de color de terceros puede crear perfiles ICC erróneos.
4. Probamos que nuestra solución para el manejo de color produce buenos resultados. Esta nueva solución tiene las siguientes ventajas sobre el estándar ICC:
  - Independencia del iluminante.
  - Precisión mayor en las predicciones colorimétricas.
  - Posibilidad de generar igualaciones espectrales cuando las respuestas espectrales de los dispositivos lo permitan. Produciendo de esta forma igualaciones de color que se mantienen independientemente de que se cambie la fuente de luz.

## **Desventajas.**

Nuestra solución no está exenta de desventajas, tales como:

1. Solución propietaria, el estándar ICC es bien conocido y aceptado en todo el mundo.
2. Falta de algoritmos como: generación de intentos de producción, compresión de gamuts, y transformaciones inversas eficientes.
3. Tamaño potencialmente mayor de los perfiles espectrales y proporcionalmente mayor tiempo de procesamiento.

De las desventajas anteriores, las últimas dos pueden ser tema para investigaciones futuras. También está el problema de una caracterización más compacta de las impresoras. Pienso que debe existir algún modelo que no requiera la construcción de una LUT para predecir las curvas de reflectancia espectral para un conjunto dado de valores CMYK. Pero debido a la falta de recursos, esta investigación se deja para después.

Finalmente, todavía queda el problema de encontrar una adaptación cromática universal. Los algoritmos usados en esta investigación (como la transformación de von Kries, descrita en esta tesis) son bien conocidos y han sido probados muchas veces. Sin embargo, todos estos algoritmos fueron diseñados tras un conjunto específico de datos. Así que son específicos para una aplicación en particular. Una adaptación cromática diseñada especialmente para el problema de la igualación de colores entre monitores e impresoras sería muy bienvenida.

### ***Trabajo futuro.***

El objetivo del trabajo presente era proveer un sistema de manejo de color, en lugar de aplicaciones para soluciones específicas. Nuestro sistema es el fundamento sobre el cual se pueden construir tales aplicaciones. Por ejemplo, para producir una simulación de impresión, el programador debe transformar los valores CMYK en XYZ usando el perfil espectral y un iluminante específico. Entonces, si es necesario tomar en cuenta las adaptaciones cromáticas, estos valores deben ser transformados en sus valores XYZ' equivalentes para el ambiente destino. Estos valores deben ser transformados para lidiar con las diferencias en los gamuts y finalmente, el programador los transformaría en datos RGB y desplegaría el resultado en la pantalla del monitor.

De forma similar, para preservar la apariencia del color a través de diferentes medios y condiciones de visualización, los valores independientes de dispositivos deseados se transformarían en valores XYZ. Luego se transformarían en valores XYZ' si hay que tomar en cuenta la adaptación cromática, se comprimirían debido a las diferencias en gamuts y finalmente se convertirían en las coordenadas del dispositivo destino. Nuestro sistema provee funciones que ejecutan todas estas transformaciones de manera automática, facilitando la creación de tales aplicaciones.

Otro punto importante que sigue sin solución es cómo los colores modifican su apariencia cuando se observan como parte de imágenes complejas. Aún si tuviéramos un algoritmo perfecto que igualara visualmente colores únicos, no hay garantía de que la igualación se mantendrá cuando los colores sean rodeados por fondos de color complejos. Todavía falta la creación de un modelo de apariencia del color que pueda ser aplicado en una gran variedad de situaciones.

Finalmente, hemos detectado que el paquete de terceros que usamos para generar los perfiles ICC (el ProfileMaker Professional 3.0 de LOGO) produce perfiles de monitor erróneos, puesto que el valor del punto blanco del medio se escribe de forma incorrecta. Esto significa que uno no debe dar por hecho que todos estos paquetes funcionan bien tan sólo porque son comerciales. Más aún, no hay ningún sistema de terceros que genere los perfiles espectrales. Probamos que un esquema simple es suficiente para producir un perfil espectral de un monitor, pero lo mismo no es necesariamente cierto para las impresoras. Se debe hacer una investigación más extensa para ver si un perfil de impresora puede ser construido a partir de un conjunto pequeño de mediciones y un modelo que las utilice de forma eficiente para generar todo el gamut del dispositivo. Sugerimos que tal modelo use las curvas denistométricas o de absorbancia espectral de cada tinta se usen en combinación con el papel y la pantalla de *semitono* (*half-tone*).

A partir de nuestra propia experiencia sabemos que la mezcla aditiva de colores se comporta de manera diferente para despliegues autoluminiscente que para colores reflejantes. Una mezcla aditiva de luces coloreadas se produce sumando cada componente de su espectro. Pero la “mezcla aditiva” de colores impresos se comporta de forma ligeramente distinta, si usamos el término “mezcla aditiva de colores impresos” como la mezcla de colores producida por un disco de Newton giratorio. Puesto que sólo podemos medir reflectancias espectrales para este tipo de colores, la adición debe producir otra reflectancia espectral. Nosotros experimentamos con un disco giratorio y dos colores cubriendo cada uno la mitad del disco. Medimos la reflectancia de cada color de manera individual y luego, mientras el disco giraba, medimos la reflectancia de la mezcla. Aún careciendo del control de un experimento riguroso, la mezcla era claramente el promedio de las reflectancias de los colores constituyentes. Sugerimos la siguiente fórmula para calcular la reflectancia espectral de la mezcla aditiva de colores impresos:

$$R_i = P_a A_i + P_b B_i + \dots + P_n N_i \quad (5.1)$$

donde:

A, B, .. N, son las reflectancias espectrales de los colores a ser mezclados.

$A_i, B_i, \dots, N_i$ , son los  $i$ -ésimos componentes del espectro de cada color.

$P_a, P_b, \dots, P_n$ , son los porcentajes del área abarcada por los colores A, B, ..., N, respectivamente.

R y  $R_i$  son las reflectancias espectrales finales y sus  $i$ -ésimos componentes, respectivamente.

La mezcla de la reflectancia de colores en una pantalla de semitono es algo diferente, pero si interpretamos el área abarcada relativa sobre el disco como la densidad correspondiente de los puntos en la pantalla la fórmula debería ser igualmente válida. Sin embargo, esta fórmula sólo se aplica a los colores que no se enciman. Si esto sucede, el espectro resultante será la inversa de la multiplicación de las absorbancias de los colores que se enciman:

$$R_i = (1 - ((1 - A_i)(1 - B_i) \dots (1 - N_i))) \quad (5.2)$$

Nótese sin embargo, que el porcentaje de cubrimiento de área no está en la ecuación y que la fórmula asume una transmisión ideal de luz entre las diferentes capas de color, esto no siempre puede ser así porque algo de la luz puede ser dispersada entre las diferentes capas de color. El reto es calcular la cantidad de solapamiento entre los colores y luego calcular la reflectancia de estos colores para ser mezclada con el resto de la pantalla de semitono. Sin embargo, la ganancia en precisión y espacio de almacenamiento debería compensar este trabajo.

Puesto que los perfiles espectrales no son ampliamente soportados, hay que conducir una investigación más exhaustiva para convertir los algoritmos de mapeo de gamuts, generación de intentos de producción y otros algoritmos comunes usados en la colorimetría común para este nuevo modelo de procesamiento. Aún más importante es el desarrollo de algoritmos eficientes para producir igualaciones espectrales y detectar cuándo esto es posible para producir igualaciones de color que se mantengan al cambiar el iluminante.

# Lista de Acrónimos.

API	Application Program Interface.
CEPS	Color Electronic Prepress Systems.
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage.
CIEXYZ	Espacio de color triestímulo basado en las luces imaginarias X, Y y Z.
CLUT	Color LookUp Table
CMF	Color Matching Functions.
CMM	Color Management Module
CMS	Color Management System.
CMY	Cyan, Magenta, Yellow.
CMYK	Cyan, Magenta, Yello, Black.
D50	Iluminante estándar de luz de día con una temperatura de color de 5000°K.
D55	Iluminante estándar de luz de día con una temperatura de color de 5500°K
D65	Iluminante estándar de luz de día con una temperatura de color de 6500°K
DTP41	Espectrofotómetro de X-Rite usado para medir tiras de colores.
EHP	Matriz Hunt-Pointer-Estévez para transformar XYZ en LMS.
GMA	Gamut Mapping Algorithm.
ICC	International Color Consortium.
ICI	International Commission Illumination, lo mismo que la CIE.
ICM	Image Color Management.
IT8.7/3	Un estándar para caracterizar impresoras.
RGB	Red, Green and Blue. Rojo, Verde y Azul.
LMS	Señales de conos Long, Middle y Short.
LCMS	Little Color Management System. Una implementación de un CMS.
LUT	LookUp Table.
ICCLIB	Herramientas que proveen transformaciones primitivas de color.
ICCDUMP	Pequeña utilería para volcar el contenido de los perfiles ICC.
ICCLU	Pequeña utilería para transformar colores usando perfiles ICC.
OSA	Optical Society of America.
PCS	Profile Connection Space.
PCL	Lenguaje de bajo nivel usado para especificar trabajos de impresión.
SPD	Spectral Power Distribution.
TCP/IP	Un protocolo para enviar datos por una red.
XYZ	Espacio de color triestímulo basado en las luces imaginarias X, Y y Z.

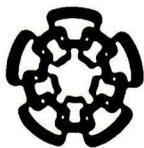


# Referencias.

1. *Specification ICC.1:1998-09 File Format for Color Profiles*, International Color Consortium.
2. *Document ICC.1A:1999-04 Addendum 2 to Spec ICC.1:1998-09*, International Color Consortium.
3. Günter Wyszecki, *Color Science – Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2<sup>nd</sup> Edition, , John Wiley & Sons.
4. *Graphic Technology – Three-Component Color Data Definitions*, CGATS.15-199X.
5. *Managing Color with ColorSync*, Technical Publications, Apple Computer Inc.
6. *Advanced Color Imaging on the Mac OS*, Addison-Wesley.
7. *TIFF Revision 6.0*, Adobe Developers Association.
8. *PostScript Language Reference* 3<sup>rd</sup> edition, Adobe Systems Incorporated.
9. Glenn C. Reid, *Thinking in PostScript*, Addison-Wesley.
10. *Print Publishing Guide*, Adobe Systems Incorporated.
11. *Curso de colorimetría*, Centro de Investigaciones en Óptica A.C.
12. Dawn Wallner, *Building ICC Profiles – the Mechanics and Engineering*.
13. *Programmer's Guide to the Java 2D API – Enhanced Graphics and Imaging for Java*, Java 2 SDK Standard Edition, 1.3 Version, Sun Microsystems.
14. Charles Poynton, *Frequently Asked Questions about Gamma*.
15. Charles Poynton, *Frequently Asked Questions about Color*.
16. Adrian Ford, *Colour Space Conversions*.
17. *Microsoft Windows 2000 Release Candidate 2 (RC2) Release Edition of the Microsoft Platform Software Development Kit (SDK)*, Microsoft.
18. Dan Reid, *Advanced Imaging – Solutions for the Electronic Imaging Professional, Color Management and Colorimetry for Video – Rate Microscopy*, pg 34-37, Cygnus publication, October 1999
19. Charles Reis, *Advanced Imaging – Solutions for the Electronic Imaging Professional, Color Management: Colortron's Sensor & software accounts for the paper medium*, pg 36-37, Cygnus publication, October 1999.
20. Craig Larman, *UML y patrones, Introducción al análisis y diseño orientado a objetos*, Prentice Hall, primera edición 1999.
21. Joseph Schmuller, *Aprendiendo UML en 24 horas*, Prentice Hall, 1999.
22. Frederick J. Bueche, David A. Jerde, *Fundamentos de Física*, Tomo 2, 6<sup>o</sup> Edición, 1996.
23. Francis W. Sears, Mark W. Zemansky, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, *Física universitaria*, Prentice Hall, Addison Wesley, Vol. 1, 1999.
24. Deane B. Judd, *The 1931 I.C.I. Standard Observer and Coordinate System for Colorimetry, Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Bureau of Standards, Washington, D.C., Vol. MS 77.
25. W.T. Wintringham, *Color Television and Colorimetry, Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Vol. MS 77.
26. Deane B. Judd, *The unsolved problem of colour perception, Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Vol. MS 77.
27. Deane B. Judd, *Color Appearance, Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Vol. MS 77.

28. Johannes von Kries, Chromatic adaptation, *Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Vol. MS 77.
29. Isaac Newton, New theory about light and colores, (Philosophical Transactions of the Royal Society of London 1671/72), *Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Vol. MS 77.
30. Thomas Young, On the theory of light and colores (excerpt), (Philosophical Transactions of the royal society of London 1802), *Selected Papers on Colorimetry – Fundamentals, SPIE Milestone Series*, Vol. MS 77.
31. Ikeda, et al, A study on colorimetric error caused by quantizing color information, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 845-849, Vol. 41, No. 6 (1992-12)
32. Richard M. Adams II & Joshua B. Weisberg, *The GATF Practical Guide to Color Management*, GATF Press, Second Edition, July 2000-11-22
33. David Kruglinski, *Inside Visual C++*, Microsoft Press, Fourth Edition.
34. *Color Separation Conventions for PostScript Language Programs*, Adobe Developer Support, Technical note #5044, 24 May 1996, Adobe Systems Incorporated.
35. Charles Poynton, *Brightness and Contrast controls*, 2000-09-07, [www.inforamp.net/~poynton/notes/brightness\\_and\\_contrast/](http://www.inforamp.net/~poynton/notes/brightness_and_contrast/)
36. *Graphic technology — Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images*, CGATS/SC3 N 395, Draft #6, February 22, 2000
37. C. A. Poynton, *Wide Gamut Device-Independent Colour Image Interchange*, Sun Microsystems Computer Corporation, U.S.A.
38. Charles A. Poynton, *RISC/UNIX Workstations in Desktop Color Prepress*, Sun Microsystems Computer Corp. Presented at Youngblood/IBEC's DeskTop PrePress Today — Colour Conference '92
39. Charles Poynton, *A Guided Tour of Color Space*, 1997-08-19.
40. *Graphics arts protocol for determining a color match between two reflective hardcopy images based on objective measurement*, CGATS/SC3 N 405, Draft 1, June 9 2000.
41. Charles Poynton, Reducing eyestrain from video and computer monitors & The rehabilitation of gamma, Charles Poynton, *Human Vision and Electronic Imaging III*, Proceedings of SPIE/IS&T Conference 3299, San Jose, Calif., Jan. 26–30, 1998.
42. James M. Palmer, *Radiometry and photometry FAQ*, University of Arizona Tucson.
43. Charles Poynton, *Color Management Technology for Workstations*, paper presented at Sun Expo '92, Manchester, U.K. on September 10, 1992.
44. Mark D. Fairchild, *Color Appearance Models*, Addison Wesley, 1998.
45. M. Helander, T.K. Landauer, P. Prabhu, Color and Human-Computer Interaction, *Handbook of Human-Computer Interaction*, Second completely revised edition, 1997 Elsevier Science.
46. *Java 2 SDK, Standard Edition Documentation*, java.sun.com.
47. sRGB standard: <http://www.srgb.com/>
48. Michael Has, *Color Management: Current Practice and The Adoption of a New Standard*, International Color Consortium.
49. Michael Stokes, Matthew Anderson, Srinivasan Chandrasekar, Ricardo Motta, *A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB*, Version 1.10, November 5, 1996.
50. Tim Kohler, *ICC Achievements and Challenges*, Canon Information Systems.
51. Fabián Ruiz, El error de tono y la grisosidad en las tintas, *Tendencias en impresión hacia el 2000*, Printex Corporation.
52. Fabián Ruiz, *El papel y sus variables*, Printex Corporation.
53. Fabián Ruiz, Fundamentos técnicos en tintas, Viscosidad: una propiedad fundamental, *Tendencias en impresión hacia el 2000*, Printex Corporation.

54. Fabián Ruiz, *La comunicación del color y algunos fundamentos de colorimetría, Tendencias en impresión hacia el 2000*, Printex Corporation.
55. Fabián Ruiz, *Separación de colores, una brevisima descripción de las técnicas y la teoría que gobierna la operación*, Printex Corporation.
56. Fabián Ruiz, *Soluciones de fuente, una revisión a los conceptos tradicionales*, Printex Corporation.
57. Fabián Ruiz, *El 'Trapping' de las tintas*, Printex Corporation.
58. Ján Morovic, *To Develop a Universal Gamut Mapping Algorithm*, Doctoral Thesis, (Condensed Format Edition), University of Derby, October 1998.
59. Ján Morovic, M. Ronnier Luo, *Cross-Media Psychophysical Evaluation of Gamut Mapping Algorithms*, Desing Research Centre, University of Derby, 1997.
60. Ján Morovic, M. Ronnier Luo, *Gamut Mapping Algorithms Based On Psychophysical Experiment*, Design Research Centre, University of Derby, UK.
61. Ján Morovic and M. Ronnier Luo, *Verification of Gamut Mapping Algorithms In CIECAM97s Using Various Printing Media*, Colour & Imaging Institute, University of Derby, UK.
62. Ján Morovic and Pei-Li Sun, *Methods for Investigating the Influence of Image Characteristics on Gamut Mapping*, Colour & Imaging Institute, University of Derby, UK.
63. Ján Morovic and M. Ronnier Luo, *A Universal Algorithm for Colour Gamut Mapping*, 1998.
64. Ján Morovic and Pei-Li Sun, *How Different are Colour Gamuts in Cross-Media Colour Reproduction?*, Colour & Imaging Institute, University of Derby, UK.
65. Ján Morovic, *Gamut mapping and ICC rendering intents*, Colour & Imaging Institute, University of Derby, UK.
66. Ján Morovic and M. Ronnier Luo, *The Pleasantness and Accuracy of Gamut Mapping Algorithms*, Colour & Imaging Institute, University of Derby, UK.
67. Edward J. Giorgianni, Thomas E. Madden, *Digital Color Management Encoding Solutions*, Addison-Wesley, 1998.
68. Stuart Frederick Ring, Edward Joseph Giorgianni, *Digital Color System and Method Which Provides a Visual Match Across Different Input and Output Viewing Conditions*, United States Patent 5,754,184, May 19, 1998.
69. Iue-Un Steve Swen, Michael D. Stokes, *Method and System for Embedding a Device Profile into a Document and Extracting a Device Profile from a Document in a Color Management System*, United States Patent 5,806,081, Sep 8, 1998.
70. Donald G. Childers, *Modern Spectrum Analysis*, IEEE Press, 1978.
71. Stanislav G. Kesler, *Modern Spectrum Analysis*, II, IEEE Press, 1986.
72. William K. Pratt, *Digital Image Processing*, Second Edition, Wiley-Interscience, 1991.
73. David F. Rogers, Rae A. Earnshaw, *Computer Graphics Theory And Practice*, Springer-Verlag, 1990.
74. *Spectrolino, SpectroScan, SpectroScan T Operating Manual*, GretagMacbeth, [www.gretagmacbeth.com](http://www.gretagmacbeth.com)
75. *Working with ProfileMaker Professional 3.0*, User Tutorial, GretagMacbeth, 1999.
76. *ProfileMaker 3.0 Professional Reference Manual*, GretagMacbeth, 1999.



**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN  
UNIDAD GUADALAJARA**

El Jurado designado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, aprobó la tesis: "Sistema de Manejo de Color Multiplataforma" del C. Leo Hendrik Reyes Lozano el día 4 de Junio de 2001.

Dr. José Luis Leyva Montiel  
Investigador Cinvestav 3B  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara

Dr. Eduardo Bayro Corrochano  
Investigador Cinvestav 3B  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara

Dr. Luis Ernesto López Mellado  
Investigador Cinvestav 3A  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara

Dr. Félix Francisco Ramos Corchado  
Investigador Cinvestav 2A  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara



CINVESTAV  
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003918