

## **PARTE I:**

Introducción y justificación de la unidad temática de la tesis.



## **Capítulo 1:**

# **Introducción**

### ***1.1 Antecedentes***

En las últimas décadas, los dispositivos de adquisición y reproducción de imágenes han experimentado un desarrollo extraordinario, de modo que la clásica imagen registrada en película fotográfica ha sido reemplazada por la imagen digital. Entre las causas que han propiciado este gran desarrollo podemos señalar la incorporación de componentes optoelectrónicos como los sensores matriciales y las pantallas de cristal líquido pixeladas, las memorias, los procesadores, la conexión en red de múltiples dispositivos, la posibilidad de transmisión, copia y almacenamiento de imágenes con deterioro mínimo y a bajo coste, etc. A ello también hay que añadir una creciente demanda de la sociedad por disponer de información rápida y completa, desde cualquier lugar y sobre los temas más diversos.

La tecnología del color, línea aplicada de la ciencia del color, se desarrolla para dar respuesta a las nuevas necesidades planteadas aportando soluciones que realicen una gestión eficiente del color en los sistemas abiertos. Diversos organismos internacionales, donde participan científicos, profesionales de amplios sectores

industriales y de las comunicaciones, así como fabricantes de dispositivos relacionados con la imagen en color, elaboran y actualizan normas para una correcta manipulación del color. La intención que les mueve es la de conseguir que los resultados de las operaciones realizadas mantengan una relación lo más estrecha posible con la predicción del color percibido por un sujeto con visión normal. Puesto que las condiciones de observación tienen una gran incidencia en la percepción del color [Hita 1981] [Fairchild 2005] y, además, pueden ser muy diversas, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) recomienda dar prioridad, en las investigaciones en este campo, a aquellas condiciones más usuales en la práctica industrial. Estas condiciones de observación (designadas como condiciones de referencia) se especifican en las publicaciones de la CIE [CIE 101:1993], [Maier 1995]. Otras publicaciones técnicas de la CIE relacionadas con el trabajo que se presenta en esta tesis son [CIE 116:1995] [CIE 15.2:1986] [CIE 142:2001]. Además de la CIE, podemos destacar los trabajos del *International Color Consortium* (ICC) y la *International Electrotechnical Commission* (IEC) con la elaboración de normas, el establecimiento de perfiles y formatos para la comunicación del color a través de la red internacional (*internet*) y también entre dispositivos de adquisición, impresión y de presentación de imágenes digitales [ICC], [ICC.1:2004-10], [ISO/WD 14524], [IEC 61966-2-1], [ISO/WD 17321-1].

La investigación científica, por su parte, cuenta con un gran volumen de publicaciones que profundizan en diversos aspectos: la descripción de los mecanismos de la visión humana del color, la elaboración de modelos computacionales que representen tales mecanismos, la descripción y especificación cuantitativa del color, la búsqueda de espacios uniformes de color, la formulación matemática que relacione los diversos espacios, el establecimiento de métricas para evaluar las diferencias del color, las condiciones para la manipulación del contenido de color en imágenes, etc. No cabe aquí detallar todos los aspectos que siguen abiertos a la investigación. Baste citar algunos textos representativos que dan cuenta de la evolución en este campo y que guardan relación con el trabajo que aquí se presenta [Wyszecki 1982], [Wandell 1995], [Kaiser 1996], [Romero 1996], [Hunt 1998], [Berns 2000], [Fairchild 2005].

Centrándonos en el color y la imagen digital, ámbito de trabajo de esta tesis, los aspectos a tratar son: la adquisición de imagen por cámara, el análisis colorimétrico y el realce de contornos.

Los sistemas de adquisición electrónica de imagen (cámaras y escáner) se basan en sensores del tipo CCD (del inglés, *charge coupled device*) y CMOS (del inglés, *complementary-metal-oxide-semiconductor*). En este trabajo se analizan cámaras con ambos tipos de sensores. Entre los dispositivos de adquisición de imagen utilizables en aplicaciones colorimétricas se encuentran la cámara de tres canales RGB (de video o fotográfica), la cámara multiespectral y el escáner. Los sistemas de cámaras para visión artificial se componen básicamente de fuente de iluminación, cámara y procesador digital. La información captada por una cámara depende de la iluminación. En sistemas de reconocimiento de formas en color por correlación, se ha analizado la influencia del cambio de iluminante en el reconocimiento de la señal buscada. En una especie de constancia del color computacional, se han diseñado algoritmos para compensar esta influencia y reducir las falsas alarmas [Corbalán 2000], [Corbalán 2002], [Maloney 1986], [Simpson 1991], [Nieves 2004].

Por lo general, se pretende que el sistema de visión por cámara simule la respuesta del sistema visual humano. Por esta razón, muchas cámaras en color constan de tres canales cuyas sensibilidades se diseñan, en un principio, para aproximar las de nuestro sistema visual. Las respuestas del observador patrón han sido determinadas a través de experiencias psicofísicas y están reconocidas oficialmente por la CIE con el nombre de funciones de igualación de color o funciones colorimétricas (*colour matching functions*). Sin embargo, a pesar de intentar aproximar la respuesta visual, muchos sistemas de adquisición y presentación de imágenes en color proporcionan imágenes que son perceptiblemente diferentes de las escenas originales. Una causa es la dificultad de diseñar y fabricar los filtros espectrales que hay que introducir en la cámara. La calidad del color de la cámara, extensible al escáner y a los dispositivos de adquisición en general, representa la exactitud en la especificación del color adquirido.

La caracterización colorimétrica de la cámara es un tema sobre el que se ha trabajado ampliamente, si bien la mayoría de los trabajos siguen una aproximación basada en el contenido espectral de la señal. La caracterización de la cámara es una etapa necesaria para evaluar la respuesta del dispositivo. Los métodos de caracterización [ISO/WD 17321-1] tratan de determinar la relación existente entre el color del objeto, independiente de un dispositivo concreto, y la señal del sensor en un espacio

multidimensional. La señal del sensor viene dada por unos valores dependientes del dispositivo, normalmente RGB (del inglés *Red*, *Green* y *Blue*), mientras que los valores que especifican el color independiente del dispositivo, suelen ser los valores triestímulo CIE XYZ o CIELAB [Wyszecki 1982], [Trussell 1994], [Berns 2000]. Los métodos de caracterización colorimétrica de los dispositivos de adquisición de imágenes se agrupan genéricamente en dos tipos:

- los que se basan en estimar la respuesta del dispositivo a partir de la adquisición de un conjunto de muestras conocidas, por lo general consistentes en estímulos de amplio espectro,
- los que se basan en una determinación directa de las funciones de sensibilidad espectral de los canales RGB.

El primer grupo implica realizar un ajuste que relacione las respuestas RGB del dispositivo con los valores triestímulos XYZ para una serie (test) de muestras patrón de reflectancia conocida (por ejemplo Gretag Macbeth color-checker color rendition chart [McCamy 1976], o bien otra selección de muestras estándar), bajo una iluminación también conocida. Entre los métodos de ajuste, cabe citar los que utilizan ajustes de regresión polinomial aplicando técnicas de mínimos cuadrados: para escáner [Kang 1992a], [Kang 1992b] y para cámaras digitales [Hong 2001]. Después, se estudian las diferencias de color que resultan de aplicar el método sobre otras series de muestras de entrenamiento también conocidas. Hung propuso una mejora en estos métodos de caracterización colorimétrica mediante la introducción de una tabla de actualización (*look-up-table*) y una interpolación [Hung 1993]. También se han propuesto mejoras mediante la introducción de redes neuronales [Adkins 1993].

Un método reciente de calibración de cámaras utiliza un conjunto de muestras consistentes en filtros de transmitancia de banda ancha cuyo número se optimiza mediante un algoritmo basado en los multiplicadores de Lagrange [Büttner 2006].

Numerosos investigadores han contribuido a los métodos de estimación, entre los que cabe mencionar Pratt and Mancill [Pratt 1976], Sharma and Trussell [Sharma 1996], Hubel *et al.* [Hubel 1994], Finlayson *et al.* [Finlayson 1998], König and Herzog [König 1999], y Thomson and Westland [Thomson 2001]. Como notable ventaja, los métodos

de ajuste no son muy costosos económicamente, ya que no requieren equipos, instalaciones y dispositivos tan sofisticados como los del segundo grupo.

El segundo grupo implica la medida directa de las funciones de sensibilidad espectral del dispositivo de adquisición de imagen [Vora 1997a], [Vora 1997b], [Barnard 2002], [Hong 2001]. Estos métodos utilizan un modelo lineal que depende de la intensidad del estímulo. Al menos, consideran que las no linealidades son independientes de la longitud de onda. Se han descrito varios procedimientos para estimar las curvas de sensibilidad espectral de los sensores [Vora 1997b], [Barnard 2002], [Hubel 1994], [Finlayson 1998], [Vhrel 1999]. Una manera conceptualmente simple consiste en la estimulación del sensor con una sucesión de haces cuasimonocromáticos de luz, es decir, de banda espectral muy reducida, comparando las sucesivas respuestas RGB del dispositivo con la respuesta que ofrece un instrumento de referencia (como, por ejemplo, un espectrorradiómetro) en las mismas condiciones.

Las tres funciones de sensibilidad espectral pueden verse como un conjunto de filtros para los cuales se define el factor de bondad de Vora-Trussell  $v$  [Vora 1993]. Este factor caracteriza los dispositivos de adquisición (cámara o escáner) e indica el grado de semejanza entre el conjunto de sensibilidades espectrales del dispositivo y las funciones de igualación de la visión humana, de modo que el valor  $v=1.0$  indica un ajuste perfecto. De acuerdo con Berns y Reiman, son deseables valores superiores a 0.9 para aplicaciones colorimétricas [Berns 2002].

Una caracterización más completa de la cámara tiene en cuenta que la detección de la señal por el sensor y el proceso de registro están afectados por el ruido. Entre los trabajos de calibración de cámaras que consideran el ruido citamos el de Healey y Kondepudy [Healey 1994] para cámaras de un solo sensor CCD y, como más próximo al nuestro, el trabajo de Quan y colaboradores [Quan 2002a]. Entre las fuentes de ruido que afecta a las señales captadas por cámara [Holst 1998], Quan y colaboradores [Quan 2002a] consideran la influencia predominante de los llamados ruidos de corriente oscura (en inglés, *dark current noise*) y de disparo (en inglés, *shot noise*). El ruido de corriente oscura está formado por los electrones que se generan en los píxeles como consecuencia del estado térmico del dispositivo. Este ruido es independiente de la señal y puede

apreciarse incluso cuando no incide luz alguna sobre el sensor. El ruido de disparo tiene su origen en la naturaleza cuántica de los fotones y es dependiente de la señal. En adelante, para referirnos al ruido de disparo utilizaremos el término inglés *shot noise*, ya que el término utilizado en la traducción al castellano no parece suficientemente consolidado. El ruido introduce un error en la señal que se registra. A partir del análisis de la propagación del ruido, Quan y colaboradores proponen una medida unificada de bondad UMG (del inglés, *unified measure of goodness*) [Quan 2002a], [Quan 2002b] mediante la cual recalculan los coeficientes de la matriz de transformación, de valores RGB a valores triestímulos XYZ, de manera que se minimice la propagación del ruido. El error se minimiza haciendo mínimo el promedio de la diferencia de color para un conjunto variado de muestras estándar en un espacio de color perceptualmente uniforme. Esta caracterización de la cámara, aunque es más completa que la caracterización basada exclusivamente en la sensibilidad espectral, es también más compleja y requiere un mayor cálculo. En esta tesis se utilizarán ambos enfoques para la caracterización de las cámaras.

Una vez que la cámara está caracterizada y las condiciones de observación fijadas, el dispositivo puede utilizarse a modo de colorímetro para medir el color. Como espacio de color, está muy extendido el espacio CIELAB de coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , cuyos valores se obtienen a partir de los valores triestímulo XYZ, utilizando fórmulas estándar [Wyszecki 1982], [Berns 2000].

La exactitud en la medida del color mediante cámara se realiza comparando el resultado obtenido por la cámara con el obtenido por un instrumento de referencia, como por ejemplo, un espectrorradiómetro. Más que la medida absoluta del color, en este trabajo nos interesa la medida de las diferencias de color. Esta medida interviene en numerosos procesos de inspección industrial en los que se desea evaluar la uniformidad del color, por encima de la fidelidad en la reproducción del color. Algunos aspectos relacionados con este tema, como el metamerismo y la respuesta de la cámara ante pares que son muy similares para el ojo humano, han sido inicialmente tratados por Marszalec y colaboradores [Marszalec 1997]. Los autores utilizaron el espacio RGB dependiente de la cámara y fórmulas no recomendadas.

Para orientar del estudio de la medida de la diferencia de color por cámara, se tienen en cuenta dos aspectos: la elaboración de un test de muestras adecuado y las fórmulas para calcular las diferencias de color.

En relación con el test, se optará por elaborar un test específico compuesto por muestras estándar del atlas de color Munsell (acabado mate). Esta opción de elaborar un test específico para el estudio planteado es frecuente en la literatura. En particular, centramos nuestra atención en la región del espacio de color correspondiente a los colores poco saturados, o casi neutros. Esta región representa un desafío para el instrumento, ya que los colores casi neutros constituyen una estimulación muy similar de los tres canales de sensibilidad roja, verde y azul de la cámara y, por tanto, las pequeñas diferencias entre estos colores, implican variaciones muy sutiles sobre una señal de fondo constante, casi uniforme, ante la cual ponemos a prueba la capacidad de discriminación de la cámara. Aunque el ser humano presenta una cierta preferencia subjetiva por las imágenes ricas en color, los colores reales de las escenas originales distan de ser tan saturados como los observadores los prefieren [Hunt 1982], [Fedorovskaya 1997]. Hay un gran número de ejemplos, particularmente en la cultura occidental, para los cuales los colores poco saturados predominan en las escenas reales: paisajes naturales en países templados y fríos, escenas urbanas, interiores, decoración, trajes, prendas de vestir, rostros y piel, etc. Los colores saturados quedan casi restringidos al ámbito infantil. Por estas razones culturales, los colores poco saturados son de mayor interés para la industria, en particular, para la industria textil, que ha motivado uno de los campos de aplicación de esta tesis.

La medida de la diferencia de color y su relación con un espacio de color perceptualmente uniforme es un campo de investigación que ha concentrado un gran esfuerzo y que sigue abierto en la actualidad. Se han propuesto una variedad de fórmulas que se han ido evaluando, confrontando con necesidades de uso reales y revisando para proponer nuevas fórmulas mejoradas [Romero 1989], [Melgosa 1990]. La demanda de la industria en este campo no se reduce sólo a disponer de normas y fórmulas eficaces, sino también a disponer de dispositivos y sistemas que permitan objetivar y automatizar las tareas de inspección del color, realizadas todavía hoy día con la participación, en un alto grado, de la visión humana entrenada.

En un espacio de color verdaderamente uniforme, las diferencias de color podrían calcularse midiendo simplemente la distancia euclídea entre dos puntos (colores) de ese espacio, tal y como se propone en la fórmula CIE  $\Delta E_{ab}^*$ . Reconocida la falta de uniformidad del espacio de color CIELAB, la fórmula de distancia euclídea para medir la diferencia de color, ha sido progresivamente revisada y mejorada. Una de las modificaciones más utilizadas es la fórmula CMC de diferencias de color [Clarke 1984], que se basa en la experimentación sobre las diferencias de color percibidas visualmente de muestras textiles. La mayoría de las fórmulas de diferencia de color modernas parten, de las coordenadas en el sistema CIELAB, introduciendo factores de ponderación apropiados sobre las diferencias CIELAB de claridad, croma y tono. Estos factores de ponderación se introducen para corregir la falta de uniformidad perceptual del sistema CIELAB [Pointer 1981], [Hita 1983]. Las fórmulas basadas en CIELAB y, especialmente, las últimas recomendaciones de la CIE en cuanto a fórmulas de diferencia de color de aplicación industrial (i.e. las fórmulas de diferencia de color CIE94 [CIE 116:1995] y CIEDE2000 [Luo 2001], [CIE 142:2001]) son analizadas por Melgosa y colaboradores en [Melgosa 2000], [Melgosa 2001] y [Melgosa 2004], entre otras. En cuanto a la importancia relativa de estas correcciones (CIE94 y CIEDE2000), los autores destacan que la mejora de CIE94 sobre CIELAB es notablemente superior a la mejora de CIEDE2000 sobre CIE94. La corrección en las diferencias de croma son las más importantes que incorporan ambas fórmulas. La recomendación para el uso de la fórmula CIEDE2000 será seguida en este trabajo. Los modelos de la apariencia del color [Fairchild 2005] pretende extender la colorimetría fundamental de la CIE a la predicción de la apariencia del color (no solo igualaciones de color) a través de cambios de medio de presentación y condiciones de observación (no sólo para una condición particular). El desarrollo de esta idea en los años 90 culminó con la recomendación de la CIE del modelo CIECAM97 [CIE 1998] y su revisión CIECAM02 [Moroney 2002], [CIE 159:2004]. La aplicación del modelo de apariencia del color al cálculo de diferencias de color conduce de nuevo a las ecuaciones del formato CIE94 [Fairchild 2004]. Como se puede apreciar, no está dicha la última palabra en este campo. Además, el tema no está exento de polémica [Kuehni 2002], [Luo 2002] y es probable que en los próximos años asistamos a nuevas correcciones y revisiones de las fórmulas de la diferencia de color.

Las diferencias de color consideradas hasta aquí se miden entre dos muestras o áreas de color uniforme. En el caso de las imágenes, que normalmente no son playas uniformes, sino que varían espacialmente, puede surgir la necesidad de calcular la diferencia de color global entre una imagen original y su reproducción (incluyendo algún tipo de procesado o manipulación en la imagen reproducida). La aplicación directa de las fórmulas elaboradas para la comparación de muestras uniformes a las imágenes espacialmente variantes, sobre la base del cálculo de la diferencia de color píxel a píxel, tiende a proporcionar valores de las diferencias de color superiores a los que se perciben visualmente. Este hecho motivó la extensión S-CIELAB (del inglés, *Spatial-CIELAB*) propuesta por Zhang y Wandell [Zhang 1996], que se puede aplicar a estímulos complejos, como las imágenes digitales, cuando son observadas a diferentes distancias del monitor que las presenta. Los autores elaboraron el algoritmo a seguir para aplicar la extensión S-CIELAB en función de las condiciones de observación (básicamente, la distancia del observador a la pantalla, la caracterización colorimétrica y la resolución del monitor). Zhang y Wandell utilizan una serie de filtros espaciales en el espacio de colores oponentes ( $AC_1C_2$ ), que comprende un canal para la luminancia (A) y dos canales cromáticos ( $C_1, C_2$ ). Los filtros espaciales son filtros de suavizado que consisten en una combinación lineal de funciones gaussianas ponderadas que, a su vez, simulan las funciones de sensibilidad al contraste del sistema visual humano para una determinada distancia de observación. Las imágenes filtradas son transformadas de nuevo al espacio de representación CIELAB para proceder a calcular las diferencias de color, sobre una base píxel a píxel. De este modo, S-CIELAB permite calcular las diferencias de color percibidas entre dos imágenes digitales a partir de la fórmula estándar CIELAB. A partir del trabajo de Zhang y Wandell, el tema de la diferencia de color entre imágenes ha seguido un doble desarrollo, en cuanto a la revisión de la fórmula y en cuanto a su empleo en una variedad de aplicaciones. Algunos trabajos donde se profundiza en el tema y se analiza la extensión S-CIELAB son [Johnson 2001], [Johnson 2003a], [Johnson 2003b], [Westland 2005], [Fairchild 2004] y [Hong 2006]. Un enfoque distinto, basado en la distancia de Mahalanobis, ha sido realizado por Imai y colaboradores [Imai 2001]. El comité técnico de la CIE para la evaluación de las diferencias de color en imágenes (CIE TC8.02) ha elaborado guías de trabajo en este campo [CIE 142:2001].

Podemos señalar numerosas aplicaciones de la extensión S-CIELAB para medir el error en la reproducción del color de las imágenes [Zhang 1996], predecir la visibilidad de la textura en los patrones de impresión [Zhang 1997], [Zhang 1998] y comparar los algoritmos de codificación en medios tonos (en inglés, *halftone*) para la impresión de imágenes en color [Damera-Venkata 2001], evaluar los algoritmos de compresión de imágenes [Zhang 1996] y segmentar imágenes en color [Mirmehdi 2000].

Es destacable la reciente aportación de Fairchild y Johnson [Fairchild 2004] en la línea de desarrollar un marco específico (iCAM) para el tratamiento de imágenes dentro de los modelos de apariencia del color, con una métrica adaptada para el cálculo de diferencias de color entre imágenes, que tendría una notación diferenciada ( $\Delta Im$ ). Esta métrica ( $\Delta Im$ ) convergería en la clásica  $\Delta E$  para unas determinadas condiciones de observación y configuraciones. El desarrollo de esta propuesta lleva a los autores a concebir la necesidad de una formulación que permita evaluar la calidad de la imagen en color independiente del dispositivo. Esta línea de investigación está muy activa en la actualidad por su gran aplicabilidad a los sistemas abiertos de imagen digital.

Una aplicación de la extensión S-CIELAB que se trata en esta tesis es el realce de contornos en imágenes digitales en color [Millán 2006c]. Con frecuencia, los contornos de los objetos contenidos en una imagen están afectados por el ruido o aparecen pobremente definidos. Este deterioro de la imagen puede tener un origen diverso: la calidad del objetivo de la cámara (medible a través de su función extensión o imagen de un punto), la resolución del sensor y/o del dispositivo de presentación de imagen, las condiciones de observación, los efectos derivados de operaciones digitales tales como la compresión y descompresión, los patrones de impresión, etc. Hay un gran número de aplicaciones para las cuales los bordes de los objetos o las diferencias entre puntos claros y oscuros adyacentes requieren ser enfatizadas. Pero el realce de contornos es una arma de doble filo: puede mejorar extraordinariamente la apariencia de una imagen, pero, por otra parte, un uso inadecuado o excesivo de esta operación puede alterar la imagen produciendo efectos indeseados, contrastes exagerados, aparición de halos alrededor de los objetos, apariencia artificiosa, aumento de ruido, etc.

El operador de derivada segunda o Laplaciano es una herramienta ampliamente conocida por su utilidad para realzar contornos en imágenes digitales de niveles de gris

[Gonzalez 2004], [Russ 1995]. Este operador se puede aplicar de forma discreta sobre la imagen digital mediante una máscara de convolución. Esta máscara calcula la suma ponderada de las diferencias de nivel de gris existente entre un pixel y sus vecinos. El uso del operador Laplaciano en las imágenes en color, podría aplicarse a cada canal R,G,B por separado y combinar los resultados en una imagen final realzada [Gonzalez 2004]. Sin embargo, la simple extensión de los operadores aplicados en escala de grises, a los canales RGB de una imagen en color no es una buena solución y, en la práctica, no produce resultados satisfactorios [Di Zenzo 1986], [Weickert 1999], [Sochen 1998], [Kimmel 2000], [Yang 1995], [Vanrell 2004]. De hecho, se obtienen resultados aceptables realzando los contornos exclusivamente en la componente de intensidad y manteniendo inalteradas las componentes con la información cromática del tono y la saturación [Russ 1995]. En el trabajo de Di Zenzo [Di Zenzo 1986] las imágenes en color se tratan como funciones multidimensionales para las cuales el tensor gradiente se utiliza de forma efectiva para la detección de bordes. Sochen y colaboradores [Sochen 1998], [Kimmel 2000] realizan un tratamiento más abstracto del tema. Ellos consideran las imágenes como mapas que fluyen hacia superficies mínimas. Consideran una imagen en color como una superficie (bi-dimensional) en un espacio de cinco dimensiones (x,y,R,G,B). Este marco geométrico les lleva a construir potentes algoritmos. En la matemática subyacente en las referencias [Di Zenzo 1986], [Weickert 1999], [Sochen 1998], [Kimmel 2000], [Yang 1995], [Vanrell 2004] la información de color está representada por los valores R,G, B, si bien en [Kimmel 2000] se menciona la posibilidad de utilizar un espacio euclídeo como el CIELAB. Este espacio fue utilizado en un trabajo preliminar de esta tesis [Millán 2005b] en el cual el operador Laplaciano se aplicaba mediante el cálculo de las diferencias de color CIELAB entre píxeles vecinos. Pero las diferencias de color de la CIE, como ya se ha mencionado, fueron desarrolladas para evaluar muestras de color uniforme en condiciones de observación controladas. No hay razón para creer que son adecuadas para predecir la diferencia de color en estímulos espacialmente complejos como son las imágenes. La extensión S-CIELAB, utilizada como un preprocesado de la imagen antes de aplicarle las ecuaciones de la diferencia de color de la CIE, nos reabre una posibilidad interesante para aplicarla en combinación con el operador Laplaciano a fin de obtener una imagen con realce de contornos que, además, tenga en cuenta las condiciones bajo las que será observada.

La combinación de S-CIELAB y el operador Laplaciano conlleva la aplicación del operador derivada segunda de una gaussiana o, lo que se le aproxima mucho, el operador diferencia de gaussianas. Ambos operadores han sido utilizados en los modelos que describen matemáticamente algunas características de la visión espacial del sistema visual humano. Concretamente, la respuesta de los campos receptivos, con una zona central de excitación de la neurona y una zona circundante de inhibición. Este mecanismo de sumación espacial permite explicar el efecto de las bandas de Mach [Norton 2002], [Romero 1996], muy próximo al que se propondrá en esta tesis para el realce de contornos. Esta conexión prueba una vez más la conveniencia de acudir a los modelos computacionales del sistema visual humano como fuente de inspiración para procesar imágenes digitales de forma efectiva [Ferberda 2001].

Los campos de aplicación desarrollados en esta tesis son fundamentalmente dos: uno es el ámbito de la inspección industrial, en particular del sector textil, y el otro es el ámbito de la salud visual, concretamente el del análisis de imagen en clínica.

En la industria textil, la evaluación de la uniformidad del color en tejidos es una de las tareas comúnmente llevadas a cabo por inspección visual de operarios entrenados [McDonald 1980]. Una de las tareas típicas consiste en comparar el color entre el centro y los orillos, tanto izquierdo como derecho, de la anchura usable de una pieza de tela (160 cm aproximadamente). Dos pares de muestras centro-orillo, es decir, el par orillo izquierdo-centro y el par orillo derecho-centro, se evalúan siempre juntos en un punto de la longitud total de la pieza de tela. La prueba se realiza varias veces a lo largo de toda la pieza de tela fabricada (50m, 200m, etc.). Si la diferencia de color se percibe visualmente se considera inaceptable [McDonald 1988], [Steen 2002], entonces una cierta extensión del tejido es rechazada. Esta inspección es difícil de realizar y requiere de una persona de visión entrenada en la evaluación del color. El nivel de exigencia de uniformidad del color suele ser muy alto en la industria textil, pero es difícil de comprobar que se satisface porque las muestras a las que se les aplica el control de calidad tienen a menudo colores muy oscuros y poco saturados (por ejemplo, fabricación de tejidos para trajes de caballero y señora), o bien pueden estar presentes efectos relacionados con la textura, etc. La evaluación de las muestras textiles es notablemente más compleja que las muestras de la carta Munsell porque la textura del tejido introduce variabilidad en la información del color. En nuestro trabajo hemos

aplicado un sistema de visión basado en la cámara 3CCD para realizar la prueba de inspección de pares de muestras centro-orillo. Mediante este sistema se miden de manera objetiva las diferencias de color entre las muestras de cada par y, aplicando un criterio de calidad, se obtiene un resultado de pasa/falla, común a otras pruebas de igualación del color en la industria [McDonald 1980].

En oftalmología y en optometría, como en otras ramas de la medicina y la salud, a menudo se utilizan imágenes por la valiosa información que pueden aportar al diagnóstico de una enfermedad o al control y seguimiento del estado de un paciente. De hecho, la imagen médica es ya de por sí un campo de investigación multidisciplinar en el que la adquisición y el análisis de la imagen tienen un papel fundamental. En este trabajo de tesis se desarrollan algunas aplicaciones relacionadas con las complicaciones derivadas del uso de lentes de contacto y con el glaucoma, siendo esta última aplicación en la que se ha concentrado mayor esfuerzo.

Al observar la imagen del fondo de ojo mediante un retinógrafo o cámara de retina, la papila o disco óptico aparece como una zona blanquecina, de contorno redondeado, que corresponde a la superficie visible de la base del nervio óptico. La interpretación acertada de los cambios sobre la capa de fibras nerviosas de la papila y la observación de una progresión de tales cambios con el tiempo pueden ser de gran valor en el diagnóstico precoz del glaucoma, incluso antes de que los primeros síntomas sean advertidos por el paciente. La revisión del aspecto del disco óptico en las imágenes del fondo de la retina es una práctica habitual de los oftalmólogos para evaluar el riesgo del glaucoma o para hacer seguimiento de la evolución de los ojos ya diagnosticados como glaucomatosos. Un parámetro habitual es la relación copa-disco [Armaly 1969], el cual da una idea del área ocupada por la excavación (copa) en el disco óptico. Esta relación es muy usada para evaluar la pérdida de fibra nerviosa y el daño estructural. En los últimos años ha aumentado el interés por obtener una valoración objetiva de la relación copa-disco a partir del análisis de imágenes digitales de la retina. Entre los antecedentes más próximos podemos citar los trabajos de Greaney y colaboradores [Greaney 2002], Li y Chutatape [Li 2003], [Li 2004] Walter y colaboradores [Walter 2002], Pinz y colaboradores [Pinz 1998], Zana y Kevin [Zana 2001], [Zana 1999] y Vermeer y colaboradores [Vermeer 2004]. Una exploración masiva ayudada, automática o semiautomáticamente, por ordenador para el diagnóstico o el seguimiento de ojos

glaucomatosos es una aplicación importante en la que el procesado de imágenes puede contribuir. La principal ventaja podría ser una liberación parcial de los recursos necesarios de especialistas y una reducción del tiempo de la consulta médica. En esta aplicación, utilizamos la imagen captada por una cámara no midriática [Saine 2002] como la imagen de entrada al sistema de ayuda al diagnóstico. La obtención de esta imagen es bastante simple, ya que no requiere paralizar la pupila del paciente. Esta clase de cámaras pueden ser manejadas por técnicos, no necesariamente oftalmólogos. Por eso, esta aplicación cobra mayor sentido, ya que nuestro trabajo de investigación se ha desarrollado en el entorno universitario de una escuela de óptica y optometría.

## ***1.2 Propósito y esquema de desarrollo de la memoria***

En esta tesis se investiga sobre la adquisición, la medida, la representación y el procesado de la información de color contenido en una imagen digital. La caracterización de las cámaras, como dispositivos de adquisición de imágenes, permitirá conocer las mejores condiciones para su uso en aplicaciones colorimétricas. Nos proponemos desarrollar herramientas de análisis que permitan realizar medidas de pequeñas diferencias de color, realce de contornos y segmentación, relacionando los resultados con la respuesta que proporciona la visión humana al realizar operaciones similares. Todo ello objetivamente y con el mayor grado de automatización a nuestro alcance. Se pretende obtener resultados experimentales y numéricos en aplicaciones de diversos campos: la inspección industrial, como la evaluación de la uniformidad en el color de las muestras textiles, y el análisis de imágenes oftálmicas, como las imágenes de complicaciones derivadas del uso de lentes de contacto y las imágenes del fondo del ojo para el diagnóstico y seguimiento del glaucoma.

Esta tesis se propone contribuir a aumentar las capacidades potenciales de los sistemas de visión artificial para ser utilizados en aplicaciones que requieren una evaluación e interpretación de la información de color en imágenes digitales. Estas aplicaciones tradicionalmente se llevan a cabo mediante la visión humana entrenada de técnicos o especialistas y son susceptibles de mejora incrementando en ellas la objetividad y la automatización. En esta dirección hemos orientado el trabajo que se describe en esta memoria.

Los objetivos son:

- Análisis comparativo de dos tipos de cámara: videocámara de arquitectura 3CCD y cámara fotográfica con sensor CMOS multicapa. Caracterización del funcionamiento de la cámara con fines colorimétricos. Medida de la calidad a partir de la sensibilidad espectral y ruido producido en la imagen.
- Evaluación de la capacidad de la cámara para medir pequeñas diferencias de color entre pares de muestras. Comparación de la respuesta de la cámara con un instrumento de referencia de elevada precisión (espectrorradiómetro). Elaboración de tests de muestras que permitan realizar esta evaluación.
- Diseño de un método para el realce de la imagen en color inspirado en los modelos computacionales de la visión humana. Realce de los contornos de una imagen en color considerando las condiciones de observación y las características del dispositivo (monitor) que se utiliza para presentar la imagen. Combinación del operador de realce de derivada segunda con el preprocesado que caracteriza la extensión S-CIELAB. Análisis de las posibles limitaciones del método y evaluación de los típicos efectos no deseados que aparecen en las operaciones de realce de contornos. Estudio de variantes del método que puedan presentar simplificaciones y ventajas de cómputo.
- Desarrollo de aplicaciones de visión artificial para la ejecución de tareas que habitualmente son exclusivas de técnicos y especialistas con visión entrenada en diversos campos: Inspección de la uniformidad del color en muestras textiles, análisis de imágenes de las complicaciones producidas por el uso lentes de contacto y análisis de imágenes del fondo de ojo para la ayuda al diagnóstico precoz y seguimiento del glaucoma. Obtención de resultados experimentales, análisis y extracción de conclusiones.

A continuación mostramos un esquema del desarrollo de los contenidos que abarca la investigación llevada a cabo:

#### **Adquisición de la imagen digital en color.**

- Caracterización colorimétrica de la cámara
  - *Caracterización espectral de la cámara*
  - *Caracterización del ruido. Medida unificada de bondad (UMG)*
  - *Transformación RGB – XYZ*
- Descripción de los dispositivos de captación analizados

- *Cámara 3CCD*
- *Cámara fotográfica de sensor multicapa*
- Caracterización experimental de las cámaras
  - *Cámara 3CCD*
  - *Cámara fotográfica Sigma SD-9 con sensor multicapa*
- Medida del color mediante cámara
  - *Condiciones de captación*
  - *Elaboración del test*
  - *Medida (absoluta) del color mediante la cámara 3CCD*

### **Medida de la diferencia de color entre muestras uniformes mediante cámara.**

- Precisión de la medida, tolerancia instrumental y discrepancia con el espectrorradiómetro
- Diferencias entre muestras de colores pálidos y oscuros mediante cámara 3CCD
- Diferencias entre muestras de colores pálidos mediante cámara de sensor multicapa
- Otras consideraciones sobre tolerancias: comparación con la repetitividad de las muestras Munsell
  - *Diseño del experimento*
  - *Resultados*
- Aplicación a las pruebas de igualación en la producción textil

### **Realce de imagen inspirado en los modelos de visión del color**

- Diferencia de color entre imágenes espacialmente variantes (S-CIELAB)
  - *Filtrado espacial en el espacio de canales oponentes*
- Operador de realce
- Experimentos diseñados y resultados obtenidos
- Aplicaciones
  - *Análisis de una serie de imágenes estándar utilizadas en optometría clínica*
  - *Pruebas de homogeneidad de color en muestras textiles centro-orillo*

### **Aplicación al análisis de imagen oftálmica relacionada con el glaucoma**

- Las técnicas de imagen en el diagnóstico y seguimiento del glaucoma
  - *Relación disco-excavación y otros parámetros de la papila*
- Adquisición de la imagen digital de la papila mediante el retinógrafo
- Preprocesado. Realce de contornos mediante el operador *LoG-visión*
- Algoritmo para la segmentación del anillo neuroretiniano
- Algoritmo para la segmentación de la excavación
- Resultados. Análisis comparativo con la apreciación visual

### **Conclusiones**

#### *Esquema 1.1 - Composición temática de la tesis*

Esta tesis se presenta en la modalidad de compendio de publicaciones. En este contexto, el esquema mostrado (Esquema 1.1) ayuda a presentar de forma sintética la organización del trabajo y se utiliza como referencia en el inicio de los capítulos del resumen (Parte II de la memoria). En ellos se incluyen asimismo referencias a las publicaciones más relevantes del compendio relacionadas con el tema tratado en cada capítulo. Finalmente, en la Parte III de la memoria se anexa una lista de las publicaciones que constituyen el compendio y una selección con la copia impresa en papel de las más relevantes. La copia de todas las publicaciones del compendio se anexa en formato electrónico (disco compacto).