

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y SISTEMAS



TESIS DOCTORAL

**PROCESOS DE COMPUTACIÓN DEL COLOR EN LA RETINA:
DESARROLLO DE MODELOS. TEORÍA RETINAL Y SIMULACIÓN.
IMPLICACIONES EN SISTEMAS ARTIFICIALES**

MANUEL GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Las Palmas de Gran Canaria, 1987

DON ROBERTO MORENO DIAZ, CATEDRATICO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACION E INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CANARIAS,

CERTIFICA: Que la memoria titulada "PROCESOS DE COMPUTACION DEL COLOR EN LA RETINA", ha sido realizada por D. Manuel González Rodríguez bajo mi dirección en el Departamento de Informática y Sistemas de la Universidad Politécnica de Canarias. Esta memoria constituye la tesis que presenta para optar al grado de Doctor en Informática.

Las Palmas, a uno de Junio de mil novecientos ochenta y siete.

Vº Bº

EL DIRECTOR DEL DPTO. DE
INFORMATICA Y SISTEMAS,

EL DIRECTOR DE
LA TESIS,

Octavio Santana Suárez.

Roberto Moreno Díaz.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CANARIAS

FACULTAD DE INFORMATICA

DEPARTAMENTO DE INFORMATICA Y SISTEMAS

TESIS DOCTORAL

PROCESOS DE COMPUTACION DEL COLOR EN LA RETINA

DESARROLLO DE MODELOS, TEORIA RETINAL Y SIMULACION.

IMPLICACIONES EN SISTEMAS ARTIFICIALES

Autor: Manuel González Rodríguez

Director: Roberto Moreno Díaz

Marzo 1987

AGRADECIMIENTOS

Esta Memoria no habría sido posible sin la ayuda y colaboración del Dr. Roberto Moreno Díaz a quién estoy profundamente agradecido por su magisterio y por el apoyo y confianza depositados en mí.

Agradezco la colaboración y ayuda de todos los miembros del Departamento de Informática y Sistemas, así como a los del Departamento de Cibernética del C.U. de Las Palmas. En fin a todos aquellos quede una forma u otra han hecho posible este trabajo.

PROCESOS DE COMPUTACION DEL COLOR EN LA RETINA

Desarrollo de Modelos, Teoría Retinal y Simulación.
Implicaciones en Sistemas Artificiales

INDICE GENERAL

0. INTRODUCCION

| | | |
|-----|---|----|
| 0.1 | Antecedentes en Biocibernética y Visión Artificial en Las Palmas..... | 1 |
| 0.2 | Resumen de Objetivos..... | 12 |

I. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO NEURONAL DEL COLOR

| | | |
|---------|---|----|
| 1.1 | Teorías Perceptuales de la Visión en Color..... | 20 |
| 1.1.1 | Introducción..... | 20 |
| 1.1.2 | Espacio Perceptual del Color..... | 24 |
| 1.1.2.1 | Zona de Helmholtz..... | 24 |
| 1.1.2.2 | Zona de Hering..... | 27 |
| 1.1.3 | Transformación Fisiológica..... | 32 |
| 1.2 | Modelos de Visión en Color..... | 36 |
| 1.2.1 | Introducción..... | 36 |
| 1.2.2 | Modelos de Elementos de Línea..... | 37 |
| 1.2.3 | Modelos Color-Oponentes..... | 39 |
| 1.2.4 | Modelos de Mecanismos de Conos..... | 42 |
| 1.2.5 | Modelos de Células-X L/M Oponentes..... | 43 |
| 1.2.5 | Modelos Retinex..... | 46 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 1.3 | Vias Cromáticas en la Retina..... | 48 |
| 1.3.1 | Estructura de la Retina..... | 48 |
| 1.3.2 | Morfología de la Retina para Vertebrados Superiores e Inferiores..... | 51 |
| 1.3.2.1 | Diferencias entre las Retinas de los Vertebrados Superiores e Inferiores.... | 53 |
| 1.3.3 | Canal Anatómico de Cono-Bastón-Bipolar- Ganglionar..... | 55 |
| 1.3.4 | Vias para Procesamiento del Color en la Retina de los Vertebrados Inferiores..... | 57 |
| 1.3.5 | Procesamiento del Color en la Capa Plexiforme Interna y Externa..... | 59 |
| 1.3.6 | Canales Retinales para la Visión en Color en los Vertebrados Superiores..... | 61 |
| 1.3.6.1 | El Mecanismo de Conos..... | 64 |
| 1.3.6.1.1 | Sistema de Conos Azules..... | 64 |
| 1.3.6.1.2 | Sistema de Conos Mid-Espectral... | 65 |
| 1.3.6.1.3 | Sistema de Células Fásicas..... | 66 |
| 1.3.6.1.4 | Sistema de Células Tónicas..... | 67 |
| 1.3.7 | Canales de Luminancia y Color en la Retina de los Primates..... | 70 |

II ESTRUCTURA Y COMPUTACION RETINAL DE LOS PROCESOS CROMATICOS EN LOS DISTINTOS VERTEBADOS

| | | |
|---------|---|-----|
| 2.1 | Características Generales de la Codificación del Color..... | 77 |
| 2.1.1 | Clasificación de las células codificadoras de color..... | 77 |
| 2.2 | Células Codificadoras de Color en Peces..... | 88 |
| 2.2.1 | Introducción..... | 88 |
| 2.2.2 | Codificación a nivel de Salida..... | 90 |
| 2.3 | Células Codificadoras de Color en Anfibios..... | 95 |
| 2.3.1 | Aspectos Generales..... | 95 |
| 2.3.2 | Codificación a nivel de entrada..... | 95 |
| 2.3.3 | Codificación a nivel de salida..... | 99 |
| 2.4 | Células Codificadoras de Color en las Aves..... | 103 |
| 2.4.1 | Aspectos generales..... | 103 |
| 2.4.2 | Capa de Entrada. Fotorreceptores..... | 104 |
| 2.4.3 | Capa de Salida: Células ganglionares..... | 108 |
| 2.4.3.1 | Ganglionares Sensibles al Movimiento.. | 108 |
| 2.4.3.2 | Ganglionares Codificadoras de Color... | 108 |
| 2.4.3.3 | Ganglionares Detectoras de Oscuridad.. | 109 |
| 2.4.3.4 | Ganglionares Detectoras de Luminosidad. | 109 |
| 2.4.3.5 | Ganglionares Detectoras de Contrastes. | 110 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.5 | Celulas Codificadoras de Color en Primates..... | 111 |
| 2.5.1 | Introduccion..... | 111 |
| 2.5.2 | Células Ganglionares Codificadoras de Color..... | 112 |

III PROCESOS INSPIRADOS EN TECNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.1 | Segmentación y clusterización..... | 127 |
| 3.1.0 | Introducción..... | 127 |
| 3.1.1 | Detección de Regiones..... | 130 |
| 3.1.2 | Segmentación basada en el Espacio de propiedades..... | 131 |
| 3.1.3 | Clustering en Espacios Cromáticos..... | 132 |
| 3.1.4 | Transformaciones Cromáticas..... | 136 |
| 3.1.5 | Algoritmo de las K-Medias..... | 143 |
| 3.1.6 | Clusterización en el Espacio de Color..... | 146 |
| 3.2 | Algoritmo de Interacción Lateral en Espacios de Color..... | 151 |
| 3.2.0 | Introducción..... | 151 |
| 3.2.1 | Procesos de Inhibición Lateral..... | 152 |
| 3.2.2 | Estructura Teorica..... | 157 |
| 3.2.3 | Simulación..... | 161 |
| 3.3 | Detectores Cromáticos..... | 163 |
| 3.4 | Implicaciones en Sistemas Artificiales..... | 171 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 3.4.1 | El Problema de la Percepción Robótica..... | 171 |
| 3.4.1.1 | Categorías Funcionales Robóticas..... | 174 |
| 3.4.1.1.1 | Percepción Sensorial..... | 175 |
| 3.4.1.2 | Visión en Robots..... | 180 |
| 3.4.1.3 | Integración del Sistema Visual en un Sistema Artificial..... | 183 |
| 3.4.1.3.1 | Introducción..... | 183 |
| 3.4.1.3.2 | Robótica Visual Integrada.... | 184 |
| 3.4.2 | Modelo General para el uso de la Información Cromática en un Sistema Artificial..... | 189 |

IV MODELOS DE CODIFICACION RETINAL. (TEORIA RETINAL)

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1 | Formulación General..... | 199 |
| 4.1.1 | Objetivos..... | 199 |
| 4.1.2 | Hipótesis básicas..... | 201 |
| 4.1.3 | Formulación..... | 203 |
| 4.2 | Codificación Espacio-Cromática: Modelo Estático..... | 210 |
| 4.2.1 | Modelo Teórico..... | 210 |
| 4.2.2 | Simulación..... | 213 |
| 4.2.3 | Interpretación de Resultados..... | 219 |
| 4.3 | Codificación Espacio-Tiempo-Color: Modelo Dinámico.... | 225 |
| 4.3.1 | Modelo Teórico..... | 225 |
| 4.3.2 | Computación en la C. P. I. : Modelo General.... | 231 |
| 4.3.2.1 | Procesamiento no-lineal..... | 235 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.3.2.2 | Proceso lineal..... | 238 |
| 4.3.3 | Simulación..... | 239 |
| V | CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES. | |
| | Conclusiones y Principales Aportaciones..... | 244 |
| VI | REFERENCIAS | |
| | Referencias..... | 249 |
| VII | APENDICES. | |

0 INTRODUCCION

0

0.1 Antecedentes en Biocibernética y Visión Artificial en Las Palmas

Esta Memoria se enmarca plenamente en la Cibernética y en el área de Inteligencia Artificial., aportando conclusiones al estudio interpretativo de los mecanismos del funcionamiento visual, en lo referido al aspecto cromático, en los vertebrados, mediante modelos con ordenador de los procesos de datos retinales, codificación y transmisión de la señal y concretamente, de las distintas células ganglionares codificadoras de color.

Una primera línea de estudio de la Cibernética considera a los elementos neuronales a través de versiones muy simplificadas que permiten su manipulación como bloques lógicos de funciones definidas. Esta línea parte del concepto de neurona formal de Mc.Culloch y Pitts y es desarrollada en España por García Santesmases y Moreno-Díaz.

Otra línea de estudio prescinde del abstracto formalismo anterior y trata de ajustarse con mayor detalle a las características anatómicas y fisiológicas de la región del sistema nervioso a modelar. En este caso la relación con la neurofisiología debe ser muy estrecha.

Las investigaciones en esta segunda línea de trabajo se

han centrado en algunas regiones especialmente atractivas por la elevada capacidad de las funciones que realizan. La Cibernética de estos temas ha sido iniciada en España por Moreno-Díaz y varios de sus colaboradores.

Inicialmente el equipo investigador constituía el Grupo interfacultativo de Cibernética y Sistemas de Las Palmas, evolucionando hasta el Departamento de Informática y Sistemas actual.

El equipo investigador reunía miembros de la E.T.S. de Ingenieros Industriales, E.U. de Informática y Colegio Universitario de Las Palmas y fué establecido en 1977. Asimismo, tenía miembros a efectos de investigaciones concretas, del Departamento de Física de la Universidad de La Laguna. Moreno-Díaz ha estado implicado en proyectos de investigación sobre procesos de datos visuales desde el año 1965, cuando formaba parte del staff del Sensory Decision and Control Group, del Instituto Tecnológico de Massachussetts. Allí desarrolló modelos teóricos de la retina y esquemas de proceso visual para sistemas robóticos, dentro de un contrato con la NASA. En 1967, orientó la primera tesis doctoral realizada en España en procesos de datos visuales en la retina, presentada por Francisco Rubio-Royo (1969) en Madrid. Desde 1968, ha estado trabajando en Teoría de Redes Neuronales y Proceso de Datos Visuales en España.

En esta primera etapa las realizaciones del equipo investigador en Las Palmas incluyen:

a) Tesis doctoral de O. Santana (1979), que desarrolló una familia de lenguajes de ordenador para la realización de modelos retinales, con aplicaciones concretas en el espacio temporal lineal y no lineal.

b) Tesis doctoral de E. Rubio (1979). Sus trabajos versaron sobre funciones teóricas, en la estructura por capas, del proceso visual.

c) Tesis doctoral de A. Núñez (1981). Realizó la unificación de conceptos en la elaboración y transmisión de datos visuales en la retina.

d) Tesis doctoral de A. Falcón (1983), basada en el proceso y extracción de propiedades cromáticas en formas visuales.

e) Tesis doctoral de J. Méndez (1983). Trata de la obtención de descriptores invariantes del tipo Fourier-Bessel para el reconocimiento.

f) Tesis doctoral de F. Hernández (1983). Este desarrolló el tema de la síntesis de autómatas probabilísticos arbitrarios por medio de redes neuronales.

En lo que respecta a sistemas experimentales, una de las primeras cadenas cámara TV-computador operativas en España fué realizada en Las Palmas, por nuestro grupo de

investigación, en 1978, donde una cámara de TV standard accedía, a través de un digitalizador direccionable y controlado, a un sistema de UP's. Desde hace unos cinco años, este tipo de cadena cámara-computador está disponible comercialmente con alto grado de sofisticación que entonces parecía difícilmente alcanzable. Los sistemas utilizados actualmente en el grupo de investigación de Las Palmas ha servido y se usan tanto para ensayar algoritmos y procedimientos heurísticos de procesos de imágenes y reconocimiento de formas como para verificar hipótesis acerca de las operaciones espacio-temporales en la retina.

Los programas de adquisición y preproceso desarrollados y disponibles pueden ser resumidos en los siguientes:

a) Programas para imágenes almacenadas en fichero entre tonos de grises, 0 (blanco) y 255 (negro), escalados automáticamente, o con una regla adicional.

b) Programas para impresora en blanco y negro entre 0-36 niveles.

c) Programas de impresión en color, para codificación de zonas en BN, o para la generación de los colores en imágenes cromáticas.

d) Programas de cálculo de histogramas e impresión de los mismos.

e) Programas de adquisición de zonas determinadas del campo visual.

f) Programas de transmisión de datos entre los

distintos subsistemas.

g) Programas de preproceso con umbralizado manual o automático basado en los histogramas.

h) Programas de generación automática de umbrales, por aproximaciones, gaussiana o cuártica, de la distribución del histograma.

i) Programas de umbralización bidimensional, para la eliminación de gradientes de iluminación de la escena inicial.

j) Programas de convolución con filtros espaciales paso-alto, paso-bajo y paso-banda.

k) Programas de reducción de niveles de grises.

l) Programas de seguimiento de contornos, con determinación de posición y otros parámetros sencillos de los clusters visuales.

m) Programas de generación de clusters cromáticos.

n) Programas de display de imágenes en color y blanco y negro.

o) Programas de reconstrucción de imágenes en color, a partir de las componentes cromáticas de la misma.

El grupo de investigación, asimismo, ha desarrollado y experimentado una serie de técnicas de manejo y reconocimiento de formas a partir de datos visuales reales, estas son:

1) Reconocimiento por Convolución

El procedimiento de reconocimiento por convolución, consta de tres pasos:

1. - Aislamiento del objeto de interés por el computador.
2. - Definición del mismo en términos de descriptores utilizables en su reconocimiento.
3. - Identificación del objeto en nuevas circunstancias, proporcionando sus coordenadas de situación espacial.

2) Aislamiento de un Objeto.

El aislamiento de un objeto se realiza por el computador calculando sistemáticamente la diferencia entre dos imágenes preprocesadas y umbralizadas. De aquí, se define una máscara del tipo centro-excitador periferia-inhibidora, con la que se realiza una convolución sobre las nuevas imágenes procesadas en las que se desea identificar al objeto. El método proporciona, por consiguiente, una forma general para "introducir" objetos problema dentro del computador, haciendo abstracción del fondo de la imagen.

3) Reconocimiento de Universales.

Un concepto central en el reconocimiento de universales es el de la realización de un conjunto de transformaciones que reducen una imagen a su forma

standard o convencional. Suponiendo que un objeto problema ha sido aislado en la imagen, el primer paso en la estandarización es trasladar el origen de coordenadas al centro de gravedad del clúster; el siguiente, girar el sistema de referencia; y el último, transformar homotéticamente el clúster.

4) Momentos Generalizados

Se ha realizado un estudio detallado de la historia y evolución de la teoría y aplicaciones de los momentos generalizados en su expresión tensorial, dedicando especial atención a:

a) Obtención de métodos efectivos de cómputo de los momentos de orden alto.

b) Desarrollo de criterios heurísticos para la selección de los momentos óptimos como descriptores de propiedades de los objetos en tareas de reconocimiento.

c) Nuevos métodos de generación de invariantes.

5) Generación de Descriptores Integrales

Se ha realizado un estudio comparativo de la eficacia de los distintos métodos convencionales para la generación de descriptores integrales y se ha llegado a la conclusión teórico-práctica del poder considerable que tienen las transformaciones espaciales con núcleos basados en funciones de Bessel de dos dimensiones.

El proceso en la obtención de descriptores de un objeto

parte de la reducción del campo visual en un entorno del mismo y del campo frecuencial o ancho de banda. Por conveniencia de simetrías e invariancias ante rotaciones, dicha zona es un círculo. Los descriptores son el resultado de operaciones integrales con un conjunto de núcleos de Bessel ortogonales en coordenadas polares en el plano de frecuencias, para los que se deducen las reglas de generación. A diferencia de los procesos típicos espacio-temporales, en este caso no se realiza una convolución sobre la imagen.

6) Semejanza e Invarianza de Patrones Visuales

Este trabajo se ha completado con otros de naturaleza eminentemente teórica sobre nuevos enfoques en los conceptos de semejanza y distancia entre los patrones visuales y los de invarianza y reducción de dichos patrones a su forma standard.

7) Procesos Cromáticos de Imágenes.

La búsqueda un esquema funcional para explicar la codificación del color en las células ganglionares de la retina de los vertebrados ha llevado al establecimiento de entradas visuales cromáticas en el computador, con las cuales experimentar los distintos modelos retinales. Los procesos cromáticos de más interés tanto teórico como práctico, son aquellos en los que existe una interacción espacial, y estos sólo pueden investigarse

en modelos de complejidad tal que requieren su simulación en ordenador.

8) Aplicaciones Robóticas.

Para aplicaciones robóticas, se han desarrollado metodologías de proceso y análisis previo de propiedades cromáticas, según los distintos factores cromáticos de la imagen. Asimismo, se han desarrollado técnicas de segmentación policroma y reconocimiento de colores.

9) Obtención de descriptores por expansión ortonormal.

Se han desarrollado técnicas para la obtención de descriptores por expansión ortonormal de imágenes, desarrollando métodos de selección de los mismos, así como procedimientos eficaces para determinar la orientación de piezas.

10) Caracterización y Segmentación por Reconocimiento de Texturas.

Se están desarrollando procedimientos de caracterización y segmentación en imágenes a través del reconocimiento de texturas en la imagen y la aplicación de transformaciones integrales múltiples, inspiradas en las que se usan en codificación para la comunicación. Estos

trabajos se complementan con otros sobre el estudio de los árboles óptimos de decisión para la clasificación y la generación estadística de descriptores.

11) Reconocimiento Visual en 3-D.

Se ha trabajado en la generación de un espacio de representación 3-D transformado, donde los ejes no representan las coordenadas espaciales, sino la de los correspondientes descriptores obtenidos por expansión ortogonal de distintas vías bidimensionales, para reconocimiento en 3-D. Asimismo, se ha atacado el problema de la representación de objetos en 3-D y se ha desarrollado un esquema general del reconocimiento visual utilizando información multimodal.

12) Integración Multisensorial y Transformaciones Intersensoriales.

En integración multisensorial y transformaciones multisensoriales se han introducido varios conceptos que son desarrollados en colaboración con el Departamento de Electrónica de la Universidad de Santiago. La integración se plantea como un proceso de generación de síntomas locales a partir de los datos multisensoriales sometidos a un grado de procesamiento variable, seguido de una identificación o diagnóstico. El concepto de transformaciones intersensoriales surgió del estudio de prótesis generalizadas, y se refiere a

las transformaciones entre espacios de propiedades de dos modalidades sensoriales distintas, para reconocimiento de una modalidad por otra y para tomar decisiones usando información multisensorial.

13) Percepción Auditiva.

Recientemente ha sido abierta, en colaboración con el Departamento de Electrónica de la Universidad de Santiago, una línea de investigación en el campo de la Percepción Auditiva, en el que se propone explicar la percepción de invariantes auditivos y elaborar un modelo neuronal computacional que lo realice. El trabajo en esta línea ayudará, además, a profundizar en una modalidad sensorial, distinta de la visual, como es la auditiva, lo cual facilitará las investigaciones en el campo de las transformaciones intersensoriales usando las modalidades sensoriales anteriormente citadas.

0.2 Introducción-Resumen.

En el capítulo I se analizan algunos aspectos del proceso neuronal del color. Primeramente hacemos un estudio del color a nivel perceptual, ya que es en este estadio donde realmente discriminamos, con un aceptable grado de precisión, todos los datos que nos llegan a través de los sensores.

Comenzamos realizando una revisión metodológica de las distintas teorías perceptuales del color, desde la de "Young-Helmholtz" hasta la de "Color Oponente de Hering". En esta parte también se estudia el espacio perceptual del color, tratando las transformaciones fisiológicas dadas por Massof y Bird, para pasar de la Zona de Sensaciones o de Helmholtz, a la de Percepción o de Hering. La Zona de Hering es descrita por Guth como un espacio tridimensional cartesiano donde un color viene representado por un vector.

En la segunda parte de este capítulo se hace una revisión de los diversos modelos de visión en color clasificados en distintas categorías, tales como Modelos de Elementos de Línea, Modelos Color-Oponente, Modelos de Células-X/L/M-Oponentes, etc; pero todos ellos bajo una clasificación general de modelos locales, globales y dinámicos.

Se parte de los primeros modelos locales de Elemento de Línea, donde la discriminación del color era determinada por la independencia de los tres mecanismos de conos, pasando por los modelos Color-Oponentes que se basan en una transferencia de los tres mecanismos de conos a tres canales neurofisiológicos, hasta llegar a los modelos Retinex. En estos últimos sus autores proponen una teoría sobre la visión en color basada en supuestos acerca del mundo físico. En el último apartado de este capítulo, se hace un estudio de los canales cromáticos en la retina.

El diferente grado de extracción de propiedades de la imagen visual a nivel retinal, de acuerdo con el grado de desarrollo del sistema nervioso en las diferentes especies de los vertebrados, hace necesario un estudio de la estructura neurofisiológica de la retina que constituyen el marco adecuado para la formulación de la teoría retinal del color.

Se hace un estudio simplificado de las diferencias, tanto anatómicas como neurofisiológicas, entre las retinas de los vertebrados inferiores, los cuales poseen unos sistemas muy especializados, sobre todo en la visión en color, y los vertebrados superiores. Basándonos en lo expuesto se propone un circuito para el procesamiento del color en los vertebrados inferiores.

haciendo especial hincapié en que algunas partes del mismo podrían aplicarse a todos los vertebrados inferiores, mientras que otras son específicas de algunas especies.

El procesamiento del color en los vertebrados superiores está hecho sobre estudios neurofisiológicos de la retina del mono y en base a dos grandes sistemas de conos. El Sistema Azul, converge en un número muy pequeño de células ganglionares, tiene incidencia en la codificación del color en la retina, pero no juega un papel fundamental en el mismo. El Sistema Mid-Spectral, está a su vez dividido en dos grandes subsistemas, el fásico y el tónico. Aunque los dos intervienen en la codificación del color, el sistema tónico es el que muestra una oponencia al color por excelencia. Por último se hace un estudio de los canales de luminancia y color en la retina, donde se hace notar la importancia de las células horizontales en los canales de color.

En el capítulo II se estudian las características generales de la codificación del color. Los campos receptivos retinales, estudiados en un número considerable de especies, pueden clasificarse en dos grandes grupos. Aquellos que son selectivos para alguna característica espacial, temporal o cromática del estímulo, y aquellos que no son selectivos.

La mayor especificidad y eficiencia en la forma de codificar la información no está correlacionada, o lo está negativamente, con una buena discriminación de formas, la cual está mucho más desarrollada en los vertebrados superiores, que en los inferiores.

En los vertebrados superiores la corteza visual está altamente desarrollada. Este hecho implica que las células codificadoras doble oponente solamente se encuentran, en estos vertebrados, en los centros superiores del camino visual, o sea, a nivel núcleo geniculado y corteza visual, mientras que en los vertebrados inferiores se hallan a nivel de células ganglionares. Basándose en estos supuestos se hace una clasificación de las células codificadoras de color. Estas se estudian en especies que cubren un amplio margen desde los vertebrados inferiores hasta los superiores, estudiando las mismas sólo a nivel de salida. El tratamiento es más exhaustivo en los primates debido a que muchos autores suponen que la visión humana, sino es igual, se acerca bastante a la de los mismos.

En el capítulo III se desarrollan distintos procesos cromáticos inspirados en técnicas de Inteligencia Artificial. Las distintas componentes de color de una imagen, R, G, B, Y, motivan la creación de un espacio de color tridimensional. En este espacio cada punto P de la imagen tiene asociado, además del correspondiente par de

coordenadas espaciales x, y , otro conjunto de tres coordenadas, $Y, B-Y, R-Y$.

Se realizan operaciones en dos espacios, el espacial o restrictivo (x, y) y el cromático o descriptivo ($Y, B-Y, R-Y$) donde pueden efectuarse transformaciones de manera tal, que se acentúan determinadas características de la imagen o segmentos de la misma. En estos dos espacios se pueden realizar operaciones de segmentación escalonada que facilitan la separación de las distintas partes o segmentos de la imagen y dentro de éstas la extracción de características de la misma. Para ello hemos utilizado procedimientos reiterativos del tipo ISODATA, en el espacio cromático.

En la segunda parte de este capítulo se aplican los Algoritmos de Interacción Lateral (ALI) en espacios de color.

La interacción lateral algorítmica es interpretada como un proceso de alto nivel que tiene lugar entre unidades computacionales que forman una capa (computación en paralelo) teniendo su aplicación potencial tanto en la formulación de procesos en redes neuronales como en sistemas artificiales de visión.

En su formulación más sencilla se considera que las unidades computacionales reciben información de un mosaico bidimensional (espacio de entradas) dividido en

Centro y Periferia. La estructura computacional es una capa de módulos idénticos distribuida en dos dimensiones. Esta capa computacional recibe información de un espacio de entradas, que consiste en una capa de datos y un espacio de salidas formada, también, por una simple capa de datos.

Los procesos algorítmicos separados son ejecutados en ambas regiones, central y periférica, y la salida de la unidad computacional puede ser el resultado de una regla de decisión sobre aquellas.

Los procesos ALI en los espacios de color suministran un simple y natural camino para formular los procesos codificadores de color en prácticamente todas las células codificadoras de color del camino visual.

En la tercera parte del capítulo se estudian los detectores de bordes en espacios de color.

El contorno en una imagen cromática se puede definir como aquella zona de la imagen en la que se ha producido un cambio sustancial en algunos de los valores cromáticos que la definen.

La aplicación de los operadores más clásicos en la detección de bordes, en los espacios de color, muestra la sencillez y elegancia con que se obtienen resultados de contraste cromático.

En el último apartado de este capítulo se presenta una estructura para el uso de la información cromática en percepción artificial. En el mismo se propone un modelo general para el uso de la información cromática en un sistema artificial.

Una vez descritas las bases neurofisiológicas del color, se pasa, en el capítulo IV, a mostrar el soporte teórico del modelo generalizado del color, desde el modelo espacio-cromático hasta el modelo espacio-temporal-cromático. La característica común a los distintos modelos realizados es suponer la linealidad del sistema, o bien suponer no linealidades para explicar propiedades cromáticas concretas.

El modelo espacio-cromático que sirve de marco para la simulación de las propiedades cromáticas de las células retinales observadas en los vertebrados. La formulación correspondiente está hecha para las operaciones más sencillas de interacción en el espacio-color. Los resultados obtenidos utilizando núcleos de proceso relativamente locales proporcionan datos muy interesantes, que caen dentro de la producción de ilusiones cromáticas, a partir de imágenes sin contrastes espaciales en color. Estos contrastes son obtenidos usando núcleos del tipo ON-OFF cromáticos.

Al ser el sistema visual un sistema cuyas entradas son imágenes o escenas variables en el tiempo, es preciso

utilizar herramientas no comunes en Teoría de Sistemas, siendo las operaciones que se realizan no lineales y muy variadas.

Por último, este capítulo desarrolla el modelo generalizado, donde se supone una Capa de Preproceso que se extiende desde los fotorreceptores hasta los procesos terminales de las células bipolares en la capa plexiforme externa. En dicha capa las células horizontales realizan una traslación isotrópica de la información, proporcionando dos versiones locales de una señal cromática, una rápida y otra retardada, que corresponden a dos mecanismos neurofisiológicos. Sobre dichas señales actúa un mecanismo de interacción presináptica de aferentes en la capa plexiforme interna, donde las mismas experimentan interacciones no lineales. Esta interacción lateral no lineal podría estar descompuesta en una inhibición lateral lineal más una rectificación local de media onda. El resultado son dos posibles situaciones: a) La inhibición de la señal retardada por la rápida. b) La inhibición de la señal rápida por la retardada.

La rectificación local en media onda genera señales que alcanzan las células ganglionares donde son sumadas y pesadas para cada canal de color.

Por último, presentamos las conclusiones y principales aportaciones de la memoria.

I ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO NEURONAL DEL COLOR

1.1. -TEORIAS PERCEPTUALES DE LA VISION EN COLOR.

1.1.1. - Introducción

El número magico en la visión humana normal de los colores es tres, como veremos en las distintas teorías que expondremos, siendo el primer proponente de ello Thomas Young (1773-1829).

La teoría de Young consiste en una interpretación fisiológica de la trivariancia visual. Young supone que esta es retiniana, al contrario que Mariotte et al (s. XVII), que la explicaban suponiendo tres tipos de de partículas de luz. La hipótesis de Young afirma la existencia de tres colores principales y que cada filamento sensible del nervio optico esta dividido en tres porciones, una para cada color principal. Siendo estos tres colores principales: el rojo, el verde y el violeta.

Helmholtz no apoyó esta teoría ya que afirmaba que una explicación de la visión en color, necesitaba la postulación de más de tres procesos primarios, al menos cuatro, hasta que observó que sus experimentos se podían realizar en base a los tres macanismos fundamentales, debido a un solapamiento en sus sensibilidades espectrales. Pasando a llamarse entonces "Teoría de Young-Helmholtz".

Estos tres receptores, G_1, G_2, G_3 , se caracterizan por su sensibilidad espectral, (g_1), siendo la respuesta del receptor (1), que recibe una radiación S_λ :

$$G_1 = \int g_1 S_\lambda d\lambda \quad (1.1)$$

La sensación de color es una función de tres respuestas (G_1), mientras que, por la ley de Abney, la sensación luminosa es función de una combinación lineal de tres respuestas:

$$l_1 G_1 + l_2 G_2 + l_3 G_3 \quad (1.2)$$

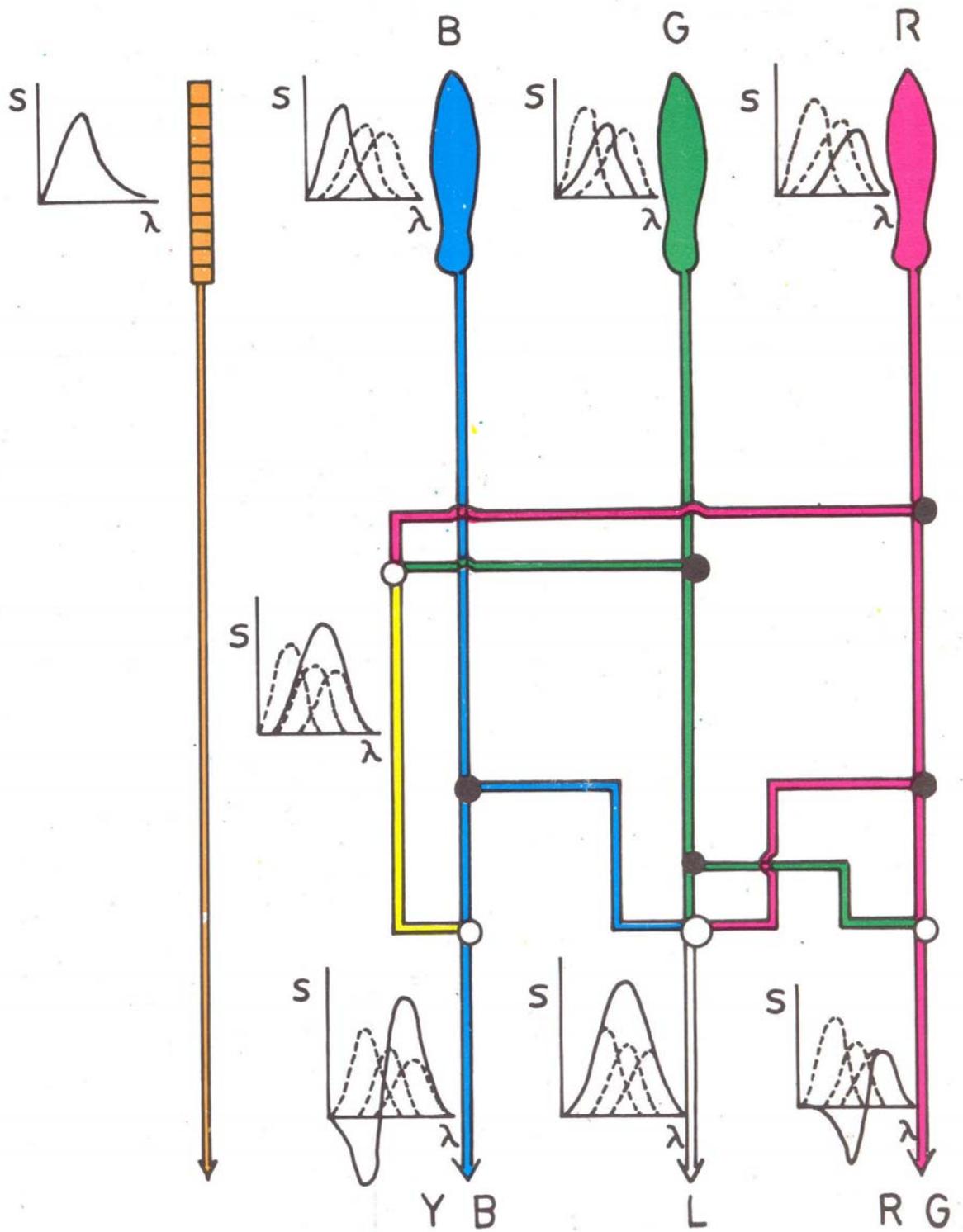
Las G_1 son las componentes tricromáticas, los g_1 los coeficientes de distribución y las l_1 las unidades luminosas. Este sistema debe pues deducirse del XYZ por transformaciones lineales:

$$\begin{aligned} g_1 &= a_{1x}X + a_{1y}Y + a_{1z}Z \\ g_2 &= a_{2x}X + a_{2y}Y + a_{2z}Z \\ g_3 &= a_{3x}X + a_{3y}Y + a_{3z}Z \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$l_1 g_1 + l_2 g_2 + l_3 g_3 = V_\lambda = Y \quad (1.4)$$

Donders (1880) llama "fundamentales" a los primarios G_1 . Otra de las teorías de la visión en color es la "Teoría Color Oponente de Hering". Se caracteriza por la existencia de las cinco sensaciones antes citadas, operando en oposición de pares, complementarios y

CODIFICACION DE COLOR Y LUMINANCIA EN LA RETINA



opuestos unos y otros.

La teoría policromática de Hartdrige (1947), asume que la teoría de Young-Helmholtz es solo una aproximación de la verdadera, ya que además de los tres receptores principales, había otros cuatro o cinco actuando en segundo orden. Esta, junto con la de Granit, en la que un receptor recibía la señal de luminancia y los otros la del color, no tuvo éxito. En realidad después de Hering se produjo un gap de casi cien años, hasta que hubo un mejor entendimiento de la visión en color. Es en este momento cuando aparecen las modernas teorías en las que se afirman que existen tres tipos de conos que absorben la luz en tres regiones diferentes del espectro, similarmente a lo mostrado en la fig 1.1, que son las correspondientes al rojo, verde y azul. Quedando plenamente confirmado por dos grupos americanos de investigación, los de Marks, Dobelle y MacNichol, que trabajaban en el goldfish, mono y retina humana, y por Brown y Wald que lo hacían sobre la retina humana.

Está, además, demostrado por el potencial receptor obtenido por Tomita en 1964. Las salidas de estos tres conos se codifican antes de llegar al cerebro, el proceso se muestra en la lamina n.º I

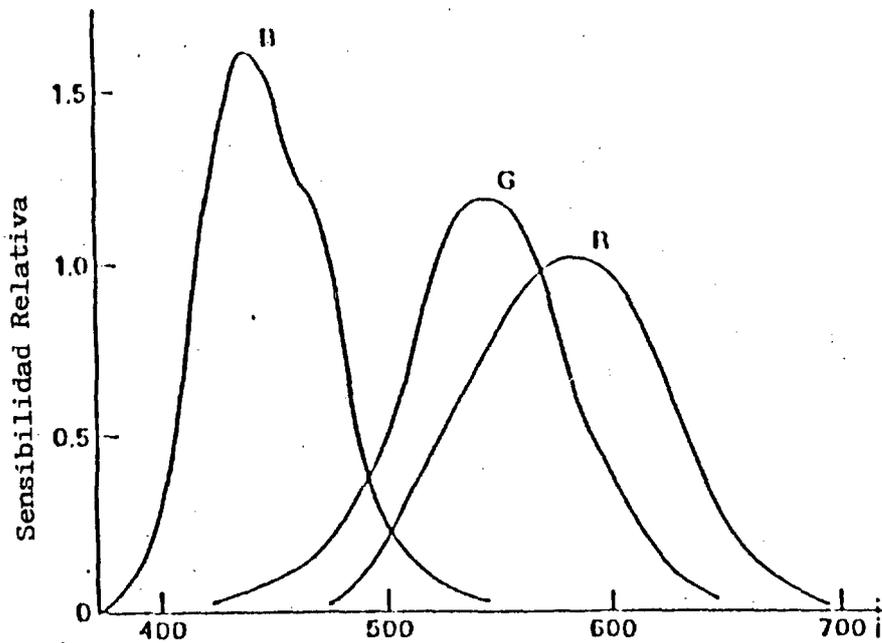


Fig 1.1. Respuestas espectrales de los tres primarios.

Luego las dos teorías, principales y validas, de la visión en color, son las de Young-Helmholtz y la de Hering. La primera a nivel de fotorreceptores y la segunda en la etapa posterior en la retina, despues de que la señal de los receptores ha sido codificada.

1.1.2. - Espacio perceptual del color.

En esta sección haremos una síntesis de los modelos de zona, dados por Massof et al. (1978), cuyo objetivo es expresar la interrelación que existe en el ser humano entre la zona de absorción del estímulo y la zona de la sensación visual.

Por tanto analizaremos el espacio perceptual del color con el estudio de la zona de Hering y el espacio físico del color con la de Helmholtz. Asimismo trataremos la codificación del espacio tricromático de los colores al perceptual mediante la transformación fisiológica, que nos ayuda a convertir los datos físicos en la zona de Helmholtz a datos de los sentidos en la de Hering.

1.1.2.1. - Zona de Helmholtz.

Los estímulos luminosos que inciden en el ojo, están definidos por la distribución espectral, temporal y espacial, del cuanto incidente, independientemente de su estado de polarización. Así el flujo radiante incidente en el pigmento visual viene especificado como la energía por unidad de tiempo del cuanto incidente, de longitud de onda comprendida entre λ y $\lambda+d\lambda$, en el tiempo t y con coordenadas retinales x, y (con el origen en el centro de la fovea):

$$P_{\lambda}(t, x, y) d\lambda \quad (1.5)$$

En efecto de la zona de Helmholtz es el de la absorción del cuanto incidente por el pigmento de los fotorreceptores. Estos, por la duplicidad retinal y el principio tricromático, son consideradas de cuatro clases; el sistema fotópico de conos (R, G, B) y el escotópico de bastones (S), con sensibilidades espectrales:

$$R_{\lambda}(t, x, y); G_{\lambda}(t, x, y); \beta_{\lambda}(t, x, y); V'_{\lambda}(t, x, y) \quad (1.6)$$

siendo R, G, B, transformaciones lineales de las mezclas de colores primarios por estimulación en el punto retinal x, y , convirtiéndose R, G, B en los receptores primarios para $x = y = 0$.

Por lo tanto, el efecto de la zona de Helmholtz es la transformación de la distribución espectral continua

P_{λ} , por vía de cuatro clases de absorción selectiva, en la excitación inicial de los fotorreceptores, esto es absorción de cuantos:

$$Q_R(x, y, t) = \int_0^{\infty} P_{\lambda}(x, y, t) R_{\lambda}(x, y, t) d_{\lambda} \quad (1.7)$$

$$Q_G(x, y, t) = \int_0^{\infty} P_{\lambda}(x, y, t) G_{\lambda}(x, y, t) d_{\lambda} \quad (1.8)$$

$$Q_B(x, y, t) = \int_0^{\infty} P_{\lambda}(x, y, t) B_{\lambda}(x, y, t) d_{\lambda} \quad (1.9)$$

$$Q_S(x, y, t) = \int_0^{\infty} P_{\lambda}(x, y, t) V'_{\lambda}(x, y, t) d_{\lambda} \quad (1.10)$$

La zona de Helmholtz será considerada con estos pasos como zona inicial de la acción de los fotorreceptores, como zona de "fotoabsorción".

Las siguientes acciones intrarreceptoras son reconocidas como parte de la totalidad de las operaciones fisiológicas que intervienen entre la fotoabsorción y la sensación visual. Luego la salida de la zona de Helmholtz podemos representarla por el vector de absorción cuántica, (Massof y Bird, 1978):

$$\vec{Q}(x, y, t) = [Q_R(x, y, t), Q_G(x, y, t), Q_B(x, y, t), Q_S(x, y, t)] \quad (1.11)$$

1. 1. 2. 1. -ZONA DE HERING.

La sensación visual corresponde a la zona de Hering.

Los bloques de construcción de la visión en el color y la luminancia, ya que la forma y localización pueden ser descritas por las variaciones espaciales en color y/o luminancia, y el cambio o movimiento por las variaciones temporales en color y/o luminancia. (Massof y Bird, 1978).

El color sabemos que viene especificado en términos de matiz, saturación y brillantez. De ellos, el matiz es el que nos ayuda a alcanzar la teoría color-oponente de Hering. El se refiere a la cantidad de rojo, verde, azul o amarillo que contiene la sensación.

Rojo y verde son sensaciones mutuamente excluyentes para un punto dado en el espacio y en el tiempo, como también lo son la azul y amarilla. Estos son los llamados "Pares color-oponente de Hering". En esta teoría las sensaciones de blanco y negro no se especifican como un par oponente, en contra de lo que muchos pensarían. El negro se califica como la sensación visual nula, por lo que toda sensación visual elemental puede ser considerada como convergente en el negro con intensidad decreciente o incremento de contraste. (Massof y Bird, 1978).

Como consecuencia de este análisis podemos describir la zona de Hering como un semiespacio tridimensional cartesiano. Descripción dada por Guth (1972). Obteniendo así un modelo vectorial para la percepción del color. [fig (1.2)].

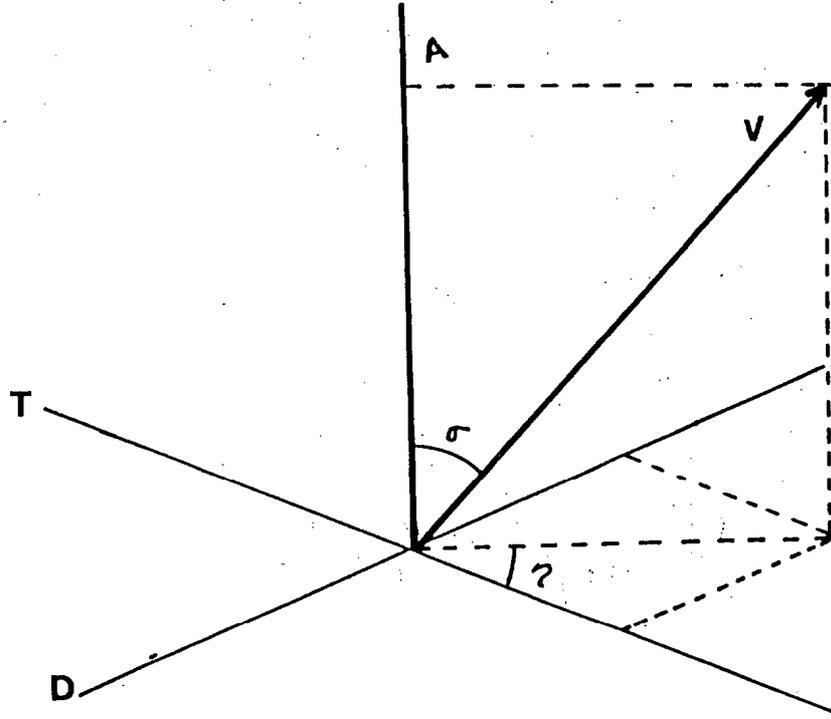


Fig 1.2. Representación geométrica de la sensación visual.

Estudiemos esta figura, utilizando la terminología de Guth.

Cada dimensión ortogonal se corresponde con una componente distinta de la sensación visual. Así, el eje tritanóptico o eje T corresponde al rojo para valores positivos y al verde para los negativos; el eje

deuteranóptico o eje D corresponde al azul para valores positivos y amarillo para valores negativos; y por último, el eje acromático o eje A, se corresponde con el blanco, estando la sensación del negro localizada en el origen del sistema.

La sensación visual viene definida, en este modelo, por el vector $V(V_A, V_T, V_D)$, de forma que el color está descrito por la dirección del vector V , la brillantez por el módulo del mismo:

$$|V| = \left[V_A^2 + V_T^2 + V_D^2 \right]^{1/2} \quad (1.12)$$

el matiz por el ángulo azimutal θ , y la saturación por el ángulo polar σ . Más generalmente, matiz, saturación y brillantez, son funciones de las componentes de la sensación visual.

Para completar este modelo añadimos a las componentes cartesianas A, T, D, que son funciones del espacio y el tiempo, una componente independiente y ortogonal, la sensación escotópica S' , sugerido por Bouman y Walraven (Bouman, et al, 1972). Luego, como hicimos notar al principio cuando hablamos de los pilares de la sensación visual, las variaciones espacio-temporales en A, T, D, (S'), asume la percepción de cambio y forma.

La zona de Hering es caracterizada por las dependencias espacio tiempo del vector sensación visual:

$$V(x', y', t') = \left[V_A(x', y', t') \cdot V_T(x', y', t') \cdot V_D(x', y', t') \cdot V_S(x', y', t') \right]$$

(1.13)

donde asumimos una única correspondencia entre las coordenadas espacio-tiempo en el nivel sensorial (t', x', y') y las coordenadas físicas espacio-tiempo (t, x, y) .

Estas magnitudes vectoriales las interpretó Guth como detectabilidad.

Luego, el espacio A, T, D, es considerado, además, como una representación geométrica de la detectabilidad de los estímulos.

Con un estímulo de fondo, fijo y uniforme, se genera la sensación media V_{S0} con fluctuaciones sensoriales.

Podemos considerar V_{S0} + os como una descripción de la distribución sensorial de ruido.

Si añadimos un test-flash detectamos un cambio en la sensación, ΔV_s , la cual puede considerarse como la señal añadida a la distribución de ruido. Para evitar complejidad consideraremos a las variables como gaussianas, y que la variación es la misma para el ruido que para la señal más el ruido, aunque esto no es necesario.

Con estas simplificaciones el resultado de la detectabilidad de cualquier componente sensorial es:

$$d's = \frac{(V_{so} + \Delta Vs) - V_{so}}{\sigma_s} \quad (1.14)$$

siendo $V_{so} + \Delta Vs$ la media de la señal más ruido, $d's$, la detectabilidad para la componente sensorial S, luego para A, T, D, tenemos:

$$d'A = \Delta V_A / \sigma_A$$

$$d'T = \Delta V_T / \sigma_T \quad (1.15)$$

$$d'D = \Delta V_D / \sigma_D$$

Aquí introducimos que las componentes A, T, D son estadísticamente independientes. Esto sería verdad si la principal fuente de variabilidad fuera fisiológica y las componentes sensoriales surgieran de las operaciones fisiológicas separadas. Entonces el conjunto de detectabilidades de un cambio en la sensación es:

$$d' = [(d'A)^2 + (d'T)^2 + (d'D)^2]^{1/2} \quad (1.16)$$

donde sustituyendo las detectabilidades de cada una de las componentes sensoriales A, T, D, según las ecuaciones (1.28), tenemos:

$$d' = \left[(\Delta V_A / \sigma_A)^2 + (\Delta V_T / \sigma_T)^2 + (\Delta V_D / \sigma_D)^2 \right]^{1/2} \quad (1.17)$$

Añadiéndole a estas consideraciones el que a $d' = \text{cte}$ nos da el modelo exacto de Guth.

Luego hemos visto que el modelo vectorial de Guth tiene raíces teóricas en la linealización y en la teoría de detección.

1.1.3. - Transformación fisiológica

La zona intermedia entre la de Helmholtz Q y la de Hering V, contiene todas las muchas y variadas transformaciones fisiológicas que intervienen entre la fotoabsorción y la sensación visual.

Esta transformación de los niveles de Helmholtz a los de Hering la identificaremos como un vector de operadores fisiológicos, complejo y no lineal, denotado por:

$$\vec{Q} \equiv (\vec{Q}_A, \vec{Q}_T, \vec{Q}_D, \vec{Q}_S) \quad (1.18)$$

donde cada operador componente representa la transformación de todo el cuanto de excitación en cada elemento de sensación visual.

Así la formulación general de esta transformación tiene la forma:

$$V(t', x', y') = \delta[Q(t, x, y)] \quad (1.19)$$

Esta ecuación se puede poner, en función de cada componente de V, prescindiendo de S', así:

$$\begin{aligned} V_A &= \delta_A(Q_R, Q_G, Q_B, Q_S) \\ V_T &= \delta_T(Q_R, Q_G, Q_B, Q_S) \\ V_D &= \delta_D(Q_R, Q_G, Q_B, Q_S) \end{aligned} \quad (1.20)$$

las cuales presentan un parecido con la formulación de Jameson para respuestas visuales.

Existen, no obstante entre ellas, dos diferencias formales. La primera es que Massof y Bird utilizan operadores en lugar de funciones ordinarias y la sensación visual depende durante toda la evolución espacio-temporal de las respuestas Q de Helmholtz. La segunda consiste en que no supone la excitación Q de Helmholtz, necesariamente, como una combinación lineal en el argumento de la ecuación (1.19).

El modelo vectorial de Guth, Hurvich y Jameson, como sabemos, son una transformación lineal de mezcla de colores primarios. Pero Guth no estaba satisfecho debido a varios fenómenos como:

- a) Efectos de super-aditividad.
- b) Cambio de matiz de Bezold-Brucke.
- c) Cambios dependientes de la intensidad, en la función de discriminación de la longitud de onda.

Todas estas observaciones, denominadas "experimentos de clase A" por Brindley, implican pequeñas diferencias en el cuanto de excitación y en la sensación visual, ΔQ , ΔV .

Teniendo en cuenta estas variaciones, la ecuación (1.32) se transforma en:

$$\Delta V(x', y', t') = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial Q} [\Delta Q(x, y, t)] \quad (1.21)$$

$$\Delta V(x', y', t') = \sum_1 \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial Q} [\Delta Q_1(x, y, t)] \quad (1.22)$$

Para $i=R, G, B, S$

Esta ecuación en forma matricial, suponiendo, claro esta, la linealidad de $\bar{\phi}$, que nos da directamente la existencia de $\partial \bar{\phi} / \partial Q$, es:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_T \\ \Delta V_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{\phi}_A}{\partial Q_R} & \frac{\partial \bar{\phi}_A}{\partial Q_G} & \frac{\partial \bar{\phi}_A}{\partial Q_B} & \frac{\partial \bar{\phi}_A}{\partial Q_S} \\ \frac{\partial \bar{\phi}_T}{\partial Q_R} & \frac{\partial \bar{\phi}_T}{\partial Q_G} & \frac{\partial \bar{\phi}_T}{\partial Q_B} & \frac{\partial \bar{\phi}_T}{\partial Q_S} \\ \frac{\partial \bar{\phi}_D}{\partial Q_R} & \frac{\partial \bar{\phi}_D}{\partial Q_G} & \frac{\partial \bar{\phi}_D}{\partial Q_B} & \frac{\partial \bar{\phi}_D}{\partial Q_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_R \\ \Delta Q_G \\ \Delta Q_B \\ \Delta Q_S \end{bmatrix}$$

donde cada elemento matricial, $\partial \bar{Q}_1 / \partial Q_j$, es un operador lineal que representa la transformación de una pequeña perturbación en la excitación del receptor j en un pequeño cambio de la componente i de la sensación.

Cuando Q en la ecuación (1.36) son variaciones espaciales o temporales, la matriz contiene operadores espacio-tiempo.

1.2. - MODELOS DE VISION EN COLOR

1.2.1. - Introducción

Los tradicionales modelos de la visión en color están basados en experimentos de combinaciones de color en las cuales un área fija es igualada a otra por elección apropiada de las tres luces espectrales. Por acuerdo internacional, los tres espectros estándares han sido adoptados de tal manera que una mezcla en cantidades predecibles de los mismos puede igualar solamente un color.

Los estudios neurofisiológicos de células simples en el sistema visual de los primates son un camino directo para comprender cómo funciona este proceso.

Las operaciones neuronales de la visión en color requieren, de algún modo, la comunicación entre neurofisiólogos y psicofísicos. En los últimos años se ha dado la formulación de modelos específicos que ha supuesto un notable progreso en este campo. Estos modelos son los llamados local, global y dinámico.

Los modelos locales intentan definir el color de un objeto por los parámetros físicos dentro de los confines del mismo.

Los modelos globales son aquellos en los cuales el color de un objeto depende de los parámetros físicos de

un objeto y también del fondo.

Los modelos dinámicos son aquellos en que los cambios de tiempo en las respuestas retinales del objeto con su fondo juegan un importante papel en la determinación del color.

1.2.2. -Modelos de Elemento de Línea.

Los modelos locales de visión en color comenzaron con Helmholtz (1886), para quien la discriminación del color era determinada por la independencia de las salidas de los tres mecanismos de conos que venían dada por la ley de Weber:

$$dC^2 = \left[\frac{dR}{R} \right]^2 + \left[\frac{dG}{G} \right]^2 + \left[\frac{dB}{B} \right]^2 \quad (1.23)$$

Donde las señales de los conos son:

$$R = \int S_R(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int S_G(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int S_B(\lambda) C(\lambda) d\lambda \quad (1.24)$$

Siendo $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$ y $S_B(\lambda)$ las

sensibilidades espectrales de los conos y $C(\lambda)$ es la reflectancia espectral del objeto. Esto produce un espacio tridimensional de color formado por las salidas ortogonales de los tres mecanismos de conos. Una diferencia significativa del color está producida por una variación de las distancias en este espacio tridimensional. Muchos de estos modelos producen unidades elipsoidales de colores discriminables en este espacio y pueden ser matemáticamente definidos como modelos de "elemento de línea" (Wyszecki y Stiles, 1967). Dichos modelos están basados en la acción espectral de los tres mecanismos de conos y sus funciones de entrada/salida.

El modelo de Helmholtz es modificado para introducir la luminancia como la suma de las salidas lineales de los tres mecanismos de conos.

Stiles (1946) modifica el modelo de elemento de línea postulando que la función de Weber de los tres mecanismos es diferente para los R y B.

$$dC^2 = \left[\frac{dR}{0.8R} \right]^2 + \left[\frac{dG}{G} \right]^2 + \left[\frac{dB}{4.5B} \right]^2$$

(1.25)

Stiles se basaba en resultados experimentales, y concluía como recientemente se ha confirmado, que los mecanismos de conos B tienen una función de entrada/salida diferente de la de los otros mecanismos de conos, mostrando un estado de firmeza de respuesta en saturación, fenómeno que es mostrado por los otros mecanismos de forma transitoria (Hood, 1979). Las respuestas en saturación de los conos B se encuentran también en las células ganglionares de la retina de los primates (Gouras and Zrenner, 1983).

1.2.3. -Modelos Color-Oponentes.

Una nueva dimensión en los modelos de visión en color aparece con la teoría color-oponente, debida a las interacciones substractivas entre los mecanismos de conos en la retina (Jammeson and Hurvich, 1982), (Gouras, 1982). Estos modelos transfieren los tres mecanismos de conos a tres canales neurofisiológicos que reemplazan a los canales color-oponentes de Hering. Los tres canales neuronales procedentes de los tres conos, fotorreceptores llegan en paralelo a cada unidad de área local retinal. Un canal muestra una interacción oponente (substractiva) entre los mecanismos de conos de longitud de onda larga (L) y los de onda media (M) y se considera que el mismo representa el canal oponente R/G de Hering. En algunos modelos estos canales también reciben entrada desde los mecanismos de conos de longitudes de onda corta (S), lo

cual puede explicar la existencia de tonalidades rojizas. Un segundo canal exhibe una interacción oponente entre los mecanismos de conos (S) y una combinación posiblemente aditiva de los mecanismos de salida de conos L y M; este canal es equivalente al amarillo/azul de color-oponente de Henry. Es evidente que los conos L y M no contribuyen en la misma proporción cuantitativa en el canal amarillo/azul (Yaguchi and Ikeda, 1983) y que el canal amarillo/azul es no-lineal en mayor grado que el canal oponente rojo/verde (Larimer et al., 1974).

Un tercer canal exhibe las salidas sumadas de los mecanismos de conos L y M, y algunos modelos incluyen una pequeña cantidad de conos S.

Estos canales son usualmente considerados como los correspondientes a la luminancia y son equivalentes a los canales oponentes Blanco/Negro de Henry. La luz azul contribuye en pequeñas cantidades en la luminancia (Eisner and MacLeod, 1980) y en la brillantez cuando existen mezclas aditivas de color.

La comparación entre los modelos de elemento de línea, designados primeramente para describir la mezcla y discriminación del color de las funciones de entrada/salida, y los modelos oponentes ha llevado a una dicotomía en la historia de la visión en color entre la escuela de Helmholtz, con una orientación

marcadamente física, y la escuela de Henry, con una perspectiva fundamentalmente psicológica. Esta diferencia de perspectiva está ilustrada en el concepto único en la visión en color a través de los tonos invariables y tonos únicos.

Los últimos modelos enfatizan, en la construcción de los mismos, la relación entre los distintos tipos de conos de la retina. La relación de conos L:M:S en la retina humana es de 32:16:1 (Walraven and Bowman, 1966) (Vos and Walraven, 1972). Estos datos están basados en las aportaciones de Stiles o de las fracciones de los tres mecanismos de conos de Weber. Dartnall (1983) ha encontrado que la relación de los conos L:M:S es de 12:9:1 en la retina humana.

Sin embargo, lo más importante de este problema es buscar la proporción del centro del campo receptivo que es alterada por mecanismos de conos L:M en las neuronas visuales de los primates. DeMonasterio y Gouras (1983) han encontrado una relación de 6:7 usando una aproximación neurofisiológica del gradiente, mientras Paulus y Kroger-Paulos (1983), usando técnicas psicofísicas, biofísicas y electrofísicas, han propuesto un nuevo modelo local oponente de visión en color con una relación de conos L:M de 2:3.

Existe la evidencia de que, tanto en la retina de los primates como en la de los humanos, el número de conos S

es relativamente pequeño. El número de células ganglionares que están influenciadas por los conos S es de 5-10% (Gouras and Zrenner, 1981).

Sin embargo, el establecimiento de la proporción en la relación de los conos L:M:S en la retina de los primates, y especialmente en la retina humana, puede ser un elemento crítico en los modelos de la visión en color.

1.2.4 - Modelos de mecanismos de conos:

Recientemente se ha propuesto un modelo local con componentes dinámicas para explicar las propiedades únicas de los mecanismos de conos S.

Pugh y Mollon (1979) asumen el modelo de los dos estados, donde las salidas de los mecanismos de conos S pueden ser modificadas. El primero es un estado de adaptación localizada dentro de los conos S. Un segundo estado involucra una señal desde los mecanismos de conos L y M, donde la señal de los mismos es sinápticamente opuesta a la de los mecanismos de conos S. Usando funciones de entradas/salidas apropiadas para cada mecanismo receptor, de peso y tiempo constante para los dos estados, se pueden modelar fenómenos de los mecanismos de conos S, tales como la saturación, mezcla

no-aditivas de luces espectrales y tritanopia transitoria. Este modelo predice que la señal de conos S es máxima cuando el segundo estado (oponente) es mínimamente polarizado en cada dirección.

Basándose en estudios de las células ganglionares simples alimentadas por mecanismos de conos S en el mono, Gouras and Zrenner (1983) sugieren un circuito sináptico involucrando a fotorreceptores, horizontales y bipolares, que podría dar origen a la tritanopia transitoria, así como a otros fenómenos fisiológicos de estos mecanismos.

1. 2. 6. - Modelos de Células-X L/M oponentes:

Un importante factor en recientes modelos de la visión en color ha sido el descubrimiento fisiológico de dos sistemas de células ganglionares en la retina de los primates, las cuales podrían estar relacionadas con las células X-Y del sistema visual del gato. En el gato las células X se distinguen de las Y solamente por la linealidad de la suma espacial. En los primates las células tónicas (equivalente-X) se distinguen de las células fásicas (equivalente-Y) por la presencia de las interacciones oponentes de conos. Estas células tónicas muestran usualmente una oponencia L/M, teniendo el centro del campo receptivo alterado por un mecanismo de

conos y la periferia por otro. Esto fue detectado primero por Wiesel and Hubel (1966) y un comportamiento similar en la retina del goldfish por Wagner et al. (1960).

Las células ganglionares fásicas son las más firmes candidatas para los canales de luminancia. Las mismas tienen entradas oponentes desde los conos L y M en el centro o periferia de sus campos receptivos y no tienen entrada de los conos S. La resolución espacial es máxima en la fovea, donde las células oponentes L/M están concentradas. Las interacciones oponentes de conos mostradas por estas células dependen de la característica espacio-temporales del estímulo. Cuanto más altas son las características espacial y/o temporal, más débiles son las interacciones oponentes de conos. Una explicación de la misma fue dada por Inglingand y Drum (1973), ellos mostraron que por la oponencia L/M las células centro/periferia responden para un contraste acromático puro (luminancia) realzando los bordes, pero para un contraste cromático puro responden sin realzar los mismos. Ellos descomponen la respuestas de estas células en componentes espectralmente aditivas (L+M) y espectralmente sustractivas (L-M). Las respuestas son transformadas de Fourier en el dominio de frecuencias. Las primeras muestran las características de un filtro paso-banda y las últimas las de un filtro paso-bajo.

La idea de que los mecanismos de neuronas oponentes de conos L/M juegan un doble papel en la transmisión de la frecuencia espacial y/o temporal y una información de luminancia aditiva de altas frecuencias representa un cambio conceptual en los modelos de la visión de los primates. En los modelos previos estaba implícita la idea de que canales cromáticos de Hering para los canales retino-geniculados de los primates eran independientes de las dimensiones espacio-tiempo del estímulo. La luminancia, una operación espectralmente aditiva en visión, estaba relegada a una separación de los canales retino-geniculados de las neuronas. Se consideraba que la brillantez, una operación no-aditiva en visión, estaba involucrada en la interacción de la luminancia (espectralmente aditiva) con los canales de Hering (no-aditivos). Según esto, podrían no necesitarse los canales de luminancia; el sistema de células L/M, (equivalentes a las células X), es por sí mismo capaz de transmitir la información cromática rojo/verde, la luminancia y la brillantez.

Estos hipotéticos estados en que una alta resolución espacio-temporal está basada en señales espectralmente aditivas y una baja resolución espacio-temporal en señales no-aditivas podría significar que las señales en cromancia y brillantez por el canal L/M son equivalentes a las células centro/periferia del sistema retinogeniculado. Las células ganglionares que reciben

señales de los canales de conos S son solamente sensibles a bajas frecuencias espacio-temporales y, por lo tanto, juegan un papel menor en la luminancia, pero un papel mayor en la visión cromática.

Evidentemente la electrofisiología soporta todas estas hipótesis del modelo; sin embargo, las críticas del mismo se hacen en lo relativo a su formulación.

1.2.6 Teoría del Retinex

Los modelos anteriores son descripciones fenomenológicas de la visión en color y, como dicen Helson y Judd, hay probablemente muchas otras ecuaciones que describen de igual manera el color de un objeto. Estas formulaciones son descripciones de la visión en color, no teoría de la misma (Marr, 1980). Land y MacCanm (1971) proponen la teoría del-retinex y establecen sus fundamentos sobre supuestos del mundo físico. Esto es, separar los efectos de la reflectancia de la superficie de los iluminantes, sugiriendo dichos autores que en el campo del color se aplicarían independientemente a los canales rojo, verde y azul.

Los argumentos en contra de la teoría del retinex se hacen sobre la base de que los contrastes simultáneos de color parecen ser más importante de lo que puede explicar la misma y por el hecho de que los canales

cromáticos se procesan independientemente y se combinan después. Como el procesamiento neurofisiológico se fundamenta en un enfoque de los colores oponentes, que se encuentra incluso a nivel retinal, Horn (1974) aduce que es posible llevar a cabo la teoría del retinex con tres combinaciones lineales de rojo, verde y azul, haciendo compatible la teoría del retinex con las combinaciones neurofisiológicas.

1. 3. 1. - Estructura de la retina.

En esta sección tratamos los aspectos generales de la morfología, arquitectura sináptica y propiedades funcionales en la primera etapa del camino visual, estableciendo las diferencias entre los vertebrados inferiores y superiores.

Ya en 1938, Joung puso énfasis en que "los resultados de combinar estudios anatómicos y fisiológicos están comenzando a sugerir las líneas a lo largo de las cuales es posible comprender y controlar nuestra propia acción y la de los otros seres vivos".

La retina de los vertebrados presenta, fundamentalmente, cinco tipo de células nerviosas: fotorreceptores, horizontales, bipolares, amacrinas y ganglionares. Dichas células están dispuestas de una manera altamente ordenada; de modo que la retina puede fraccionarse en diferentes capas comprendidas entre las membranas limitadoras externa e interna. Según Miller et al (1986), en orden a su profundidad aparecen:

a) Capa nuclear externa, donde se encuentra el núcleo de los fotorreceptores. En la zona superior se sitúan los núcleos de los conos, más grandes y pálidos. En la zona inferior están los núcleos de los bastones, más

numerosos, oscuros y pequeños. La distribución de los fotorreceptores para la retina humana se muestra en la fig 1.3.

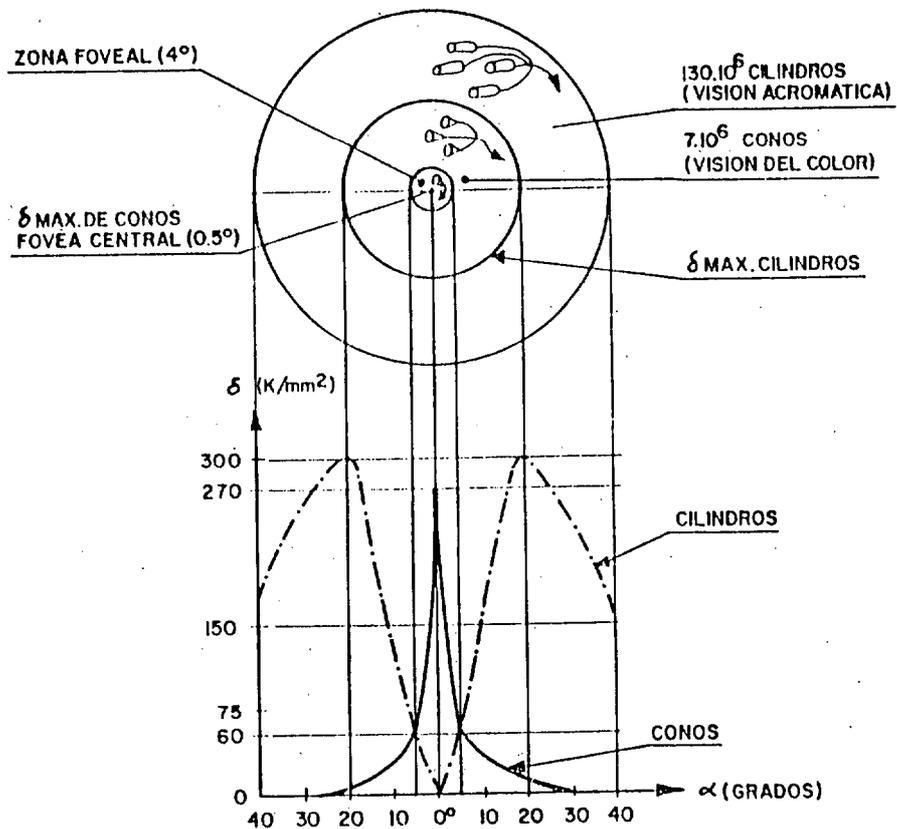


Fig. 1.3 Distribución y densidad de conos y bastones en la retina humana. (1 grado= 0.3 mm)

b) Capa plexiforme externa: contiene las terminaciones de los fotorreceptores, las dendritas de las bipolares y los procesos de las horizontales.

En la zona más externa de esta capa se sitúan las expansiones fibrosas de los conos y los bastones. En la siguiente subcapa terminan las pequeñas esférulas de los bastones y los grandes pedículos de los conos. A la parte

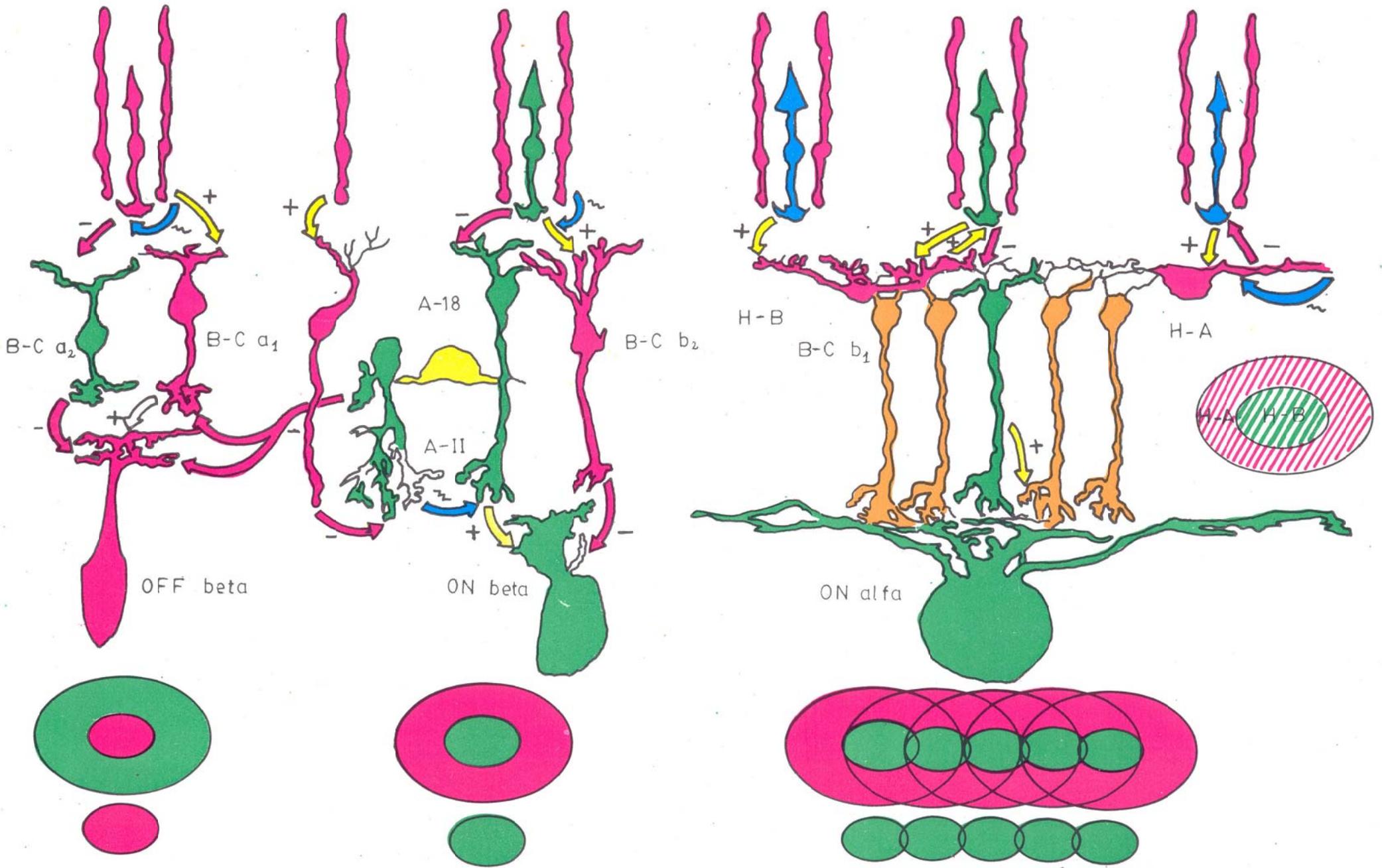
posterior de esta subcapa llegan las expansiones externas de las bipolares y todas las expansiones de las células horizontales. Estas zonas representan el primer campo sináptico de conexiones en la retina y en el sistema visual.

c) Capa nuclear interna: contiene los núcleos de las células horizontales, bipolares y amacrinas, algunas ganglionares desplazadas y la mayoría de las fibras radiales. En la parte superior de la capa se encuentran los núcleos de las horizontales. Inmediatamente detrás de esta, se encuentra una subcapa que contiene las bipolares de cono a1, b1 y las bipolares de baston. En una subcapa posterior se encuentran la bipolares de cono y las amacrinas-18, en la retina del gato.

d) Capa plexiforme interna: esta capa está dividida en dos subcapas, a y b. En la subcapa a se encuentran los axones de las bipolares, los procesos de las amacrinas II y las dendritas de las ganglionares OFF- beta. En la subcapa b se encuentran las dendritas de las ganglionares-ON-beta y ON-alfa y los axones de las amacrinas 18 y las bipolares de bastón.

e) Capa ganglionar: se encuentran los núcleos de las distintas clases de células ganglionares.

f) Capa de fibras del nervio óptico, formada por los axones de las células ganglionares.



Esta estructura está representada en la lámina II.

En la lámina la polaridad de la respuesta de cada célula está representada por un color: rojo para la despolarización (camino ON) y amarillo para la hiperpolarización (camino OFF). El signo (+) significa excitación y el signo (-) inhibición. El símbolo \approx representa las sinapsis eléctricas (anatómicamente corresponde a las juntas gap).

1.3.2 Morfología de la retina para vertebrados inferiores y superiores

La estructura funcional se muestra en dos diagramas, uno para los vertebrados inferiores (basado en observaciones para el goldfish, catfish y tortuga) y otro para los mamíferos (basado especialmente en la retina del gato, mono etc.). En el diagrama para los vertebrados inferiores destaca la integración de la información del color en la retina externa. Sin embargo, los nombres de las clases específicas de células no son mostradas porque, hasta el presente, ni los tipos ni las conexiones anatómicas son tan caracterizadas como para el gato. Aunque la retina del gato tiene más de un tipo de cono, la visión en color de esta especie no está tan bien desarrollada como en los vertebrados inferiores y otros mamíferos.

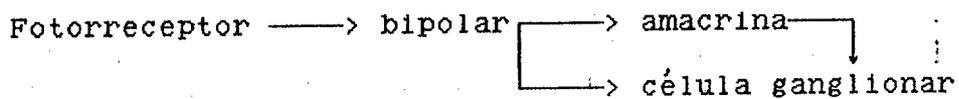
Las características generales encontradas en estas retinas son:

a) Tienen dos clases de fotorreceptores: conos y bastones.

Tienen tres tipos de conos, que se diferencian en su sensibilidad espectral.

b) Las células horizontales tienen una entrada de conos y bastones y un efecto de feed-back con otros conos.

c) En general hay un feed-forward:



d) Células ganglionares OFF arborizan en la subcapa a de la capa plexiforme interna. Células ganglionares ON arborizan en la subcapa b.

1.3.2.2 Diferencias aparentes entre los vertebrados inferiores y superiores

Sobre la base de estudios neurofisiológicos previos podemos resumir:

a) En todos los vertebrados inferiores estudiados (salamandra, todo tipo de pescados, tortuga, ect..) muchos miles de bastones están fuertemente interconectados por sinapsis eléctricas (uniones gap). En los mamíferos (gato, conejo, mono, ect..) los bastones no están eléctricamente conectados unos con otros, pero convergen en pequeño número vía sinapsis eléctricas con conos.

b) En los vertebrados inferiores conos y bastones convergen vía sinapsis química sobre la misma neurona bipolar; sin embargo, en los mamíferos las sinapsis están separadas en dos vías bastón-bipolar y cono-bipolar.

c) Los vertebrados inferiores tienen tres tipos de células horizontales con diferentes sensibilidades espectrales, cada una de las cuales está interconectada con otro miembro de su mismo tipo por uniones gap. Las células horizontales contribuyen a las propiedades crómicas y espaciales de las neuronas bipolares.

En el gato y en el conejo las células horizontales son de dos tipos y sólo una forma unión gap. Sin embargo,

ambos tienen la misma sensibilidad espectral y los dos contribuyen al antagonismo espacial de los campos receptivos de las células bipolares de conos.

d) En los mamíferos las células bipolares de conos convergen en algunos tipos de células ganglionares con un efecto de polarización y despolarización, actuando alternativamente en un "push-pull", mientras que en los vertebrados inferiores se observan bipolares de una sola respuesta de polaridad con entrada en las células ganglionares, en las cuales pueden estar involucradas algún tipo de amacrinas.

1. 3. 3. - Canal anatómico de cono-bastón-ganglionar

1. 3. 3. 1. -Canal bipolar-cono-ganglionares ON y OFF beta

Cada cono conecta con dos tipos de células bipolares de cono (a_1, a_2), que con respuesta de polaridad opuesta conectan con las células ganglionares OFF-beta; mientras que las bipolares de conos (b_1, b_2) lo hacen con las ganglionares ON-beta. Un estímulo en el centro del campo receptivo causa una acción de "push-pull", excitación más desinhibición para células ON-beta e inhibición más desexcitación para células OFF-beta. Finalmente, cuando los segmentos externos de conos cesan de suministrar señales al axón terminal de conos, los bastones suministran la necesaria señal vía uniones-gap de las células bipolares baston-cono. Así, terminales de cono pueden conducir el mecanismo de push-pull que suministra el centro-periferia del campo receptivo.

1. 3. 3. 2 Canal bastón-bipolar-ganglionares ON-OFF-beta.

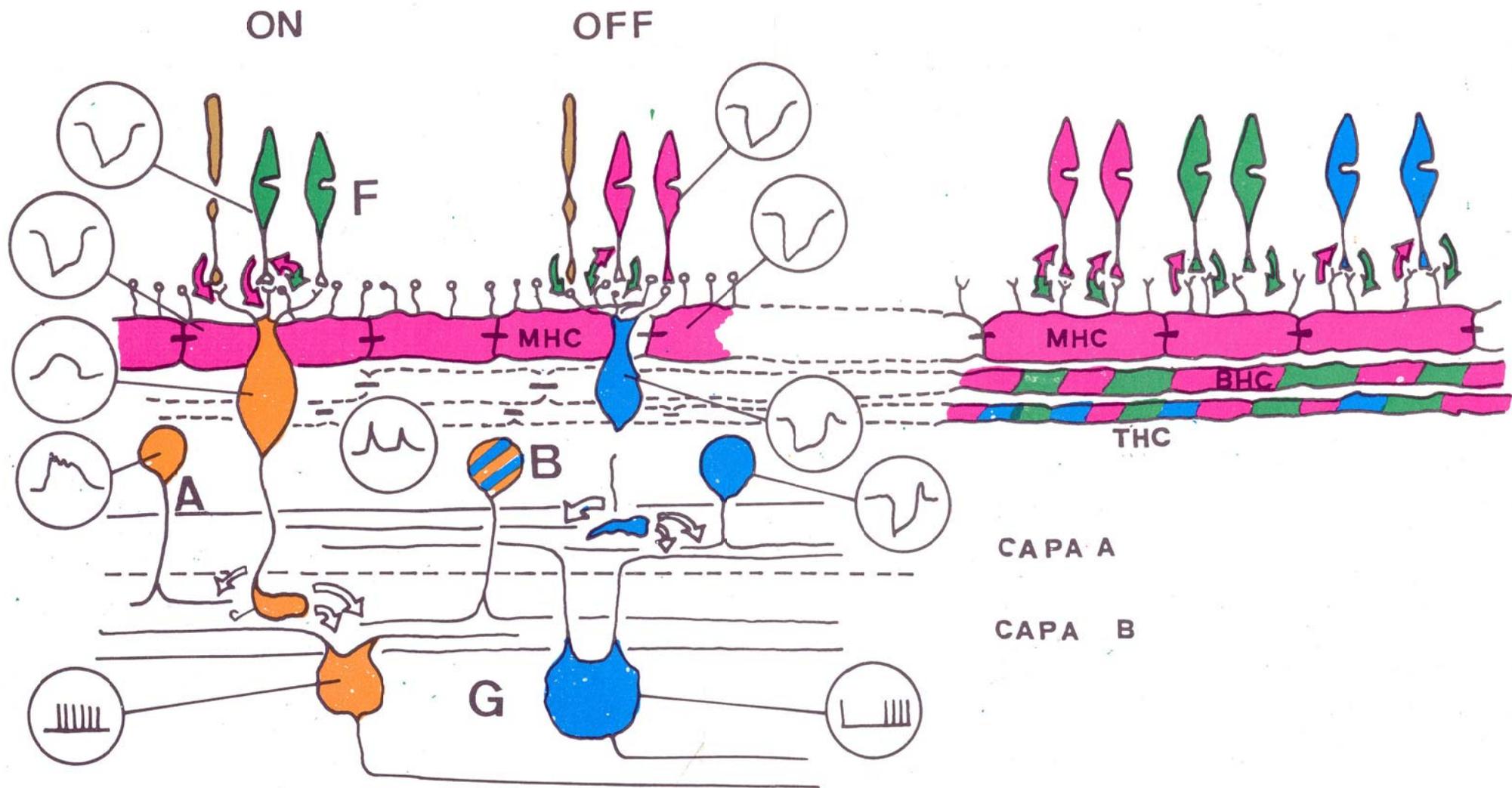
En estado de adaptación a la oscuridad los bastones dirigen sus señales desde el segmento externo del bastón hacia la bipolar de bastón. Como se aprecia en la lámina II, la última neurona despolariza a la amacrina AII que tiene una salida bifuncional:

a) La AII tiene una unión-gap que conduce la señal despolarizada hacia la bipolar de cono b1, excitando de esta manera las ganglionares ON-beta.

b) La célula amacrina AII tiene una sinapsis química (aparentemente glycinergic) que, se piensa, es la causa de la inhibición postsináptica de las OFF-beta, apagando la excitación de las bipolar-cono a1.

Las células ganglionares ON y OFF-beta en el estado de completa adaptación a la oscuridad probablemente originan una contracción de los campos receptivos de las bipolares de bastón transmitido a través de las amacrinas AII.

Es un hecho comprobado la carencia de conexiones laterales de las bipolares de bastón con las células horizontales de tipo A, las cuales provienen de la periferia de la bipolar de cono, lo cual explicaría la completa adaptación a la oscuridad de las células ganglionares que carecen de un antagonismo periférico.



CAMINOS PARA EL PROCESAMIENTO DEL COLOR EN LA RETINA

1.3.4. - Vías para el procesamiento del color en la retina de los vertebrados inferiores

Los canales ON-OFF en la retina de los vertebrados inferiores se han podido reconstruir sobre la base de una recopilación de información obtenida en peces (golfish, carpa, catfish, ect.), reptiles, tortugas, anfibios, etc..

Estos canales se muestran en la lámina III, donde el esquema del osciloscopio representa las respuestas para distintos destellos de luz.

Algunas partes de la figura podrían aplicarse probablemente a todos los vertebrados inferiores, mientras que otras partes de la misma son específicas de algunas especies. Tanto los conos como los bastones son despolarizados en la oscuridad. Las señales procedentes de los fotorreceptores son enviadas por un camino ON (despolarización) a través de las células bipolares con una sinapsis donde existe una inversión de signo y mediante canales OFF (hiperpolarización) vía células bipolares con una sinapsis en la cual el signo se conserva. También algunos conos (principalmente los rojos) envían señales (conservando el signo) a las células horizontales monofásicas. Cada tipo de célula horizontal tiene un acoplamiento de tipo eléctrico. Esto implica que sus campos receptivos son mucho más grandes que sus campos dendríticos, lo que tiene como

consecuencia que en algunos peces llegue a cubrir la totalidad de la retina.

Mediante un proceso de retroalimentación, las células horizontales monofásicas envían señales negativas hacia los conos rojos a través de sinapsis del tipo GABA donde la señal es invertida.

El campo receptivo de las células bipolares recibe señales directas de los fotorreceptores, mientras que el campo periférico lo hace a través de las células horizontales.

Estas conclusiones han sido trazadas sobre la base de:

1. - Observaciones morfológicas.
2. - Comparación del campo receptivo y los campos dendríticos de las células bipolares y los campos de las células horizontales.
3. - La sensibilidad GABA de los pedículos de conos rojos (tortuga).

1. 3. 5. - Procesamiento del color en la capa plexiforme interna y externa

La capa plexiforme interna (C.P.I.) está separada en dos subcapas, a y b (típicos ejemplos de la carpa y el goldfish). En la subcapa (a) se encuentran:

1. - Las conexiones de las neuronas tipo OFF.
2. - Los axones terminales de las células bipolares centro OFF.
3. - Las arborizaciones dendríticas de las ganglionares centro OFF.
4. - Las células amacrinas tipo OFF.

La subcapa b es donde se encuentran las neuronas tipo-ON. Las dendritas de las células amacrinas ON-OFF se extienden en ambas subcapas. Las señales de las neuronas se transmiten en cada subcapa conservando el signo.

En la capa plexiforme externa (C.P.E.) las células horizontales monofásicas reciben sus entradas desde conos rojos por medio de una sinapsis donde se conserva la señal y son hiperpolarizadas por un flash de luz que cubre todas las longitudes de onda. Estas células envían señales hacia los conos verdes mediante un canal donde la señal es invertida por sinapsis del tipo GABA.

Estas afirmaciones están hechas sobre la base de:

1. - El tipo específico de conexiones entre conos y células horizontales (pescados, tortugas).

2. - La alta sensibilidad GABA localizada en los pedículos de los conos verdes de la tortuga.

3. - La hiperpolarización GABA encontrada en estos conos (tortuga).

Los conos verdes responden con hiperpolarización para longitudes de onda cortas y con despolarización para longitudes de onda largas (tortuga).

Las señales procedentes de los conos verdes son enviadas hacia las células horizontales bifásicas mediante un canal donde la sinapsis invierte la señal.

Las señales de las células horizontales bifásicas podrían ser transmitidas hacia los conos azules vía sinapsis señal-invertida, produciendo una respuesta espectral en estas células. Las mismas señales son dirigidas vía sinapsis con señal conservada hacia las células horizontales trifásicas. Estas tienen conexión directa no sólo con los conos azules sino también con los conos rojos.

1.3.6. -Canales retinales para la visión en color en los vertebrados superiores

Los fotorreceptores de los vertebrados responden hiperpolarizándose a la luz y despolarizándose a la oscuridad (Tomita 1965), lo que implica dos tipos de canales para la visión en color de los vertebrados superiores.

El canal OFF se caracteriza por:

1. - Sinapsis con signo-conservado (+).
2. - Sinapsis planas en el pedículo de cono en la C. P. E.
3. - Ramificación dendrítica en la C. P. I.

Los caminos ON se caracterizan por:

1. - Sinapsis de signo invertido (-).
2. - Sinapsis invaginantes en la C. P. E. conservando el signo las señales que pasan a la C. P. I. (Nelson et al. 1978).

Las células horizontales son mediadoras en las interacciones antagonistas entre los diferentes conos.

Las células amacrinas son consideradas como mediadoras entre las interacciones antagonistas de los distintos canales centro-ON-OFF (células bipolares y ganglionares). Ambas podrían ser las responsables de las interacciones centro-periferia.

En los animales con visión en color, sobre todo en los primates, las horizontales y amacrinas por ser específicas de conos, podrían mediar entre las interacciones conos-oponentes.

Este modelo (Gouras, et. al, 1981) se presenta en la fig. 1.4, que se coresponde con una extensión funcional de los estudios anatómicos de la retina de los primates realizada por Boycott et al. (1969).

En los animales con más de un mecanismo de conos y por consiguiente con potencial para la visión en color, algunas de las señales procedentes de cada mecanismo de conos son transmitidas por canales separados hacia las células ganglionares, usualmente mostrando alguna degradación de la oponencia espectral formada por el antagonismo entre las células horizontales y amacrinas.

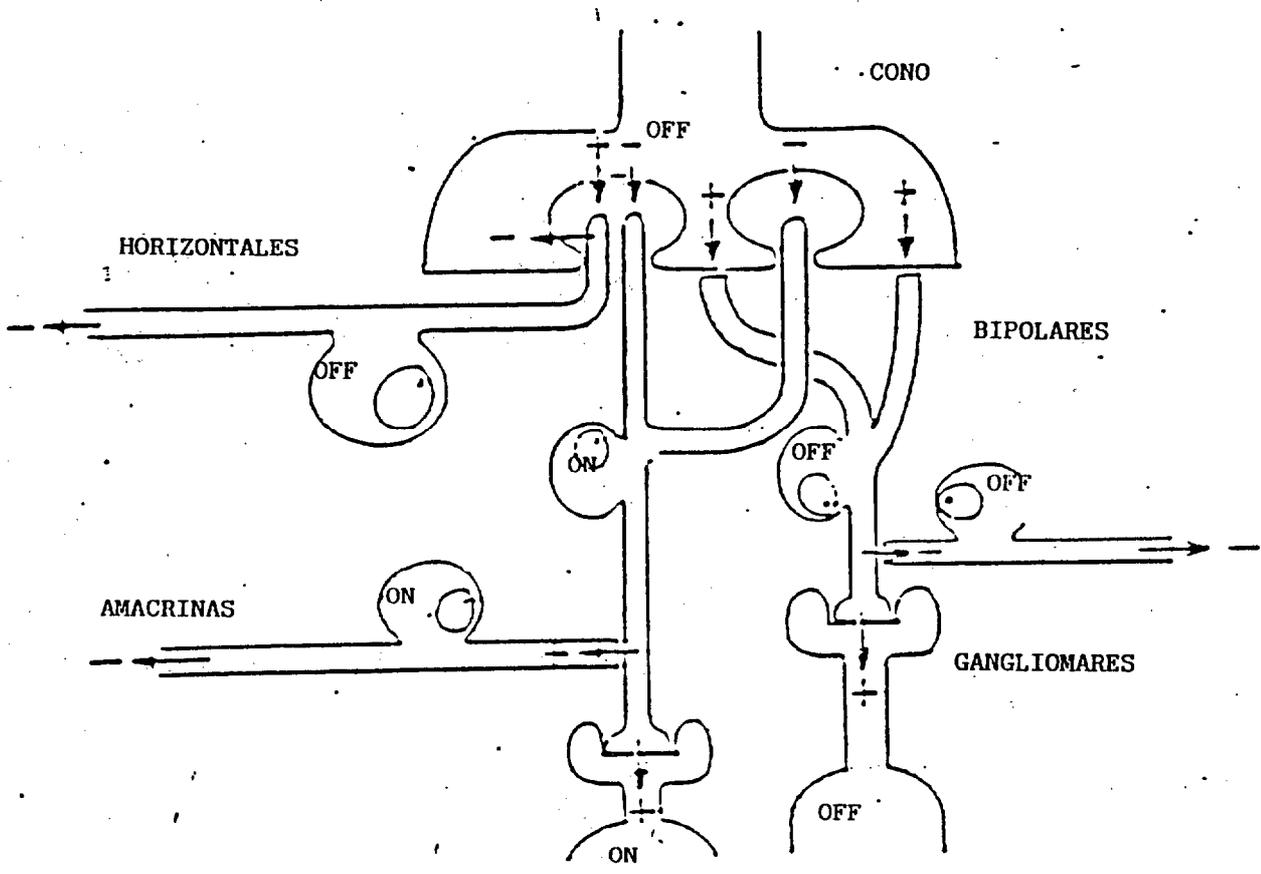


Fig. 1.4 Canales ON-OFF en los primates.

1.3.6.1. - El mecanismo de los conos

Gouras et al. (1981) distinguen dos canales de conos para la visión en color, el llamado sistema mid-espectral que tiene sensibilidades espectrales comprendidas entre 500 y 700 nm y el sistema de conos azules, cuyas sensibilidades oscilan entre 400 y 500 nm.

En el sistema mid-espectral distingue dos canales:

1. - El canal fásico. Este se caracteriza por una no-
oponencia al color.

2. - El canal tónico. En este canal se distinguen dos
grupos:

a) El primero se caracteriza por una débil
oponencia-color.

b) El segundo por una fuerte oponencia al color
(esto sólo para células con centro-ON)

1.3.6.2 Sistema de conos azules

Este sistema solamente es usado por un tipo de células ganglionares que representa el 5% del total de las mismas. Todas estas células responden de manera similar.

a) Son excitadas por estímulos comprendidos entre 400 y 500 nm. e inhibidas para longitudes de ondas mayores.

b) De las excitaciones son responsables los conos azules y de las inhibiciones los conos del sistema mid-

espectral.

c) El campo receptivo de estas células ganglionares es relativamente grande, alrededor de $1/3$ en diámetro.

d) Las células ganglionares de conos azules tienen una respuesta en saturación para bajos parpadeos y un transitorio en la adaptación del campo amarillo o rojo.

e) Todas las células ganglionares de los canales azules en los primates utilizan solamente mecanismos de centro-ON.

f) Los canales de conos azules que ocasionalmente se encuentran en la retina del gato, son también canales excitatorios. (Daw et al. 1970).

g) Las generalizaciones anteriores no son válidas para la ardilla por ser este un animal altamente diurno con sólo dos mecanismos de conos. (Michael 1968).

1.3.6.3 Sistema de conos mid-espectral

Las restantes células de la retina de los primates parecen estar influidas solamente por canales de conos rojos, verdes y bastones. Los canales de conos mid-espectral son utilizados por las células ganglionares actuando en paralelo. Un sistema responde tónicamente y el otro fásicamente para distintos estímulos, y cada uno de ellos usa vías separadas ON-OFF.

1.- Sistema fásico:

Las características de este sistema son:

- a) Está compuesto de células ganglionares grandes.
- b) Tienen velocidades de conducción relativamente altas.
- c) Sus células están más concentradas en la periferia de la retina que en la fovea.
- d) Las células fásicas tienen la misma respuesta para todas las longitudes de onda.
- e) Tienen un campo receptivo con una organización centro-periferia, en el que ambos mecanismos del sistema mid-espectral contribuyen a las respuestas de centro-periferia.
- f) El sistema de células fásicas no solamente conduce las señales a más alta velocidad que las tónicas, sino que además reciben sus señales desde los fotorreceptores con una latencia más corta que la de las células tónicas (Gouras 1968), lo que sugiere que las células fásicas podrían tener un sistema bipolar separado.
- g) El hecho de que las células fásicas tengan mayores campos receptivos que las tónicas podría ser la causa de que estas últimas tengan mayor sensibilidad al movimiento (DeMonasterio et al. 1975).
- h) El hecho que las células fásicas tengan la misma respuesta para todas las longitudes de onda puede ser alterado por diversos factores:

h1) Las entradas de cono pueden ser eliminadas por adaptación a la luz.

h2) Las diferentes longitudes de los mecanismos de conos R y G, contribuyen a la respuesta del centro o de la periferia.

2.-Sistemas de células tónicas

El sistema de células tónicas incluye un número relativamente grande de pequeñas células ganglionares.

Las características de este sistema de células son:

a) Se encuentran concentradas principalmente en la fovea.

b) Aísla la acción de los mecanismos de conos R o G en el centro de los campos receptivos de cada célula, y las respuestas en el centro son usualmente antagonistas con los otros mecanismos de conos.

c) Estas células exhiben una oponencia de conos, por ejemplo, son excitadas para algunas longitudes de ondas y son inhibidas para otras.

d) Ciertas células tienen un antagonismo de conos tan fuerte que la respuesta del centro sólo puede ser detectada en uno u otro extremo del espectro visible, donde las diferencias entre los espectros de absorción de los conos R y G son máximos, mientras otras muestran un antagonismo tan extremadamente débil que la respuesta central es producida por todo el espectro de

luz.

f) Las células conos-oponentes con antagonismo fuerte son insensibles para luces amarillas o blancas, mientras que las de antagonismo débil son muy sensibles a ellas (Gouras and Zrenner 1981).

g) Las diferencias entre los mecanismos de conos R y G no ocurren solamente para longitudes de onda larga, donde los mecanismos de R son más sensibles que los de G, sino también para regiones de longitudes de onda corta, donde la sensibilidad de los mecanismos de conos R se aproxima e incluso exceden a los mecanismos de conos G.

h) No está claro que las interacciones de los mecanismos de conos R y G para cortas longitudes de onda sean suficientes para explicar el tono rojizo (Boynton 1979). Hay evidencia psico-físicas de que los mecanismos de cono B también contribuyen al mismo.

i) Se supone con cierta base la existencia de unidades simples que son excitadas por conos azules y rojos e inhibidas por conos verdes (Gouras 1970, Dow 1974); si estas unidades alimentan el sistema oponente R-G, podrían ser las responsables de las sensaciones rojizas en cortas longitudes de onda.

j) Recientemente DeMonasterio ha encontrado un camino inhibitorio para el mecanismo de conos B, en las células ganglionares oponentes R-G, que aumenta la

sensación de rojizo por inhibición del mecanismo de conos G.

k) En otros vertebrados con visión tricromática del color hay células horizontales que reciben entrada directa solamente desde los conos azules (hiperpolarizándose) (Fourtes and Simon 1974), lo que implica que una organización similar puede existir en la retina de los primates. Por lo tanto esto es una razón para sospechar que los mecanismos de conos B ejercen alguna influencia en los otros mecanismos de conos a través de las células horizontales.

l) El tamaño de los campos receptivos de las células tónicas es más pequeño en algunas células ganglionares en la retina de los primates, llegando a ser más pequeñas en las proximidades de la fovea (DeMonasterio and Gouras 1975).

1.3.7. - Canales de luminancia y color en la retina de los primates

El sistema de conos mid-espectral alimenta en paralelo a tres sistemas de células ganglionares incluyendo una separación de los canales centro ON y OFF, lo que hace necesario al menos ocho únicos circuitos en la retina para el sistema mid-espectral.

El esquema del sistema mid-espectral y el sistema de conos azules se representan en la fig. 1.5.

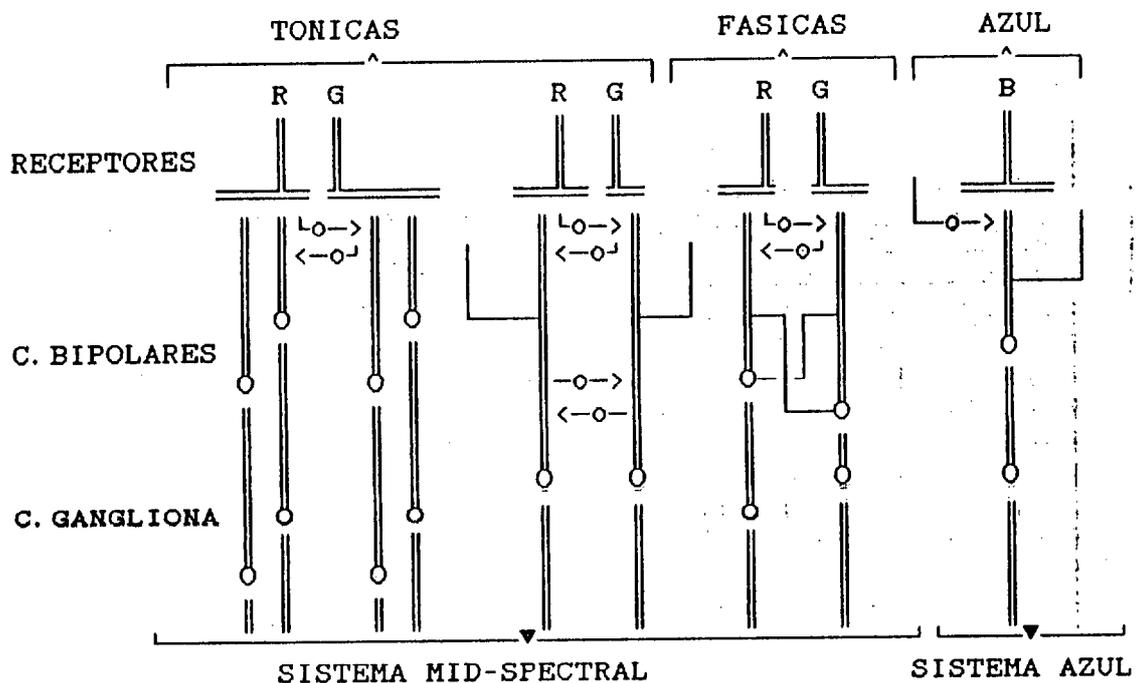


Fig. 1.5 Esquema de los canales retinales mid-espectral y canales de conos azules.

En la figura los canales ON y OFF están indicados por círculos abiertos y cerrados respectivamente. Las células tónicas se distinguen de las fásicas en que tienen entrada desde las bipolares que son postsinápticas con solamente una clase de conos. Las interacciones inhibitorias entre los fotorreceptores se realizan a través de las células horizontales, mientras las interacciones inhibitorias entre las células bipolares se realizan mediante las células amacrinas .

Según se describe en la figura cada canal de conos R o G contiene hasta cinco distintos tipos de células bipolares: Solamente tres de estos tipos de células bipolares son directamente postsinápticos con conos R o G, pero no ambos a la vez. Estos canales específicos de conos de las células bipolares mid-espectral podrían ser presinápticos para las células ganglionares tónicas. Hay dos variedades de células bipolares tónicas centro-ON y un sólo tipo de centro-OFF. Estas células bipolares centro-OFF y una de las des centro-ON influyen sus correspondientes células ganglionares, haciendo un mínimo contacto con las amacrinas. Consecuentemente las células ganglionares tónicas muestran una débil oponentia de conos. Las células bipolares tónicas centro-ON muestran una gran oponentia de conos vía células amacrinas. Aquellas células bipolares alimentan solamente células tónicas oponentes de conos y reflejan un segundo estado de las interacciones conos-oponentes en la retina de los

primates.

Los otros dos tipos de células bipolares del sistema mid-espectral fásico, hacen contacto con los conos R y G, uno centro-ON y otro centro-OFF, siendo cada una antagonista por separado de las células amacrinas centro-ON-OFF.

Sin embargo Fourtes y Simon (1974) sugieren que en la retina de la tortuga las células horizontales son específicas de conos y proponen un modelo en el que células horizontales de conos rojos (CHR) antagonizan con conos G y células horizontales de conos verdes (CHG) antagonizan con conos azules.

Estos resultados clarifican las dos clases de células en la retina de los pescados, las llamadas unidades L que son hiperpolarizadas para todas las longitudes de onda y las unidades C que las hay de dos clases:

1. - Unas se hiperpolarizan para longitudes de ondas largas y se despolarizan para longitudes de ondas cortas.

2. - Otras se hiperpolarizan para cortas y largas longitudes de onda y se despolarizan para longitudes de onda medias.

De acuerdo con esto Gouras (1972) propone un modelo representado en la fig. 1.6 en el que las respuestas están representadas por HCR, HCG, y HCB respectivamente.

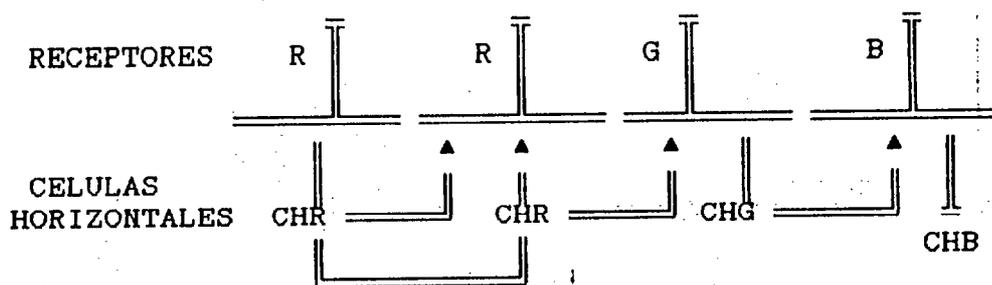


Fig. 1.6 Interacciones de feedback de las células horizontales en los peces

Las flechas indican inhibición por las células horizontales. Las células horizontales de conos rojos (RHC) intervienen en la interacción antagonista entre los conos rojos y verdes, mientras que las células horizontales de conos verdes (GHC) sólo intervienen entre las interacciones antagonistas de los conos azules. Sin embargo no hay nada claro en la salida de las células horizontales de conos azules (BHC).

En los mamíferos la conexión de las células horizontales con las bipolares se realiza a través de las dos subcapas de capa plexiforme interna:

En la subcapa b están las bipolares de centro-ON.

En la subcapa a están las bipolares de centro-OFF.

Flamiglietti et al. (1977).

En suma esto muestra que las células bipolares oponentes de conos muestran una doble oponencia. Una clase está

compuesta por células que son excitadas por los conos rojos e inhibidas por los conos verdes en el centro y son inhibidas por los conos rojos y excitadas por los conos verdes en la periferia. Otras muestran la operación contraria.

En base a esto (Gouras, 1981), contruye un circuito simplificado de los canales de luminancia y color, fig. 1.7.

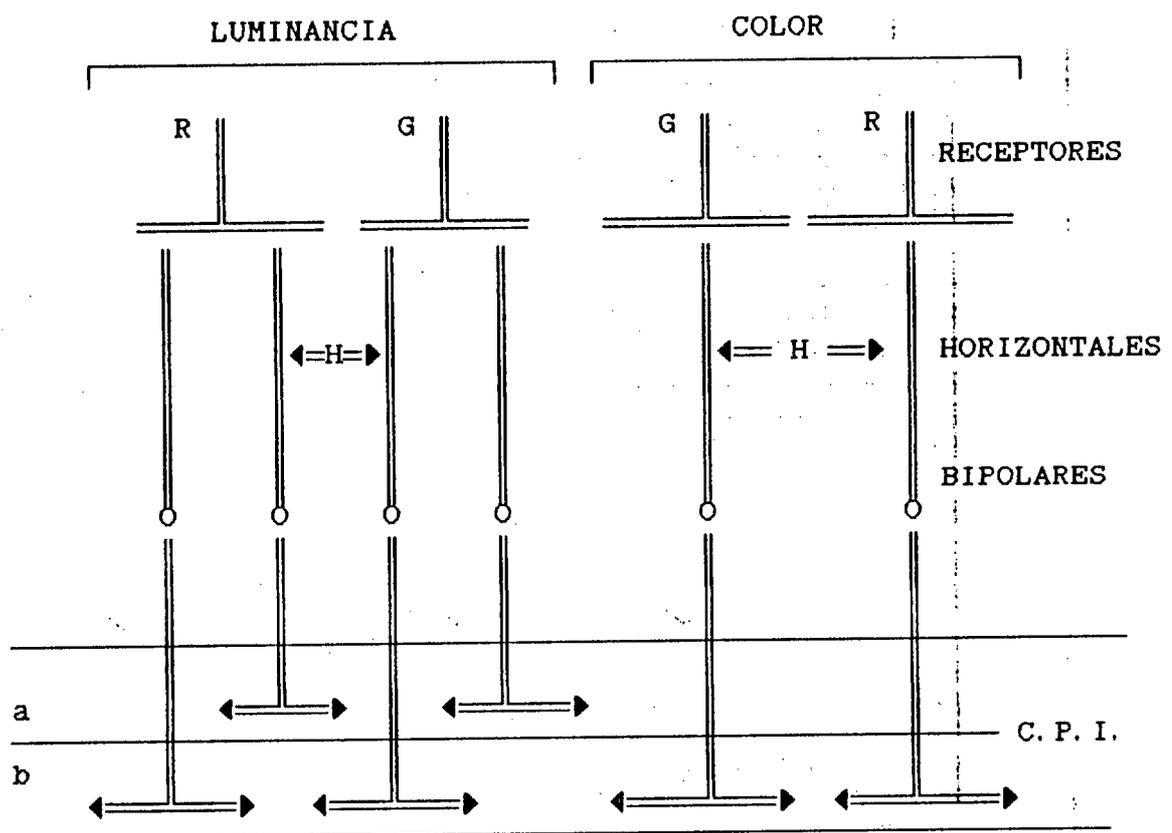


Fig. 1.7 Canales de luminancia y color en la retina de los vertebrados

Los canales de luminancia utilizan sólo neuronas de centro-ON-OFF (círculos abiertos y cerrados respectivamente) con terminaciones en las subcapas a y b de la C.P.I. Los canales de color están compuestos solamente de células-ON, mostrando dos estados de oposición cromática, en la capa plexiforme externa (células horizontales) y en la interna (células amacrinas).

En la retina de los pescados los canales de luminancia aparecen dominados por los mecanismos de conos R mientras que en los primates los contrastes de luminancia intervienen los conos R y G.

Los mecanismos de conos rojos, dominantes en la retina de los pescados, tienen un paralelismo en la visión en color de los primates. En estos últimos los mecanismos de conos rojos son más dominantes que los mecanismos de conos verdes y azules (DeMonasterio et al. , 1974).

En el desarrollo de la visión en color de los mamíferos, el mecanismo de conos azules ha evolucionado desde los bastones (Gouras y Zrenner, 1979) y se supone es utilizado para detectar los contrastes en color con el mecanismo de conos mid-espectral. Esto ocurre en la retina del gato y probablemente en la del conejo. El esquema de los contrastes en color se representa en la fig. 1.8

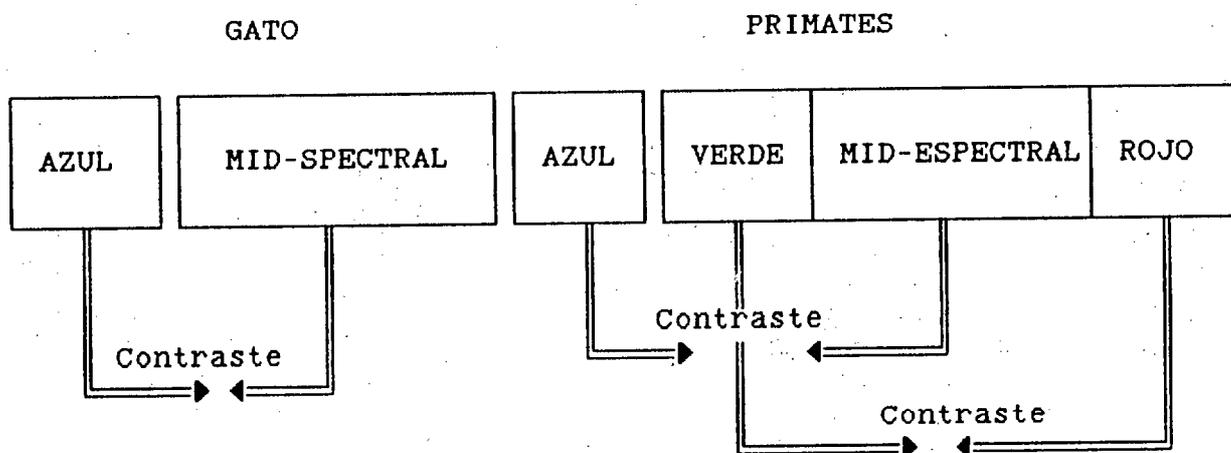


Fig. 1.8 Diagrama de la posible evolución de la detección de los contrastes en color.

II ESTRUCTURA Y COMPUTACION RETINAL DE LOS PROCESOS
CROMATICOS EN LOS DISTINTOS VERTEBRADOS

2.1. - CARACTERISTICAS GENERALES DE LA CODIFICACION DEL COLOR

2.1.1 Clasificación de las células codificadoras de color.

La nomenclatura inicial de las células codificadoras de color provienen de los estudios hechos por Svaetichin y Mac Nichol de los potenciales S en la retina de los peces. Estos potenciales son graduables y las variaciones de su amplitud en función de la longitud de onda permite clasificarlos en dos grandes grupos:

1. - Respuestas L o de luminancia.

La respuesta es independiente de la longitud de onda.

2. - Respuesta C o Cromática.

a2) Tipo rojo-verde, respuestas OFF al rojo con un pico en 640 nm y ON al verde en 500 nm, estando la inversión de polaridad en 570 nm aproximadamente.

b2) Tipo azul-amarillo. Tienen un máximo negativo para longitudes de onda de 440 nm y un máximo positivo en 600 nm, estando la inversión de polaridad en 510 nm.

Este tipo de respuesta se muestran en la fig. 2.1

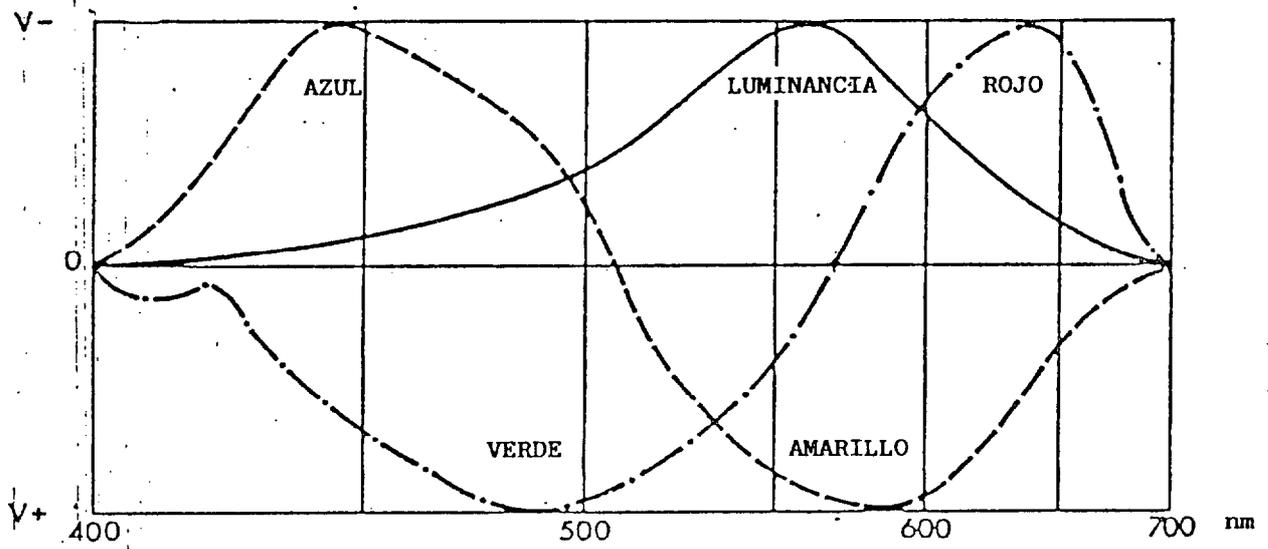


Fig. 2.1 Potenciales S en la retina de la carpa

De acuerdo con esta terminología se ha introducido la clasificación de células codificadoras de color en:

1. Células L (luminancia)

Son hiperpolarizadas para todas las longitudes de onda.

2. Células C o color-oponentes

Son despolarizadas para unas longitudes de onda e hiperpolarizadas para otras.

Las células tipo C las podemos clasificar según su campo receptivo en:

- a) Células simples color-oponentes
- b) Células doble oponentes
- c) Células color complejas

Este tipo de células se pueden ver en la fig 2.2

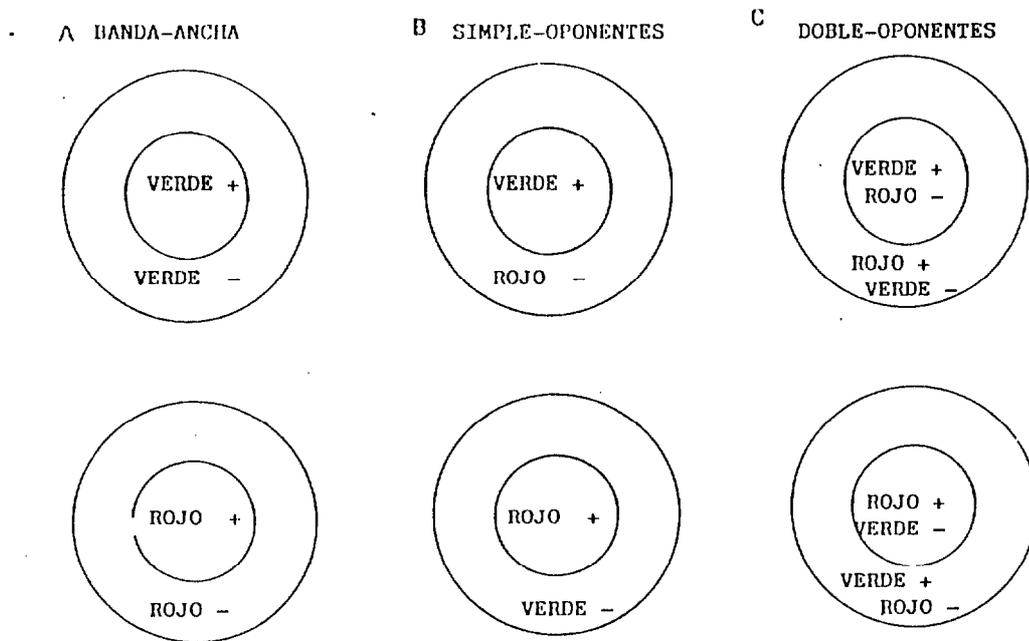


Fig. 2.2 Tipos de células codificadoras de color

En las simples color-oponentes sus campos receptivos son usados para detectar diferencias de brillantez a lo largo de sus contornos. En los primates todas las células retinales y del geniculado son de este tipo.

Las doble color-oponentes usan mecanismos que suministran las sensaciones básicas asociadas con el color (tono) comparando las actividades de cada mecanismo receptor a lo largo de sus contornos. Estas

células se piensa puedan estar formadas por convergencia de las simple-oponentes y en los primates solo se encuentra a nivel de la corteza visual.

Las células simple color-oponentes tienen un pequeño campo receptivo central conectado a un mecanismo de conos y una gran campo periférico concéntrico conectado a varios mecanismos de conos. Las mismas transmiten información de brillantez y color conjuntamente. Las señales de color están presentes solamente cuando el estímulo es lo suficientemente grande para estimular los campos receptivos central y periférico de estas células.

Las células centro-ON conectadas, a los canales de conos rojos y canales de conos verdes, son excitadas por la luz roja e inhibida por la luz verde; existen otras que son excitadas por la luz roja e inhibidas por la luz verde. Este tipo de células se asemejan a los canales oponentes rojo-verde de Hering. Otro tipo de células se asemejan los canales oponentes azul-amarillo de Hering. En la retina y en el núcleo geniculado, se han encontrado cuatro tipos de células oponentes verde-rojas:

1. - Rojo ON-centro con verde OFF-periferia.
2. - Verde ON-centro con rojo OFF-periferia.
3. - Rojo OFF-centro con verde ON-periferia.
2. - Verde OFF-centro con rojo ON-periferia.

Las células simple color-oponentes son ambiguas para los contrastes en brillantez y en color. Esta ambigüedad es mostrada por ejemplo, si el hecho de tener una fuerte respuesta excitatoria las células con centro-ON rojo, periferia-OFF verde, es debida a un pequeño spot brillante o a un gran spot rojo. Para distinguir esto, el cortex visual probablemente descodifica estos mensajes levantando las respuestas en paralelo de las otras células en la misma área del espacio visual, (Gouras, 1981). [Fig. 2.3]

En la figura las células de la izquierda tienen el centro estimulado por los mecanismos de conos verdes y la periferia por los mecanismos rojos, las células de la derecha muestran centro-rojo, periferia-verde. Los conos sensitivos rojos y verdes responden a todo el espectro de luz tanto como la luz blanca. Ellas son excitadas para pequeños spot de luz blanca y son insensibles para spot grandes de luz blanca. Para spot pequeños de luz roja o verde tienen el mismo comportamiento que para la luz blanca. Los spot grandes coloreados muestran la selectividad al color de estas células. Los spot grandes rojos inhiben las células de la izquierda y excitan la de la derecha, mientras que un spot grande verde produce el efecto contrario.

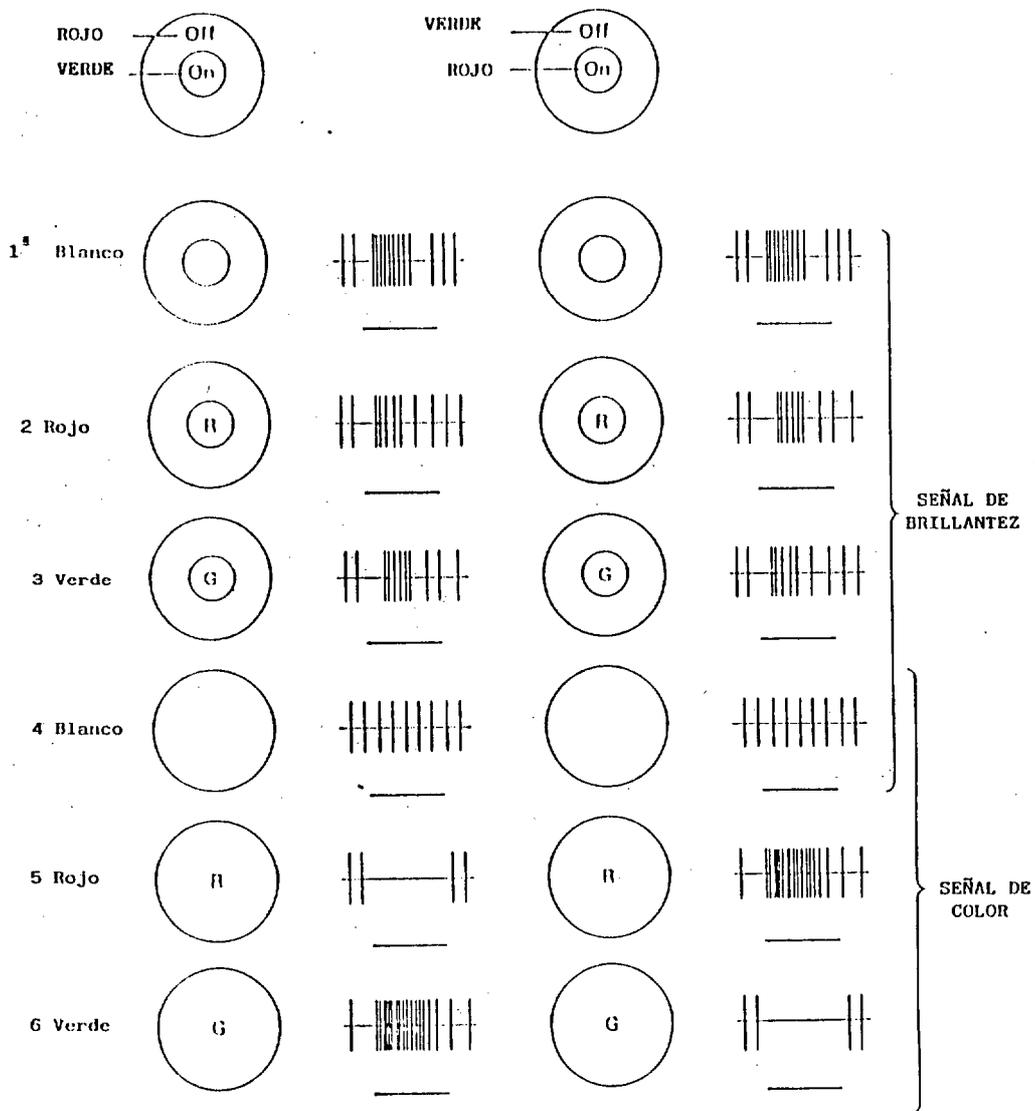


Fig 2.3 Campos receptivos y respuestas de las células simple color-opponentes.

Las células color-oponentes se pueden clasificar en:

- a1) Con distribución centro-periferia
- b1) Sin distribución centro-periferia.

Las células de distribución centro-periferia dan una respuesta "ON" en centro del campo a un color y una respuesta "OFF" a otro en la periferia. Por ejemplo una respuesta "ON" al rojo en el centro y "OFF" al verde en la periferia.

Algunas veces se puede presentar la respuesta de la periferia también en centro. Por ejemplo "ON" rojo y "OFF" verde en el centro y "OFF" verde en la periferia.

En las células sin distribución centro-periferia la extensión espacial de las dos componentes del color es la misma. Por ejemplo rojo "ON" en centro y azul "OFF" en el centro.

Las células doble oponentes son altamente selectivas para los contrastes en color. Un tipo de célula doble oponente es excitada por mecanismos de conos rojos e inhibido por mecanismos de conos verdes en el centro del campo receptivo y excitada por mecanismos de conos verdes e inhibidos por mecanismos de conos rojos en la periferia. Estos campos receptivos combinan la oponencia al color en el centro y el contraste al color en la periferia. Algunas de estas células responden mejor a spot rojo sobre verde en la periferia; otras células

responden mejor a un spot verde dentro de un rojo en la periferia, o a un spot azul dentro de un amarillo.

El circuito neuronal que es usado para generar células corticales doble oponentes desde células simple oponentes geniculadas no se conoce, pero una posibilidad es la mostrada en la fig. 2.5 (Gouras , 1981).

La coherencia de estos circuitos está en la disposición de entradas excitatorias/inhedoratorias sobre las células corticales a través de células geniculadas apropiadas y el hecho de asumir que el centro de las células corticales doble oponentes es de igual tamaño que el centro y la periferia juntos de las células simple oponentes del geniculadao.

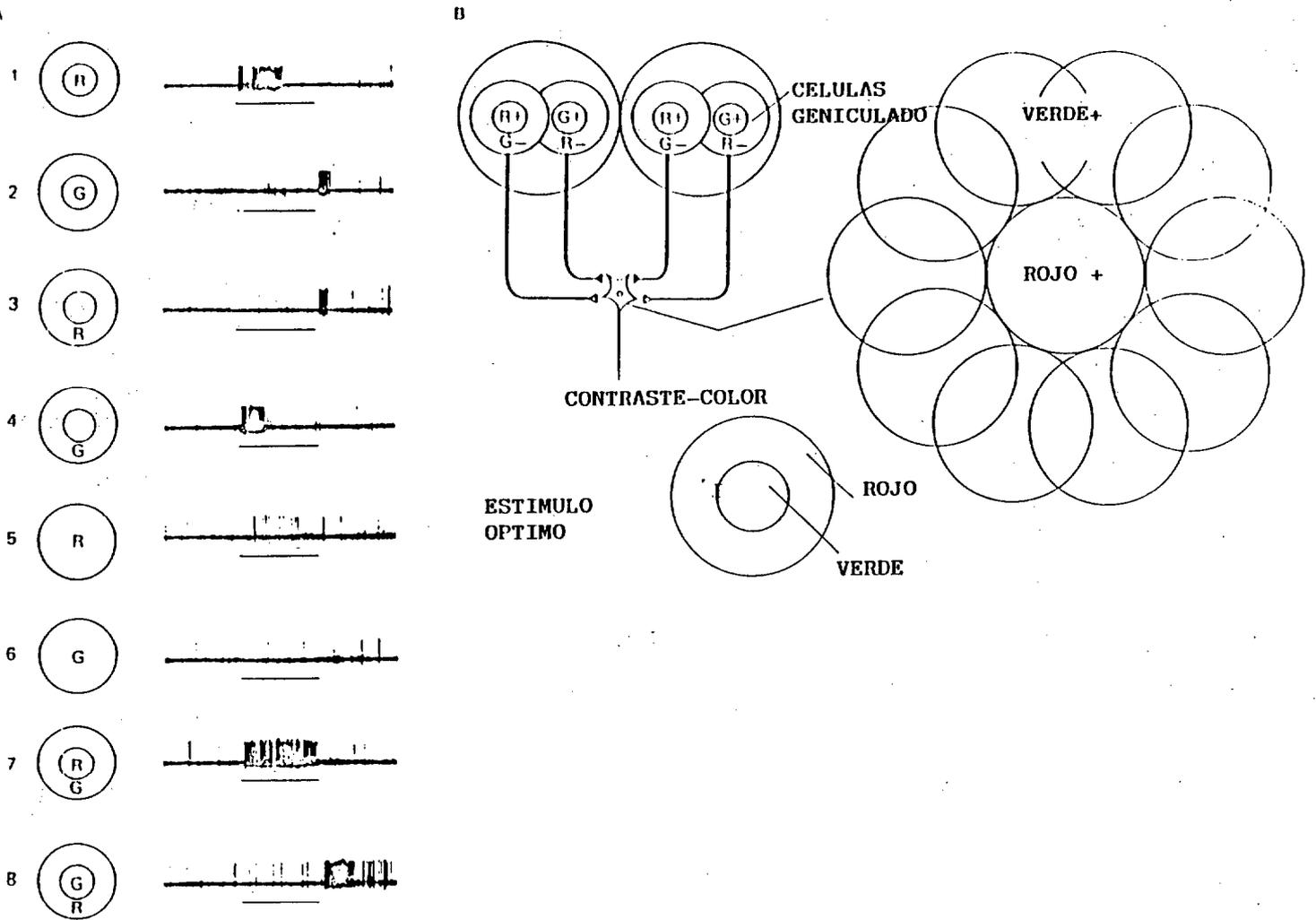


Fig. 2.4 Células doble oponentes

La figura anterior muestra:

A: Respuestas de las células para varios estímulos rojos (R) o verdes (G) para pequeños y grandes spot.

B: Como las células del geniculado pueden ser usadas sinápticamente para formar células corticales.

Las células de color más complejas responden a barras de un color y/o a una orientación particular o codifican en color y dirección.

Recientemente Hubel y Livingstone han explorado el área 17 y han encontrado que células doble oponentes están concentradas en una estructura tipo pinzas (llamadas burbujas) que tienen una función similar a las columnas corticales. Las pinzas corticales son células que tienen campos receptivos circulares y ejes de orientación no específicos.

Las pinzas corticales se extienden a través de las capas superiores (II y III) del área 17, así como en las capas inferiores (IVb, V y VI). Estas regiones pinzas reciben entrada directa desde el núcleo geniculado. Hubel piensa que las células pinzas corticales representa un sistema separado para el color y movimientos.

En la figura. 2.5 se muestran las células color más complejas que tienen una doble oponencia al contraste de color exhibiendo una selectividad a la orientación.

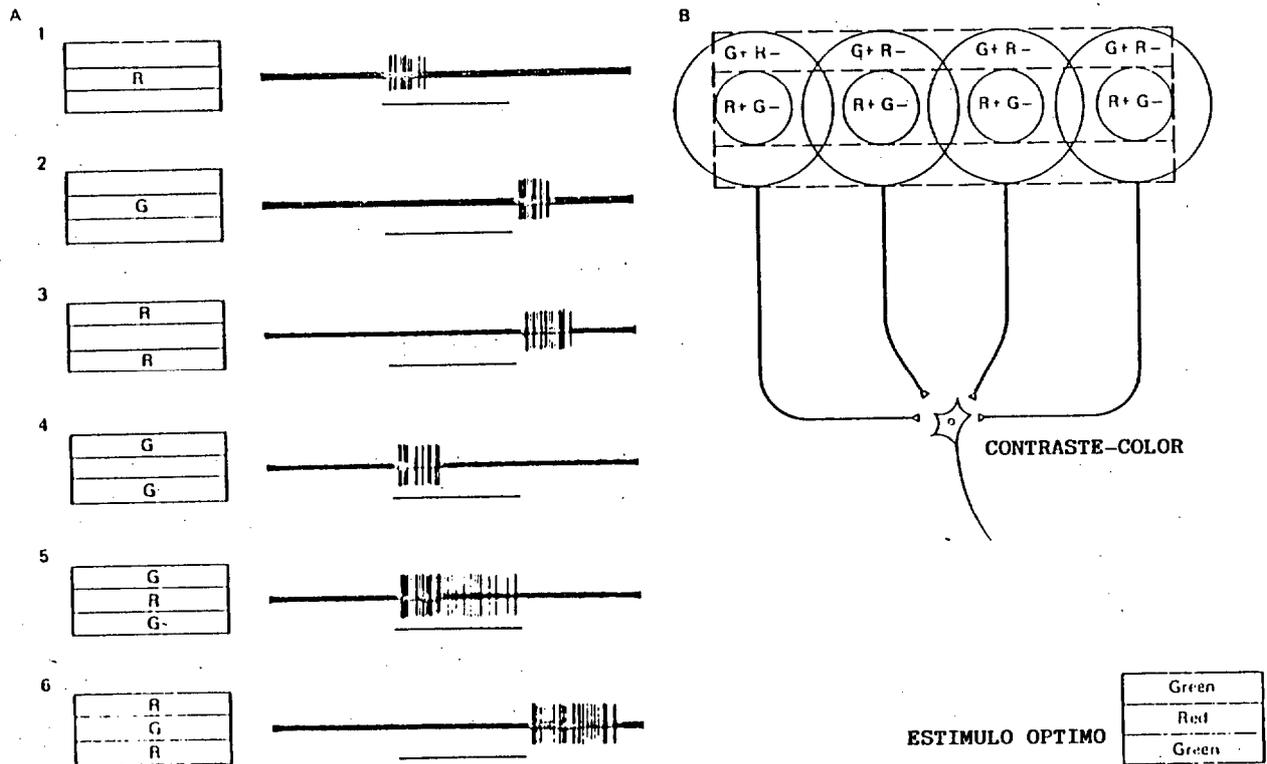


Fig. 2.5 Células de color complejas

A: Respuestas de estas células para barras rojo (R) y verde (G) con varias orientaciones.

B: Células corticales doble oponentes de contrastes en color pueden sinápticamente para formar células corticales complejas.

2.2 CELULAS CODIFICADORAS DE COLOR EN PECES

2.2.1 Introducción

Los receptores en la retina de los cypridos son bastones, conos y dobles conos, los cuales tienen un miembro más prominente llamado cono principal y otro menos llamado cono accesorio.

Hay peces monocromáticos, por ejemplo el kat suwunus pelams, que tiene un solo pigmento visual, aún cuando está dotado de conos y bastones, sin embargo ha acomodado su comportamiento para sacar el máximo partido entre la luz espacial y los objetos relativamente oscuros. Hay peces con dos o tres clases de conos, estando cada cono asociado a un pigmento visual determinado.

Según (Stell, 1967) los receptores hacen contacto con las células horizontales y bipolares en una distribución sináptica llamada triada envolvente.

Las células horizontales están distribuidas en tres capas que componen las C.H. externas, C.H. intermedias y C.H. internas.

Las células bipolares están conectadas a bastones y conos principales, algunas a los bastones y otras sólo a los conos accesorios.

Según Sholes and Morris (1972) los conos principales

son los receptores rojos, los conos accesorios los verdes y los receptores azules.

Las células amacrinas se pueden clasificar en difusas y estratificadas, con sus cuerpos celulares en el margen del núcleo interior y la capa plexiforme interna o interaccial con sus cuerpos celulares en la capa plexiforme externa.

Las células ganglionares pueden dividirse en diferentes grupos de acuerdo con su arborización dendrítica. Los distintos tipos de conexiones que se pueden dar son:

a) Una célula bipolar es presináptica a otras dos células que pueden ser amacrina ganglionar o dos células amacrinas.

b) También existe un feedback de amacrina a célula bipolar.

c) Existe una sinapsis en serie de bipolar hacia la amacrina y evidentemente hacia la célula ganglionar.

2.1.2 Codificación a nivel de salida.

Las características espectrales de las células ganglionares son muy parecidas al de las horizontales bifásicas. Sin embargo son encontradas células ganglionares con características espectrales comparables al de las células monofásicas y trifásicas y, como en las mismas, dependen de la posición del estímulo en el campo receptivo.

La fig. 2.6 muestra el espectro de acción de los tres tipos de respuestas de las células ganglionares codificadoras de color en la retina del goldfish.

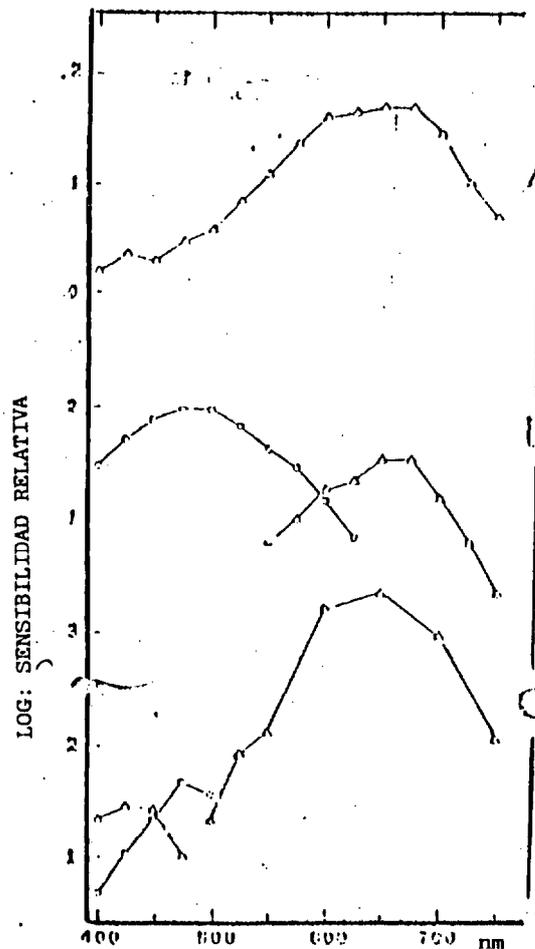


Fig. 2.6 "Respuestas de las C.G. del goldfish"

Solamente los canales rojos contribuyen a las respuestas monocromáticas (OFF) (A).

Canales rojos (OFF) y verdes (ON) contribuyen a las respuestas bicromáticas (B).

Canales rojos (OFF), verdes (ON) y azules (OFF) determinan las respuestas tricromáticas.

La estimulación de la retina con spot pequeños de luz produce varios tipos de respuestas en las células ganglionares.

1. Las de tipo simple dan sólo una respuesta ON o OFF. El signo (ON o OFF) de la respuesta no cambia cuando ha variado la longitud de onda del estímulo. Para algunos casos estudiados la curva de respuestas espectrales son parecidas a la de las células horizontales monofásicas. El pico está alrededor de 650 nm.

2. El espectro del segundo tipo de células es comparable en sus respuestas a la de las células horizontales bifásicas. Pueden ser rojo-ON, verde-OFF o rojo-OFF, verde-ON. Las respuestas bicromáticas fueron descritas por Wolbarsht (1961), y se encontró este tipo de respuestas en el goldfish que habita en temperaturas de 17 C. Sin embargo para peces cuyo habitat se encuentra en aguas de temperaturas de 10-12 C las respuestas monocromáticas son las más comunes. Las

células ganglionares se clasifican según el tamaño del campo receptivo en:

1. - Doble oponentes.
2. - Color-opponentes.
3. - No oponentes centro-periferia.
2. - Células más complejas.

Daw (1968) clasifica las células ganglionares del Goldfish en:

1. - Unidades tipo O

Sus respuestas son:

- 1a) Centro rojo-ON, verde-OFF y periferia rojo-OFF, verde-ON.

Se ha encontrado células de este tipo en el 22% de las estudiadas.

- 1b) Centro verde-ON, rojo-OFF y verde-OFF, rojo-ON en la periferia.

Son el 27% de las estudiadas.

2. - Unidades tipo P.

- 2a) On al rojo, OFF al verde. 3% de las estudiadas.

- 2b) ON al verde, OFF al rojo. 2% de las estudiadas.

3. - Unidades tipo Q.

3a) ON en el centro OFF en la periferia.

Representan el 9%.

3b) OFF en el centro ON en la periferia.

Representan el 5%.

2. - Células no codificadoras de color.

Representan el 6%.

5. - Células más complejas.

Representan el 26%.

Según Raynauld (1972) las células dobles oponentes se pueden caracterizar por:

1. a) En el centro entrada ON de conos rojos y bastones y OFF de conos verdes. En la periferia entrada OFF de conos rojos y bastones y ON de conos verdes.

1. b) En el centro entrada inhibidora de rojos y bastones, entrada excitadora de conos verdes. Entrada excitadora de conos rojos y bastones, entrada inhibidora de conos verdes en la periferia.

1. c) Entrada excitadora azul y verde en el centro e igual en la periferia.

1. d) Todas las células doble oponentes con entrada de bastones también tienen entrada de conos.

1. e) La característica anterior es debida a que las células bipolares que conectan con bastones también conectan con los conos principales (conos rojos).

1. f) El diámetro del campo receptivo es mayor para la periferia que para el centro.

1. g) El tamaño del centro es mayor para el verde que para el rojo y mayor para los bastones que para los conos. Wagner et al (1963).

1. h) Este tipo de organización del campo receptivo es el apropiado para medir contrastes simultáneos de color.

Las células color-oponentes tienen entrada de receptores rojos con entrada oponente de los receptores verdes sobre la misma área o en un área ligeramente más ancha.

2.3 CELULAS CODIFICADORAS DE COLOR EN ANFIBIOS

2.3.1. - Aspectos generales.

La visión en color de las ranas y renacuajos es muy interesante puesto que tienen dos tipos de bastones.

La rana tiene una retina no simple, y al tener su corteza cerebral poco desarrollada, ofrece una retina muy elaborada, como ocurre en otros vertebrados inferiores. Esto contrasta enormemente con las retinas simples de los animales superiores, como el gato, mono ect..

Ya Granit (1974) en sus estudios pioneros de visión en color sugería la presencia de mecanismos de visión en color en la retina de la rana, concretamente encontró que algunas ganglionares mostraban respuestas de tipo modulador. Esto, y resultados neurofisiológicos, ha puesto en evidencia que los anfibios tenían visión en color.

2.3.2 Fotorreceptores.

La capa de fotorreceptores de la rana está compuesta de:

- a) Conos simples (o sencillos).
- b) Conos dobles . . .

c) Bastones verdes.

d) Bastones rojos.

Los conos dobles están compuestos por el cono principal y el cono accesorio.

Según (Nilson, 1964) hay del orden de un millón distribuidos de la siguiente manera:

a) Conos sencillos el 20%

b) Conos dobles el 14%

c) Bastones verdes el 12.4%

d) Bastones rojos el 50.7%

Los picos del fotopigmento están en 502 nm. para los bastones rojos, 432 nm. para los bastones verdes, 575 nm para los conos simples y en los conos dobles está en 575 nm en el principal y 502 en el accesorio (Liebman et al. 1968).

Los bastones rojos son análogos a los bastones encontrados en otras retinas de vertebrados. Su clasificación como fotorreceptores-bastones está basada en la morfología, mientras que en términos de funcionalidad son más parecidos a los conos. Según (Liebman, 1968) el 35% de los receptores son conos y de estos el 60% de los mismos son conos dobles y sólo el 8% de los bastones son verdes.

La señal de salida de estos fotorreceptores tiene dos parámetros significativos :

a) Una función logarítmica de la iluminación. Es responsable de la velocidad de activación de los pigmentos.

b) Una función de la historia de la iluminación, que está relacionada con la cantidad de pigmento activado.

Según Reuter (1972) si los bastones verdes tuvieran un umbral tan bajo como el sistema de bastones rojos y este tipos de bastones estuvieran conectados a células superiores del sistema nervioso, entonces la rana tendría capacidad de ver en color a intensidades inferiores al umbral de los conos.

Investigaciones sobre visión en color en la rana ha demostrado que utiliza dos tipos de respuestas: una fototáctica y otra optomotor. Muntz(1962) testeó la preferencia de la rana a varios pares de luces espectrales y encontró que la rana mostraba una mayor preferencia por las de corta longitud de onda.

2.3.3. - Interacción lateral.

Las interacciones laterales entre fotorreceptores (Nilsson, 1964) se pueden resumir en:

- a) De conos sencillos con tres bastones rojos.
- b) De la mayoría de conos dobles con tres bastones rojos.
- c) De un bastón rojo en un cono sencillo.
- d) No existen interacciones entre bastones verdes ni los conos accesorios en las parejas.
- e) Existe inhibición lateral a nivel de fotorreceptores que proporciona detección de contrastes.
- f) Si embargo, Schippperheyn (1965) piensa que no hay interacción lateral entre distintos fotorreceptores, pero sí entre los del mismo tipo.
- g) Puede existir interacción lateral de la fase rápida de adaptación a la oscuridad.
- h) Según Granit (1942), experimentos sobre la adaptación a la oscuridad sugiere que los bastones verdes se adaptan más rápidamente que los bastones rojos.

2.3.4 Células bipolares

A nivel de células bipolares existen del orden de 2.5 a 3.5 millones de células de varios tipos:

a) Bipolar grande con árbol dendrítico grande que contacta casi exclusivamente con conos.

b) Bipolar pequeña que contacta con pocos fotorreceptores, con conexiones ganglionares en niveles específicos.

c) Bipolar pequeña que penetra en la capa de fotorreceptores por medio de Clubs de Landolt.

2.3.5 Células de nivel de salida.

Se llama campo receptivo excitador (C.R.E.) a la extensión de la retina que provoca la respuesta de una célula aislada al ser estimulada por puntos de luz.

En las células ON-OFF las componentes no están dispuestas concéntricamente en el C.R.E. En cambio, en casi todas las células ganglionares el C.R.E. está rodeado de un campo receptivo inhibitor (C.R.I.) que no genera respuesta al ser estimulado, sino que contrasta las señales originadas en el C.R.E. (Barlow, 1953)

Maturana (1960) clasificó las células ganglionares de la rana en cuatro grupos y puso de manifiesto que la razón de ser de estas cuatro capas era solamente funcional.

Grusser (1975) establece que las respuestas de los grupos 2 y 3 están determinadas por los siguientes parámetros.

- a) Velocidad angular.
- b) Tamaño del estímulo.
- c) Contraste sobre fondo blanco o negro.
- d) Situación del recorrido que atraviesa el campo receptivo.

La clasificación de Maturana es revisada por Backstron et al. (1975) que distinguen toda una gama de células entre los grupos 1 y 2, aunque justifican la división anterior. Muestran como los diferentes tipos de receptores contribuyen a los campos excitador e inhibitor de las ganglionares de la siguiente manera:

- 1.- Los conos activan directamente el C.R.E. a través de las bipolares.
- 2.- Algunas señales excitadoras de conos también lo hacen a través de las células amacrinas u horizontales.
- 3.- Las señales procedentes de los bastones verdes pasan a través de las células horizontales a las bipolares.
- 4.- Las señales que llegan desde el C.R.I. se esparcen lateralmente a través de las amacrinas.
- 5.- Tanto los conos como los bastones contribuyen

al C. R. I. .

La mayoría de las células ganglionares registradas en la retina de la rana, según la clasificación de Maturana, son células codificadoras de color, excepto las detectoras de brillantez enrarecida.

Por ejemplo, entre los varios tipos de células ganglionares registradas en la Rana *Teporotia* Backstrom et al. (1975) encontraron que algunas daban respuestas ON para estímulos de corta longitud de onda y OFF para largas, proponiendo los bastones verdes para las ON mientras que las OFF reflejaban la activación de otro tipo de conos. La sensibilidad espectral de las mismas se muestra en la fig. 2.7.

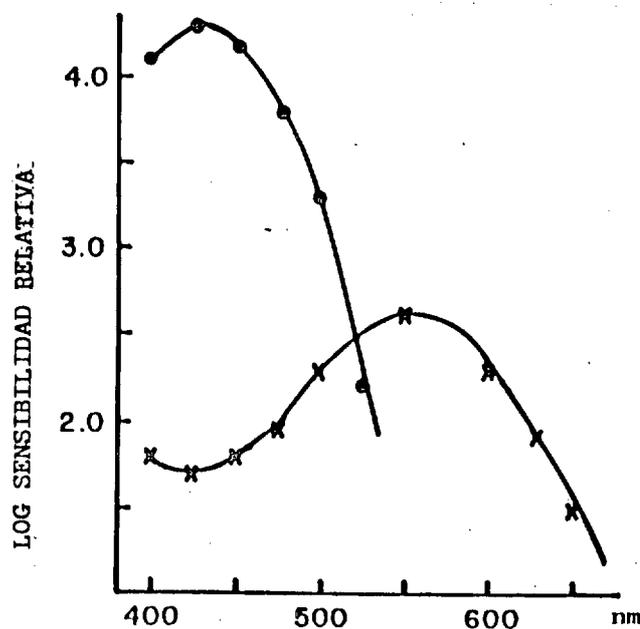
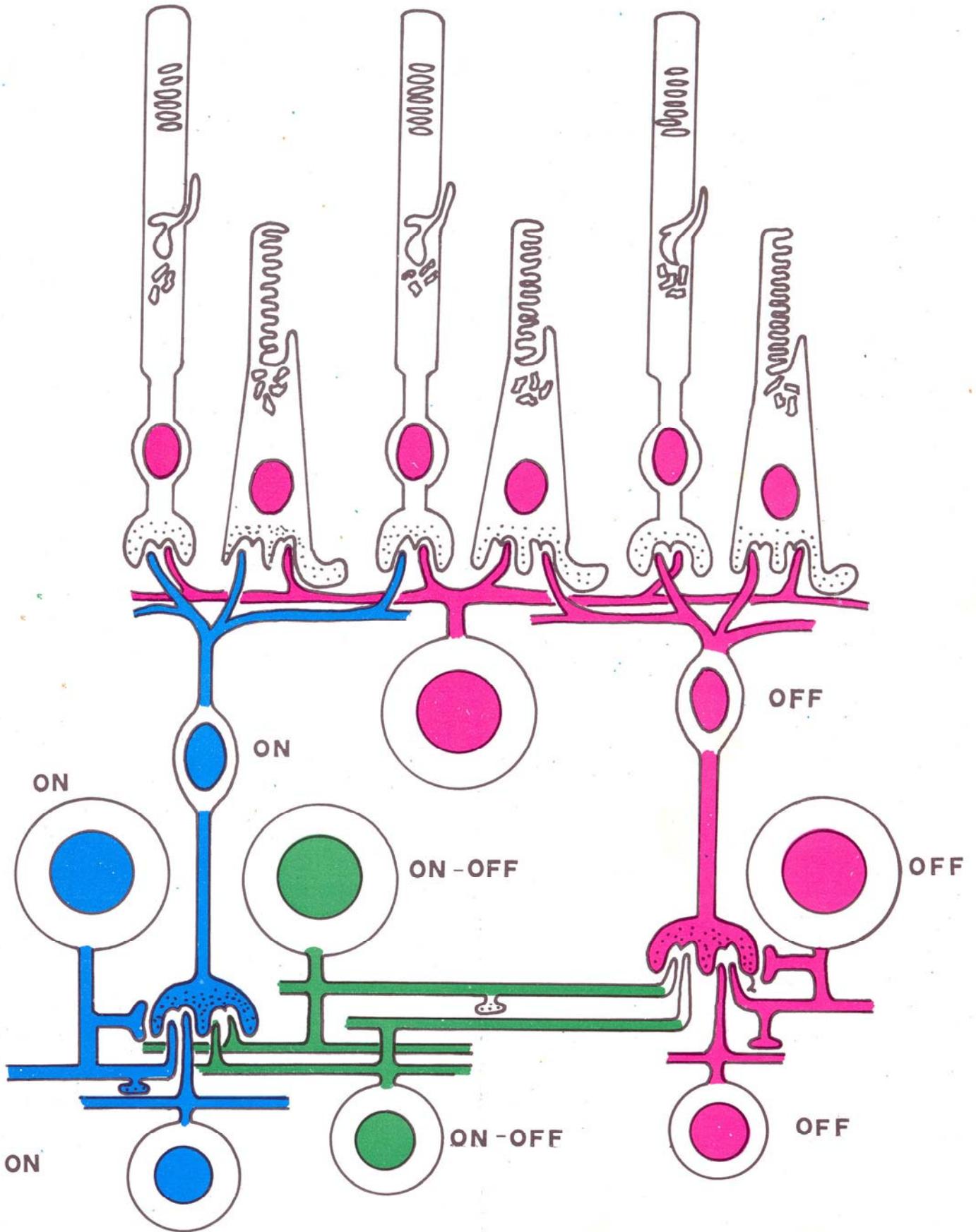


Fig. 2.7 Sensibilidad espectral ON (●) y OFF (*) de los registros de las células ganglionares



CODIFICACION DEL COLOR EN LOS ANFIBIOS

Basándose en resultados anatómicos y fisiológicos Miller et al. (1986) proponen un diagrama de los canales ON, OFF y ON-OFF de la visión en color en la retina de los anfibios. Los canales ON y OFF, mostrados en la lámina IV, están establecidos en la retina externa donde los fotorreceptores despolarizan (ON en azul) e hiperpolarizan (OFF en rojo) las células bipolares. Las células horizontales realizan una traslación lateral de la información que ayuda al antagonismo de la respuesta periférica de algunas bipolares. El modelo muestra que la codificación del color se realiza a través de conexiones internas retinales a lo largo de todas las capas neurofisiológicas donde las amacrinas y ganglionares ON reciben sus principales entradas desde las bipolares despolarizadas, mientras que las amacrinas y ganglionares OFF reciben entradas desde las bipolares hiperpolarizadas. Las del tipo ON-OFF reciben entradas desde ambos tipos de bipolares.

2.4 CELULAS CODIFICADORAS DE COLOR EN LAS AVES

2.4.1 Aspectos generales

El sistema visual de las aves, es de gran interés científico, por la perfeccionada estructura de su ojo y retina, por el papel presuminante que la vista tiene en estas especies, y por la naturaleza de la organización neuromecánica que le proporciona tan alto grado de visión estereoscópica tridimensional precisa.

Es muy poco conocido lo que se ha hecho sobre la visión en color de las aves y, sin embargo, la retina de pichones y pollos contienen un gran porcentaje de conos.

En todos los experimentos hechos hasta ahora se ha comprobado que los segmentos exteriores de los conos contienen solamente un pigmento visual.

2.4.2 Capa de entrada: fotorreceptores.

El número total de fotorreceptores en la retina de las aves es del orden de 1.920.000 con una dispersión de 61.4 micras²/célula y según Morris (1970) en la retina del pollo hay bastones, dobles conos y tres tipos de conos sencillos. Se ha encontrado que los conos principales y los conos dobles tienen gotas de aceite.

La varianza en la curva para la absorción de gotas de aceite es alta, pero se puede decir que las gotas de aceite son filtros de onda corta y que hay gotas de aceite rojas con un corte en 570-600 nm, naranjas en 540-550 nm, amarillas en 500-520 nm y quizás también gotas verdes con un corte en longitudes de ondas aún menores. Esta distribución de las gotas de aceite en la retina varía de una parte a otra de la misma.

La distribución de fotorreceptores en la retina de las aves se hacen en dos campos:

a) Campo rojo.

Está situado en el cuadrante dorsal posterior de la retina y contiene sólo conos simples.

b) Campo amarillo.

Se corresponde con el resto de la retina y contiene más bastones y dobles conos.

Las curvas de absorción características de las gotas de aceite en la retina de las aves se muestran en la fig. 2.8. Las curvas (A) corresponden al campo amarillo y (B) al campo rojo.

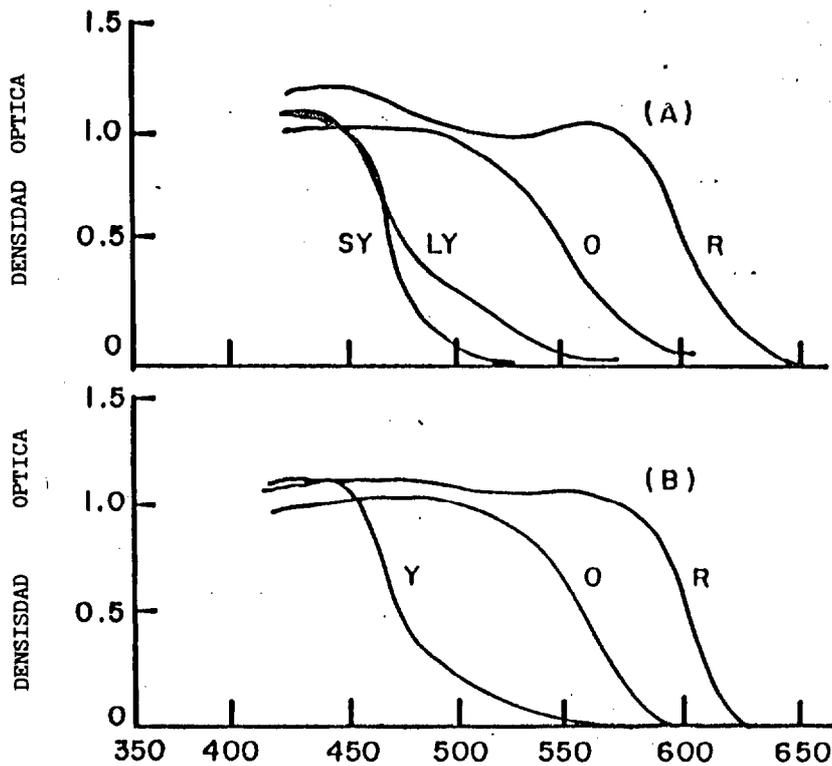


Fig 2.8 Curvas de absorción del campo rojo y amarillo en la retina de las aves.

Por todo lo anterior y debido a una falta de evidencia en más de un pigmento de los conos, ha dado lugar que varios autores sugieran que los pichones y pollos puedan ver en color porque las gotas de aceite actúan como

filtros espectrales.

La tabla II-1 muestra los receptores y picos de los diferentes pigmentos encontrados en la retina del pichón según diferentes autores.

TABLA II-1

| FOTORRECEPTOR | PICO | FUENTE |
|---------------|-------------|-----------------|
| Bastones | 500 | Liebman (1972) |
| | 502 | Bridges (1962) |
| | 503 | Bowmaker (1977) |
| | 507 | Zueva (1977) |
| Conos | 400 | Graf and Norren |
| | 415-480 | Norren (1975) |
| | 413-467 | Zueva (1977) |
| | 544 | Bridges (1962) |
| | 560-575 | Liebman (1972) |
| | 461-514-567 | Bowmaker (1977) |

Resumiendo, se puede afirmar que:

a) La gota de aceite roja debe mover el pico de la sensibilidad del receptor de 562 a 625 nm. en el pichón y a 605 nm. en el pollo.

b) La gota de aceite naranja mueve el pico de 562 nm a 585 nm. Esto daría a estos pájaros tres picos de conos receptores con picos en 562 nm, 625 nm y 625 nm.

c) Los bastones contienen el fotopigmento A₁-base teniendo su máximo de absorción en 503 nm.

d) Los conos tienen picos en las diferentes partes del espectro.

c) Hay evidencias de que la paloma es, al menos, tricromática o pentacromática.

d) Han sido encontradas unidades codificadoras de color en la retina, en tálamo y en diencéfalo. (Granda, 1971).

e) Las investigaciones sobre las respuestas de las unidades simples codificadoras de color no han sido suficiente para establecer sus campos receptivos y aislar las entradas cromáticas.

2.4.3 Capa de salida: células ganglionares:

Se clasifican en:

- a) Células ganglionares multiestratificadas.
- b) Células ganglionares uniestratificadas difusas.
- c) Células ganglionares uniestratificadas restringidas.

2.4.3.1 Células ganglionares sensibles al movimiento.

Son descritas por Maturana y Frenk como detectoras de contrastes.

a) Tienen respuestas rápidas transitorias de la región central al ON y OFF.

b) Tienen respuestas débiles o nulas a estímulos estacionarios.

2.4.3.2 Células codificadoras de color.

a) Dan una respuesta selectiva para diferentes longitudes de onda.

b) Tienen potenciales de acción muy pequeños.

c) Debido a la pequeñez de los potenciales de acción y la escasez de los mismos se hace, muy difícil el caracterizar con precisión su sensibilidad

espectral y los mecanismos de adaptación cromática.

d) Tienen respuestas predominantemente al rojo y al azul, lo que demuestra un mecanismo antagonista del color.

e) No tienen respuestas periféricas a ninguna longitud de onda.

2.4.3.3 Células ganglionares detectoras de oscuridad.

a) Tienen campos receptivos grandes y no bien delimitados.

b) No tienen periferia inhibidora.

c) Responden a disminuciones de la luz difusa.

2.4.3.4 Células ganglionares detectoras de luminosidad.

Estas células fueron denominadas por Maturana (1965) detectoras de luminosidad, aunque también las incluyen como detectoras de color.

Esto también concuerda con los trabajos de Miles (1972) en pollos, pero da un porcentaje mayor 32% para este tipo de células que en la paloma.

a) Responden al encendido y apagado, no simultáneamente, de manchas estacionarias.

b) No son selectivas direccionalmente.

c) Son sensibles igualmente a estímulos móviles o estacionarios.

2.4.3.5 Células ganglionares detectoras de contrastes.

a) La región central del campo receptivo responde de forma transitoria.

b) Unas tienen una respuesta más fuerte al ON, otras al OFF y otras tienen respuestas casi iguales.

c) Tienen periferia antagonista que inhibe la respuesta del centro cuando el estímulo se extiende a ella.

2.5 CELULAS CODIFICADORAS DE COLOR EN LOS PRIMATES

2.5.1. - Introducción

Se admite generalmente que la visión en color de los monos macacos está cercana a la visión humana. Las especies investigadas incluyen al Rhesus, el *Cynomolgus* ect.. Se acepta que la visión en color de todas las especies de macacos es muy similar.

Se han hecho registros de células individuales horizontales, bipolares o amacrinas en la retina del mono. No obstante, es importante resaltar que la anatomía del sistema visual del mono difiere en detalles de la anatomía del sistema visual de los peces. Por ejemplo, no se han encontrado dobles conos en la misma, sino conos simples y bastones.

Es evidente que la visión en color en los monos macacos es semejante a la humana, por el hecho de que las sensibilidades espectrales de los receptores son similares.

La diferencia espectral para los pigmentos en los conos del macaco está en los picos 445, 535, y 570 nm, con valores similares para el hombre.

La fovea del macaco no tiene muchos receptores azules (Murray, 1968) y el centro de la misma puede estar

desprovista de ellos, como ocurre en el centro de la fovea humana (Wald, 1967).

Muchos receptores muestran efectos de guía de onda para la luz incidente a lo largo de su eje (Enoch, 1963). Esto puede modificar la sensibilidad espectral de los receptores.

2.5.3. - Células ganglionares codificadoras de color.

Según Daw (1971) las células ganglionares se pueden dividir en:

1.- Células no-oponentes al color (tipo L) con una distribución centro periferia.

Lo más característico de estas células son:

a) Tienen entrada de receptores rojos y verdes pero no de receptores azules.

b) Tienen respuestas fásicas.

c) Tienen una velocidad de conducción mayor que la de células oponentes al color (Gouras, 1969).

2.- Células oponentes al color.

a) Son excitadas por receptores rojos e inhibidas por los verdes

b) Son excitadas por los receptores verdes e inhibidas por los rojos.

c) Reciben entrada de los receptores azules y de uno de los otros colores.

d) Todas las células de este tipo tienen respuestas tónicas.

e) La velocidad de conducción es mucho más lenta que las células no oponentes al color (Gouras, 1971).

f) La velocidad de conducción de una célula está en relación con el tamaño de su axón.

g) Las células con campo celular grande tienden a tener axones más largos y las de cuerpo celular más pequeño tienden a tener axones más pequeños.

h) Esto sugiere que las células color-opponentes con velocidad muy lenta son ganglionares enanas.

i) Las células no oponentes al color son células ganglionares difusas o estratificadas (Gouras, 1971).

j) Las células oponentes al color como las ganglionares enanas se encuentran cercanas a la fóvea y las no oponentes al color en la periferia de la retina.

k) Muchas de las células ganglionares tienen entrada directa de conos y de bastones.

l) Las ganglionares con entrada de bastones tienen una latencia mucho mayor que la de entrada de conos.

m) Todas las ganglionares con respuesta fásica, es decir, las células no codificadoras de color, tienen entrada de conos y bastones.

n) También se ha encontrado que las células con campos receptivos retirados de la fovea tienen entrada de bastones y conos.

La clasificación que hace Monasterio and Gouras (1975) de las células ganglionares en la retina del mono es:

1. - Celulas color-oponentes

1a) Estas células representan un alto porcentaje de la población estudiada, el 65%.

1b) Tienen una organización concéntrica en sus campos receptivos.

1c) Una gran mayoría de ellas tienen un canal de conos para la respuesta central y dos canales de diferentes conos para la respuesta periférica.

1d) Un 6% de estas últimas tienen dos canales de conos en el centro y uno en la periferia.

1e) La respuesta de estas células se pueden apreciar en la fig. 2.9

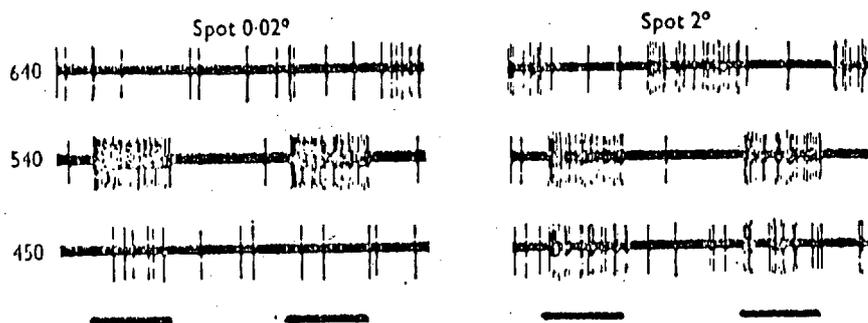


Fig. 2.9 Respuestas de las células color-oponentes.

1e.1) Son excitadas entrada de canales de conos verdes en el centro (para un spot pequeño) e inhibidas por canales de conos rojos en la periferia.

1e.2) Para spot grandes son excitadas por los conos azules (450 nm) o verdes (540 nm) e inhibidas si los canales son rojos (640 nm).

Las conclusiones obtenidas por estos resultados indican que el centro del campo receptivo de estas células, reciben entrada de canales de conos verdes en el centro y entrada de conos rojos en la periferia. Hay evidencia de que los conos azules no influyen en estas células.

2. - Células con color oponencia disimulada

Las características de estas células son:

2a) Algunas de estas células no muestran respuesta color-oponente para fondo neutro (blanco-negro).

2b) Con fondo blanco y spots pequeños el centro es inhibidor para estímulos verdes o rojos y más para el azul. Este hecho es mucho más marcado para spots grandes con fondo rojo si se excita con luz verde, siendo imperceptiva cuando la luz es roja, lo que indica una oposición al color.

2c) Con fondo amarillo y para grandes spots producen un balance intermedio entre los canales rojos (inhibición) y azules (excitación).

Las respuestas de este tipo de células se muestran en la fig. 2.10.

Las conclusiones que obtenemos de lo anterior son:

1.- Estas células reciben entrada inhibitoria de canales de conos rojos en el centro y excitatoria de conos verdes en la periferia.

2.- La oposición al color se cancela para fondos neutros.

3.- Estas células tienen una oposición al color disimulado.

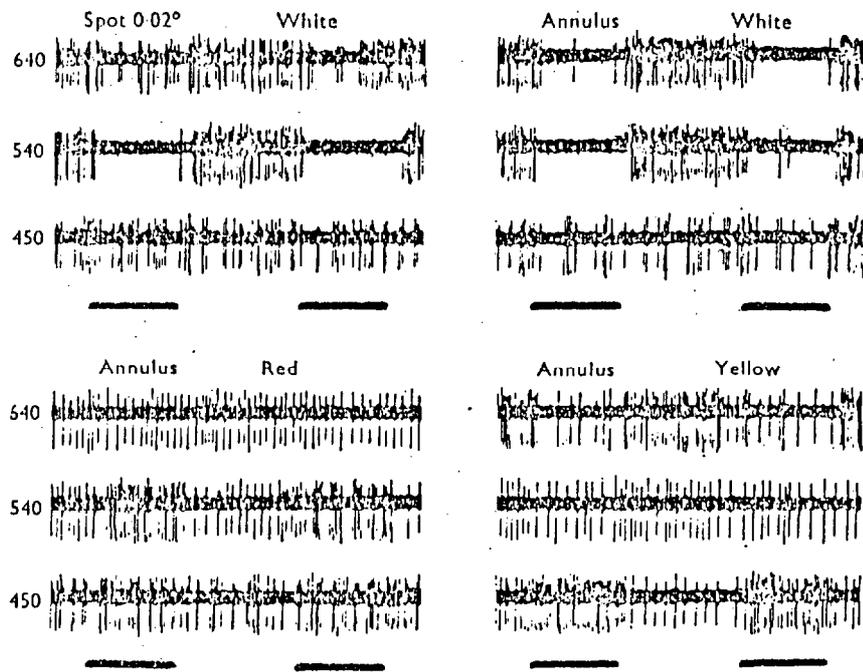


Fig. 2.10 Respuestas de las células canceladoras de color con organización centro-periferia.

3.- Células tricromáticas color-oponentes

3a) Algunas de estas células reciben entrada desde los tres canales de conos. [fig 2.11].

3b) Tienen entrada de conos verdes en el centro y entrada combinada de canales azul-rojo en la periferia.

3c) Para pequeños spot centrados en el campo receptivo producen respuestas inhibitorias, pero los mismos son más efectivos en la mitad del espectro.

3d) Para spot grandes (annulus) la respuesta inhibitoria es mucho más clara para estímulos de todas las longitudes de onda, pero no revela una oponentia al color.

3e) Con fondo rojo, sin embargo, tienen una respuesta excitatoria para cortas longitudes de onda.

3f) Con fondo azul, dan respuestas excitatorias para luz roja, sugiriendo una interacción tricromática.

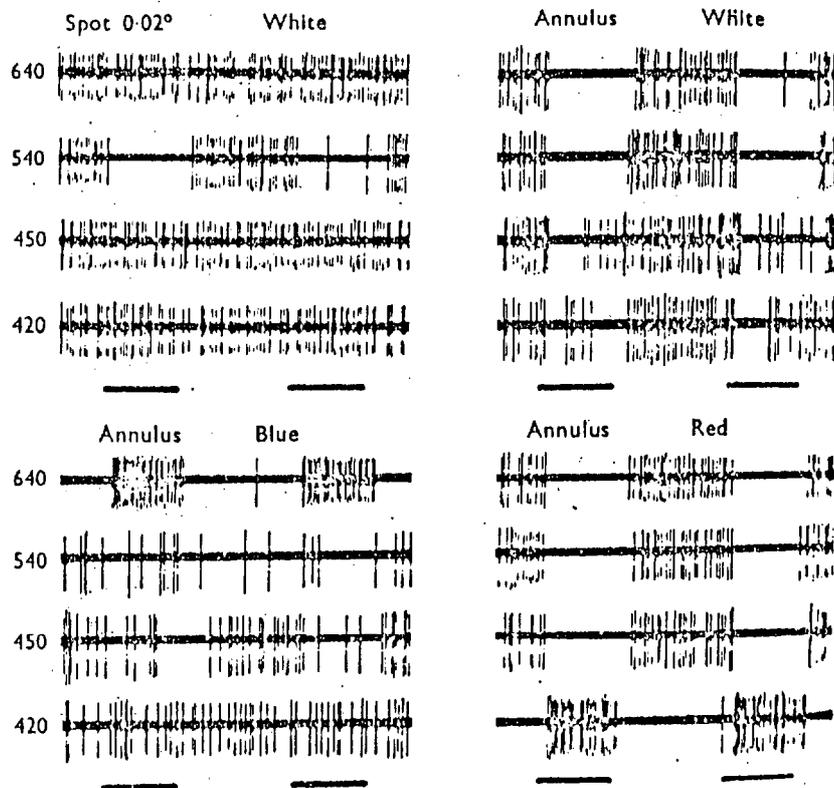


Fig. 2.11 Respuestas de las células color-opponentes para estímulos monocromáticos.

Las conclusiones que podemos sacar de lo anterior son:

- 1) Estas células reciben entrada inhibitoria de conos verdes en el centro y excitatoria de conos rojos en la periferia, que son disimuladas con fondos neutros.

Hay otra variedad de células color oponentes que involucra la interacción entre los tres canales de conos. [fig 2.12].

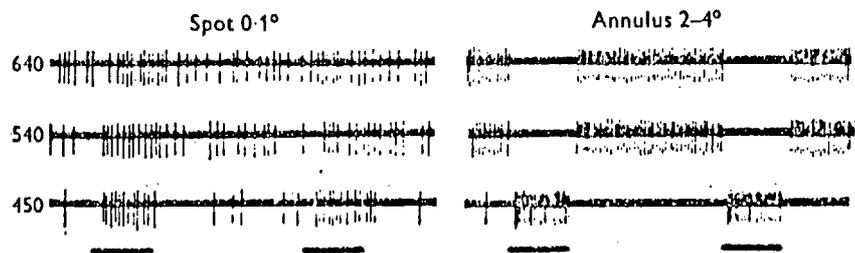


Fig. 2.12 Respuestas de las células color-opponentes tricromáticas.

Este tipo de células:

a) Son excitadas para longitudes de onda corta, aunque para longitudes de onda largas dan alguna respuesta.

b) Para grandes spot son excitadas por cortas longitudes e inhibidas por largas longitudes de onda.

La conclusión que se obtiene es que estas células reciben entrada excitatoria de canales de conos azules en el centro y entrada inhibitoria de canales verdes y

rojos en la periferia.

Como resumen de lo expuesto se obtiene:

1) El 97% de estas células tienen una organización concéntrica.

2) El 94% reciben solamente canales de conos en el centro.

3) El 6% tienen entrada de canales rojos y verdes en el centro.

4) El 3% no tiene una organización concéntrica del campo receptivo.

5) Las células color-oponentes con campos receptivos concéntricos reciben entrada solamente de un canal de conos en el centro.

5a) Tienen el diámetro del campo receptivo pequeño.

5b) Son bastante numerosas para excentricidades bajas de la retina.

5c) Son mucho más numerosas que las células que reciben entrada de dos canales de conos en el centro.

Células banda-ancha

Según Gouras (1971) se caracterizan por:

a) Una fracción de estas células 24% tienen campos receptivos concéntricos con centro ON-OFF, pero no mantienen respuestas oponentes al color.

a1) Tienen amortiguamiento periférico con tendencia transitoria.

a2) Muestran una respuesta transitoria para estímulos (grandes y pequeños) dando una respuesta similar en todas las partes del espectro.

b) El 4% son células color-oponentes.

b1) El 75% de estas tienen periferia sensible al rojo, con centro ancho-banda, siendo similares a las del tipo IV descritas por Wiessel and Hubel en el núcleo geniculado del mono.

b2) Las respuesta de estas células con periferia sensitiva al rojo son:

b2.1) Para pequeño spot en el centro producen respuestas similares para todas las longitudes de onda.

b2.2) Para spot grandes dan respuestas OFF para largas longitudes de onda y ON para cortas longitudes de onda.

Células no concéntricas

Se pueden distinguir dos tipos:

a) Células no color-oponentes

Estas células muestran respuestas fásicas.

b) Células sensibles al movimiento

Se distinguen dos subtipos.

b1) Muy sensibles al movimiento.

b2) Las que son color-oponentes y tienen grandes campos receptivos . [fig. 2.13]

En resumen:

1. - Células color oponentes

a) Células color-oponentes con un canal de conos en el centro:

a1) Tienen el diámetro del campo receptivo pequeño.

a2) Están localizadas en bajas excentricidades retinales.

a3) Son mucho más numerosas que las que reciben entrada de dos canales de conos en el centro.

b) Células color-oponentes con dos canales de conos en el centro:

b1) Son menos numerosas que las de un solo canal central.

b2) El diámetro de su campo receptivo es mucho mayor.

b3) Se encuentran en las excentricidades más bajas de la retina.

c) Las células de banda ancha con antagonismo periférico tienen un centro grande y su diámetro se incrementa notablemente con la excentricidad retinal.

c1) Las no concéntricas con respuestas fásicas tienen diámetros muy grandes y se encuentran en bajas excentricidades retinales.

La distribución retinal de estas células se muestra en la tabla II. 2.

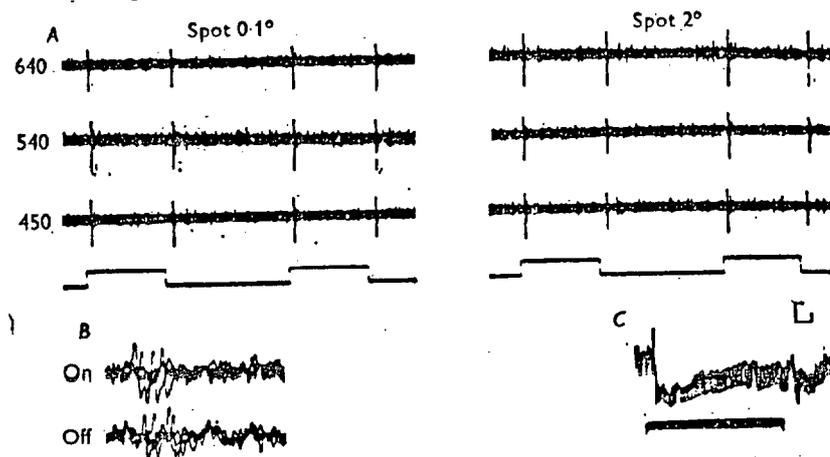


Fig. 2.13 Respuestas de las células no-concéntricas.

TABLA II.2

| CLASE | TIPO | Excentricidad retinal | | | |
|---|--------|-----------------------|---------|---------|----------|
| | | (0-.5°) | (.5-2°) | (2-10°) | (10-40°) |
| 1. Color- oponentes concéntricas | G+/R- | 22 | 33 | 35 | 5 |
| | G+/M- | 1 | 1 | 2 | - |
| | G-/R+ | 5 | 10 | 15 | - |
| | G-/M+ | - | - | 3 | - |
| | R+/G- | 7 | 24 | 45 | - |
| | R+/C- | - | 1 | 2 | - |
| | R-/G+ | 4 | 13 | 10 | 1 |
| | R-/C+ | - | - | 2 | - |
| | Y+/B- | 2 | 4 | - | - |
| | Y-/B+ | 4 | 4 | 2 | - |
| | B+/Y- | 2 | 5 | 11 | 1 |
| 2 Color oponentes no-concéntricas | B+ Y- | 2 | 2 | 1 | - |
| | B- Y+ | - | 1 | - | - |
| | R+ G- | 2 | 1 | - | - |
| 3 Banda-ancha no-oponentes | ON/OFF | 2 | 4 | 36 | 27 |
| | ON/OFF | 2 | 5 | 26 | 8 |
| 4 Banda-ancha color- oponentes | Y+/R- | 1 | 6 | 4 | - |
| | Y+/G- | - | 3 | 1 | - |
| | W+/R- | - | 1 | 1 | - |
| | Y-/R+ | 1 | 1 | - | - |
| | Y-/G+ | - | 1 | - | - |

En la tabla las abreviaciones B, G, R son respectivamente las entradas de los tres tipos de conos para pigmentos de 445, 535 y 570 nm; las abreviaciones C, Y, M, y W para las combinaciones (B+G, R+G, R+G y R+G+B). Las concentraciones centro-periferia se respresenta por / y las respuestas excitatorias e inhibitorias por + y -.



III PROCESOS INSPIRADOS EN TECNICAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
LAS PALMAS DE G. CANARIA
N.º Documento 340.931
N.º Copia 340.939

PROCESOS INSPIRADOS EN TECNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

3.1. - Segmentación y clusterización.

3.1.0 Introducción.

La creencia de los neurofisiólogos y psicólogos de que la figura y el fondo constituyen uno de los problemas fundamentales de la visión, se ve reflejado en el uso que hacen los investigadores que trabajan en el campo de la visión del proceso denominado segmentación.

El término segmentación ha sido ampliamente usado y posee distintos significados, según el usuario del mismo. Nosotros lo empleamos para la operación de analizar un objeto sobre un fondo, dividiendo la imagen en diferentes partes, cada una de las cuales tiene un significado propio para cada observador.

En todos aquellos problemas en los que es necesario reconocer las distintas partes de una escena, se requiere una segmentación previa de la imagen en el conjunto de sus partes .

El problema general que se plantea es un problema de percepción y no admite soluciones analíticas sencillas, aunque para determinados tipos de imágenes puedan encontrarse soluciones heurísticas.

A este respecto indicaremos que el concepto de segmentación suele incluirse dentro de otro más amplio, usualmente denominado "análisis de escenas", donde el proceso de segmentación suele considerarse una etapa más del mismo.

Para la formalización de la idea general Horowitz y Pavlidis han establecido una definición del término de la forma siguiente: " Sea una función imagen $f(x, z)$ definida en un cierto dominio de Z y sea S un subconjunto de Z que contiene al menos dos puntos. Se define un predicado lógico de uniformidad $P(S)$, el cual asigna el valor de verdadero o falso a S dependiendo sólo de la función $f(x, y)$ en S ."

Una segmentación en Z por un predicado P es una partición de Z en n subconjuntos disyuntos S_1, S_2, \dots, S_n de manera que cumplan las siguientes propiedades.

$$1) \bigcup_{i=1}^n S_i = Z$$

$$2) P(S_i) = \text{verdadero para todo } i.$$

En cada subconjunto S_i , el predicado $P(S_i)$ es cierto.

$$3) S_i \cap S_j = \emptyset \text{ para } i \neq j$$

4) $P(S_i \cap S_j) = \text{Falso}$ para $i \neq j$. P es falso en la unión de algún número de miembros adyacentes de la partición.

De esta manera predicados como los siguientes, definidos en Z, son particiones:

" P1(S) = Verdadero, si el valor de la intensidad luminosa dado por $f_i(x, y)$ en cualquier punto de S es el mismo. "

" P2(S) = Verdadero si el tinte del color en cualquier punto de S es el mismo. "

" P3(S) = Verdadero si el valor de la intensidad en dos puntos de S no difieren en más de una cantidad I. "

Distinguiremos, (Riseman, 1977), dos aproximaciones a las técnicas de segmentación de escenas:

a) Formación de contornos: este tipo de técnicas permite encontrar los límites entre regiones.

b) Formación de Regiones: tipo de técnicas que realiza la evaluación de propiedades de zonas de la imagen y agrupa aquellas que son más similares.

Ambos tipos de análisis son equivalentes y conducen a particiones semejantes de la escena en regiones y contornos. No obstante, el primer grupo de técnicas está basado en establecer diferencias (discontinuidad) de propiedades, mientras el segundo se fundamenta en la

similaridad de estas. Prácticamente aunque las dos persiguen el mismo objetivo final, los algoritmos utilizados son diferentes y necesitan de un estudio separado, debido al gran número de métodos existentes.

3.1.1 Detección de Regiones

La clasificación inicial de las técnicas de segmentación basadas en formación de regiones se puede hacer en los siguientes grupos:

- a) Segmentación basada en el espacio de propiedades.
- b) Crecimiento de Regiones.
- c) División y Fusión

La segmentación puede ser considerada como un tipo especial de "clustering" Hall(1979), en el cual algunas medidas corresponden a localizaciones espaciales. La diferencia fundamental entre los métodos de segmentación de imágenes y las técnicas de "clustering", es que en los métodos de segmentación los agrupamientos se establecen en el dominio espacial, mientras que con los de "clustering" el producto final es un agrupamiento realizado en el espacio de medidas.

3.2.0. Segmentación basada en el espacio de propiedades

Esta técnica de segmentación de imágenes es utilizada básicamente en procesos de agrupamiento en el espacio de medidas para definir particiones en dicho espacio. De esta forma a cada pixel en el dominio espacial le es asignado un etiquetado, que naturalmente debe corresponderse con la partición efectuada en el espacio de medidas. Los segmentos o regiones de la imagen se definen de esta forma como las componentes conexas de los pixels que tienen la misma etiqueta. La precisión del proceso dependerá del grado de separación de las representaciones de los objetos en el espacio de propiedades. El proceso funciona en aquellos casos en que la imagen está formada pocos objetos y que los mismos posean propiedades claramente diferenciadoras (tonos de grises sobre fondo uniforme, colores diferentes).

Por clustering se entiende el agrupamiento de medidas (θ) donde el vector medida $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)$ representa las propiedades de un cierto conjunto de formas. A diferencia del problema de clasificación supervisada, "los vectores muestra" no están etiquetados. En este caso, el proceso de clustering es una forma de aprendizaje no supervisado, que tiene como objeto determinar el número de cluster y el grupo al cual pertenece las muestras.

Los procedimientos de clustering que utilizan los pixels como unidad y comparan los valores de estos con otros pixels requieren, al igual que los procedimientos reiterativos del tipo ISODATA, un tiempo de computo excesivo.

Nosotros hemos utilizado los procedimientos de tipo ISODATA en lugar de las técnicas de segmentación basadas en histogramas, que requieren poco tiempo de cálculo, porque en la utilización de los primeros en el espacio cromático el coste del cómputo queda compensado por el grado de fiabilidad de los mismos.

3.3. - Clustering en espacios cromáticos

Desarrollaremos las bases del proceso de definición de agrupamientos y clasificación en espacios de propiedades cromáticas, que pueden aplicarse a otro tipo de espacios de propiedades, sin más que el cambio de algunos matices referidos a la naturaleza de las medidas. Un clasificador de formas está ligado de forma intrínseca a los elementos sensores que le proporciona la información externa. De ellos se extrae un conjunto de números asociados a cada forma, que se denominan usualmente medidas. Estas medidas combinándose entre ellas, eliminan aquella información irrelevante, generándose otro conjunto de números muy estrechamente relacionado con la forma, llamado características o descriptores. [Fig 3.1].

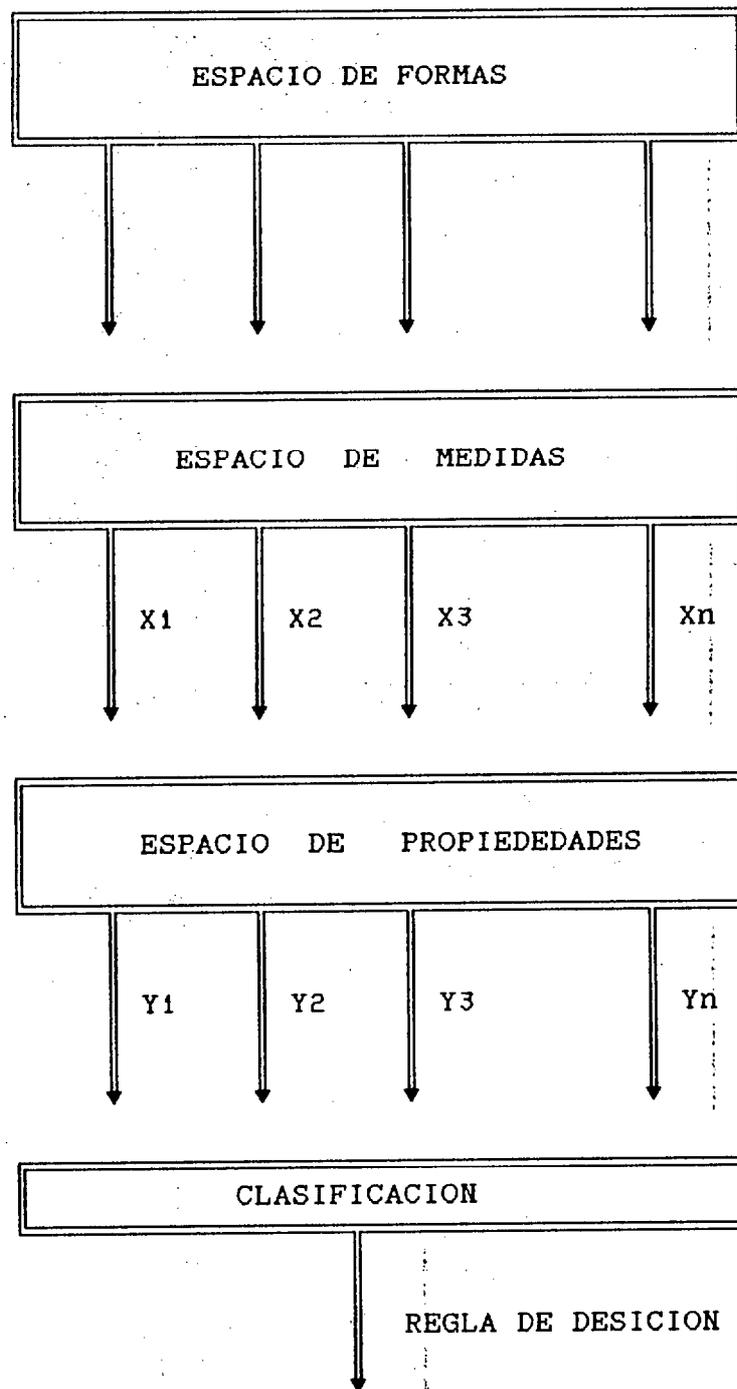


Fig. 3.1 Estructura de un sistema de Reconocimiento.

En nuestro caso generamos a partir de las medidas extraídas del conjunto de la radiación incidente un espacio cromático m-dimensional. Dentro de este espacio se establece determinadas zonas que se van a caracterizar un color determinado, esto es, se genera un conjunto $C = \{ C_1, C_2, \dots, C_n \}$ de n colores definidos a partir de sus m coordenadas cromáticas y establecidos de forma universal. Para este conjunto de n colores definimos otro conjunto de funciones discriminantes $g_i(\theta)$, $i = 1, 2, \dots, n$, de manera que un nuevo color θ especificado por sus coordenadas, pertenecerá a la clase C_i , definida a priori, si se cumple:

$$g_i(\theta) > g_j(\theta) \quad \text{Para } i \neq j \quad [3.1]$$

El problema reside fundamentalmente en encontrar el conjunto de funciones discriminantes adecuado. Una función de este tipo puede suponerse lineal. En este caso:

$$g_i(\theta) = K_{i0} + \sum_{l=1}^m K_{il} \theta_l \quad [3.2]$$

Siendo K_{il} factores de peso y K_{i0} un cierto umbral. Estas funciones producen una división del espacio de color en n regiones de decisión, R_j , de manera que en las mismas es máxima la correspondiente función

discriminante g_j .

En el caso de utilizar funciones discriminantes como los de la expresión [3.2], las regiones de separación serán hiperplanos. También es posible introducir otros tipos de funciones discriminantes.

3.1.4 Transformaciones cromáticas

La adquisición de imágenes cromáticas se ha realizado con una cámara en blanco y negro utilizando tres filtros de color de tipo retinex, según el esquema representado en la fig. 3.2

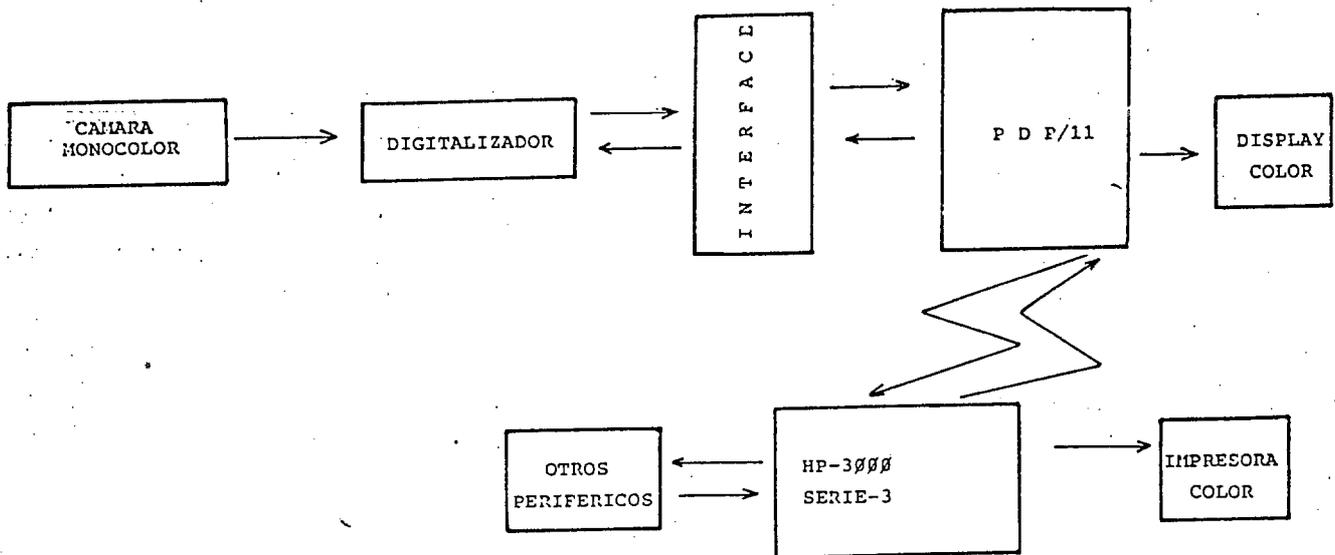


Fig 3.2 "Esquema de adquisición"

De esta manera se obtiene las componentes R, G, B, y la luminancia de la imagen a partir de las anteriores

evaluándose según:

$$f_Y(x, y) = (f_R(x, y) * 0.3 + f_G(x, y) * 0.59 + f_B(x, y) * 0.11)$$

[3.3]

Una vez sintetizadas, se pueden realizar algunas transformaciones para extraer de la imagen alguno de los parámetros que determinan ciertas sensaciones como el tono (relacionado con la sensación de percepción de la cualidad de color propiamente dicha) o bien la de saturación (conectada con el grado de aproximación del color a su blanco equienergético).

Parece bastante reconocido (Daw, 1973) que en condiciones normales de iluminación el ser humano sólo necesita tres de las componentes de un color para identificarlo. Ello es debido que los pigmentos que poseen conos y bastones en una primera etapa fotorreceptora, sólo permiten adquirir la información suministrada por las tres zonas del espectro.

Esto nos hace pensar que los parámetros antes mencionados junto con la luminancia, son de gran poder discriminativo para realizar segmentaciones cromáticas. Para ello procedamos a formalizarlos y a definir algunas transformaciones en los distintos sistemas de coordenadas, que permiten computar los mismos.

De [3.3] y tomando $f_B(x, Y)$ y $f_R(x, Y)$ las coordenadas en el espacio normalizado r, g, b para cada punto son inmediatamente evaluables por:

$$r(x, Y) = \frac{f_R(x, Y)}{\sum_j f_j(x, Y)}$$

$$b(x, Y) = \frac{f_B(x, Y)}{\sum_j f_j(x, Y)} \quad j = R, G, B$$

$$g(x, Y) = \frac{f_G(x, Y)}{\sum_j f_j(x, Y)} \quad [3.4]$$

Este sistema de coordenadas presenta cierto tipo de inconsistencias y anomalías analizadas por Ito (1976). Sin embargo, permite realizar algunas definiciones que posibilitan cuantificar la saturación y el tono empleando una medida para cada color determinado.

Así, con la notación detallada de la fig. 3.2 un punto p de este espacio tridimensional, representado por sus coordenadas normalizadas (r_p, g_p, b_p) tendrá una saturación definida por:

$$\text{SAT}(p) = \frac{\left[(r_p - 1/3)^2 + (b_p - 1/3)^2 + (g_p - 1/3)^2 \right]^{1/2}}{\left[(r_s - 1/3)^2 + (b_s - 1/3)^2 + (g_s - 1/3)^2 \right]^{1/2}}$$

$$\text{SAT}(p) = 1 - \min(r_p, g_p, b_p) \quad [3.5]$$

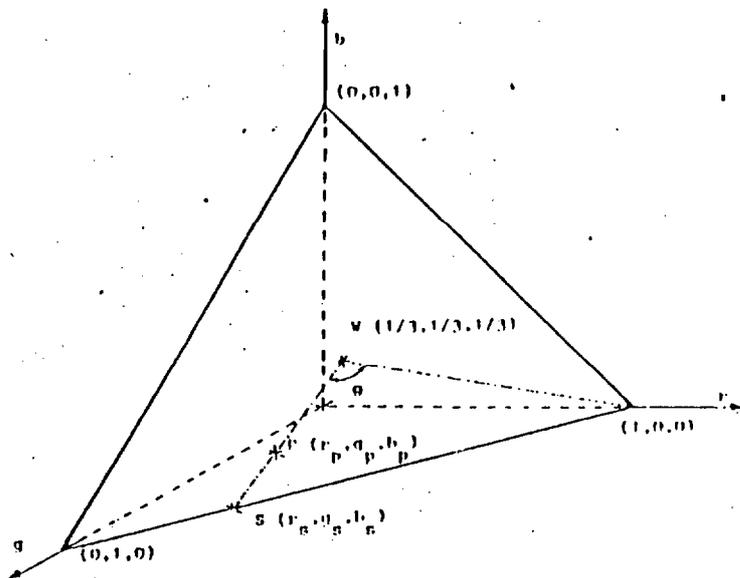


Fig 3.3 "Sistema de coordenadas cromáticas (r, g, b)"

Esta expresión esta justificada por su proximidad al blanco absoluto. Si se toma como color de referencia el rojo normalizado (1, 0, 0) el tono puede igualmente tener una expresión cuantitativa dada por:

$$\text{TON}(p) = \arccos \theta = \arccos \frac{\left[(2r_p - g_p - b_p) / 6 \right]^{1/2}}{\left[(r_s - 1/3)^2 + (b_s - 1/3)^2 + (g_s - 1/3)^2 \right]^{1/2}}$$

[3.6]

De esta manera realizando estas operaciones locales que involucran a las tres componentes cromáticas (r, g, b) podemos encontrar las funciones SAT(x, y) y TON(x, y) representativas del tono y la saturación de la imagen.

Con vistas a posteriores procesos de segmentación primaria, generamos el espacio cromático Y, U, V que tiene más capacidad discriminativa que el anterior (r, g, b) en este sentido. Así mismo, dada las características del sistema de adquisición de imágenes, resulta particularmente interesante la codificación en estas magnitudes, ya que la información destinada a cada una de las componentes cromáticas U, V puede reducirse respecto a las que se necesitarían para describir con cierta precisión un color dado por el sistema [3.4].

Las ecuaciones para pasar de un sistema a otro son las siguientes:

$$Y = 0.3R + 0.11B + 0.59G$$

$$U = B - Y$$

$$V = R - Y$$

En este referencial , los planos de igual energía están representados por planos de luminancia constante. El punto de intersección de estos planos con el eje Y determina el blanco equienergético de ese plano para todos los colores, cuyas coordenadas están en él incluidas. Esto permite definir de una forma simple la medida de la saturación como la distancia al blanco equienergético correspondiente.

Con la notación de la fig 3.4 se tiene que :

$$s(p) = ((U_w - U_p)^2 + (V_w - V_p)^2)^{1/2} \quad [3.7]$$

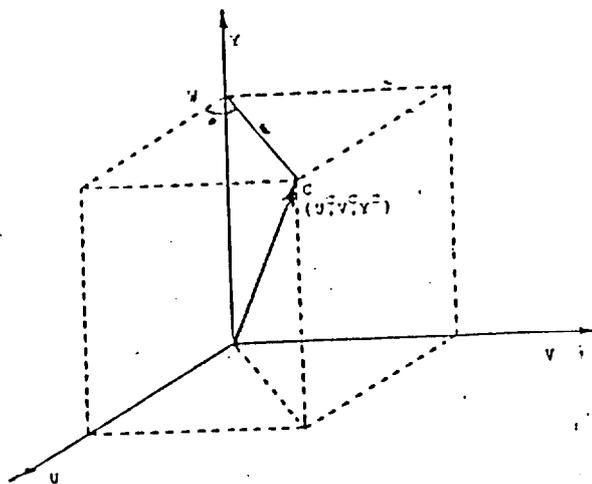


Fig 3.4 Sistema de coordenadas Y, U, V

El tono del color puede ser definido como el ángulo que forma la proyección del vector cromático representativo del color en el plano de luminancia nula ($Y=0$), con la proyección del rojo de referencia, en dicho plano que cae sobre el eje U.

Esto es:

$$t(p) = \arccos \theta = \arccos(U_p/V_p) \quad [3.9]$$

De esta forma todos los colores correspondientes a los puntos de una imagen tendrán su representación en este espacio. El grupo de colores acromáticos estará representado por la recta $U=0, V=0$, donde se hallará toda la gama de grises comprendida desde al blanco al negro absoluto.

El problema de clusterización en el plano de color lo hemos resuelto por procedimientos de tipo ISODATA, utilizando el algoritmo de las KMEDIAS.

3.4.2 Algoritmo de las K-medias

Formulación matemática del problema.

Sea $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n \in R$ un conjunto finito de número de patens. Hacemos una división de los partens en k particiones, siendo $2 \leq k \leq m$.

Llamaremos problema P a la operación de minimizar la función:

$$F(W, Z) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m W_{ij} D(x_j, z_i) \quad [3.9]$$

siendo

$$\sum_{i=1}^k W_{ij} = 1 \quad \text{para } j=1, 2, \dots, m$$

$$W_{ij} = 1 \quad \text{para } j=1, 2, \dots, m$$

$$W_{ij} = 0 \quad \text{para } j=1, 2, \dots, k$$

Siendo $W = [W_{ij}]$ una matriz real de $m \times k$.

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k) \in R^{nk}$$

Siendo $Z_i \in R^n$ es el centro del cluster i y $D(X_j, Z_i)$ es la distancia euclídea entre los X_j y Z_i .

$$i=1, 2, \dots, k$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

El problema P es no convexo con punto de mínimo local que no necesita ser un mínimo global. Cooper (1973)

propuso la formulación arriba indicada donde $D(X_j, Z_i)$ ha tomado las distancias euclídeas.

El algoritmo de las k-medias típico lo hemos interpretado introduciendo los siguientes pasos:

1) Un primer paso inicial es asignar los centro de los clusters.

$$Z_i(1) = 1, 2, 3, \dots, K$$

Paso $l=1$

2) Asignar cada pattern X_j ($j=1, 2, \dots, m$) a sus centros más cercanos lo cual es equivalente a fijar los valores de W_{ij}

Paso $l=l+1$

3) Reconponer los centros Z_i por minimización de $F(z)$.

Si $Z_i(1) = Z_i(l-1)$ para $i=1, 2, \dots, k, \dots$, entonces parar, si no pasar al paso 2.

El algoritmo de las K-medias es frecuentemente usado como técnica de análisis de cluster. La idea básica de estas técnicas es la minimización de una cierta función criterio usualmente tomada una función de las desviaciones entre todos los patterns desde los respectivos centros de los cluster. O sea, minimizar la suma de los cuadrados de las distancias euclídeas entre los patterns y los respectivos centro de los cluster.

La mínima variancia aproximada para la clusterización multidimensional puede ser formulada:

$$\text{Mimimiza } f(W, Z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k W_{ij} \|X_i - Z_j\|^2 \quad [3.]$$

Para

$$\sum W_{ij} = 1 \quad 1 \leq i \leq n$$

$$W_{ij} = 0 \text{ ó } 1$$

donde X_i = i-nesimo pattern; $X_i \in \mathbb{R}^n$

Z_j = j-nesimo centro; $Z_j \in \mathbb{R}^n$

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } X_i \in C_j \\ 1 & \text{si } X_i \in C_j \end{cases}$$

$W = [W_{ij}]$ es una matriz $n \times k$

n : número de patterns

k : número de clusters

m : dimensión del espacio

$\|\cdot\|$ = norma euclídeana.

4.4. - Clusterización en el espacio de color.

Nosotros hemos aplicado las técnicas de segmentación primarias a imágenes cromáticas usando técnicas de clusterización directamente sobre la imagen original, de manera que aislamos zonas que posean valores cromáticos muy cercanos. La dificultad práctica de este sistema reside en la gran influencia que ejerce el tipo y la forma de la iluminación sobre las distintas componentes de color, pues brillos y reflejos en la imagen original pueden enmascarar información realmente significativa. Sin embargo a niveles simples, pueden ensayarse métodos que faciliten el aislamiento de las zonas cromáticas. El método empleado se ha basado en la utilización del algoritmo de las K-medias en plano de color U-V.

Según el esquema de adquisición de la imagen mostrado en la fig. 3.4 obtenemos las componentes cromáticas de la imagen que han sido tomadas con una cámara en blanco y negro usando tres filtros cuyas curvas de transmitancia se aproximan bastante a la de los filtros retinex.

Según el diagrama de bloques de la fig. 3.6 se obtiene la componente de luminancia de la imagen, y por el método descrito anteriormente se pasa al plano de color U-V donde se han realizado los procesos de clusterización. En el diagrama de bloques de la fig 3.7

se muestran los distintos procesos utilizados para llevar a cabo la clusterización:

1. - En el primer proceso se asigna cada uno de los puntos de la imagen a cada uno de los cluster iniciales que se han seleccionado previamente. Esta asignación se realiza por el tono y la saturación de cada punto de la imagen de forma arbitraria.

Se ha elegido la configuración inicial para $N=9$ cluster, aunque la elección del mismo se puede tomar de forma arbitraria. El cluster número nueve representa el correspondiente a los acromáticos. La asignación inicial se ha hecho midiendo los ángulos y las distancias al centro del sistema de coordenadas.

Esto se ha realizado mediante un programa llamado KMEDIAS1, que genera la primera matriz de cluster NMC1.

2. - El segundo proceso consiste en aplicar el algoritmo de las K-medias al problema. Esto se ha realizado mediante el programa KMEDIAS2 que genera la segunda matriz de cluster NMC2.

3. - El hecho de que puedan existir varios cluster no significativos, nos ha obligado a someter el problema a un tercer proceso para eliminar los mismos. La eliminación no se ha hecho en base a un número de puntos mínimo en los cluster, ya que pueden existir en la imagen tonos o matices cuyo número de puntos en el

cluster fuesen pequeños, y se ha adoptado el criterio de medir la desviación típica entre los distintos clusters. Estos se ha realizado mediante el programa KMEDIAS3 que genera la matriz NMC3.

Eliminados los clusters no significativos se han vuelto a reorganizar de nuevo aplicando el algoritmo de las k-medias, obteniendose la matriz NMC2.

4. - En el cuarto proceso se toma la matriz NMC2 y la luminancia de la imagen y a partir de los mismos se obtienen los distintos cluster de color.

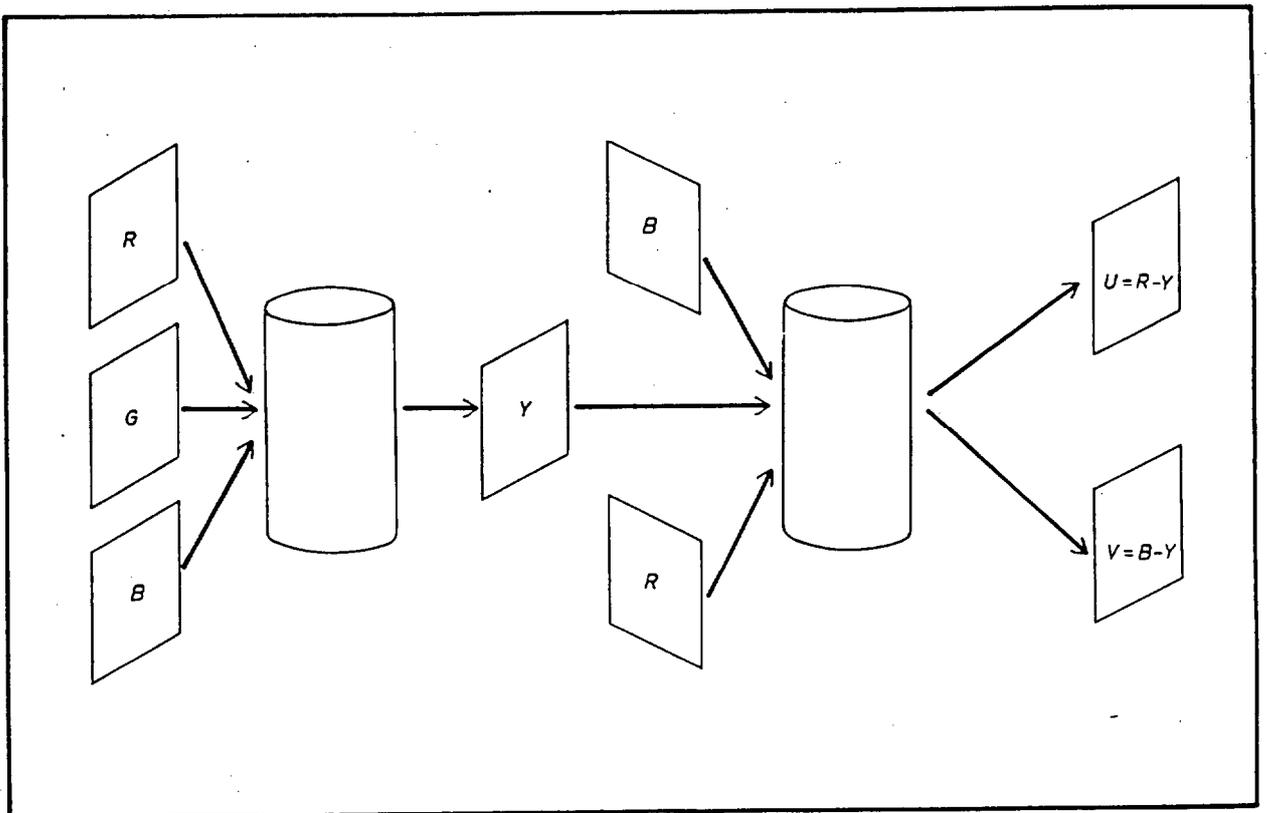


Fig. 3.5 Diagrama de bloques del proceso U-V

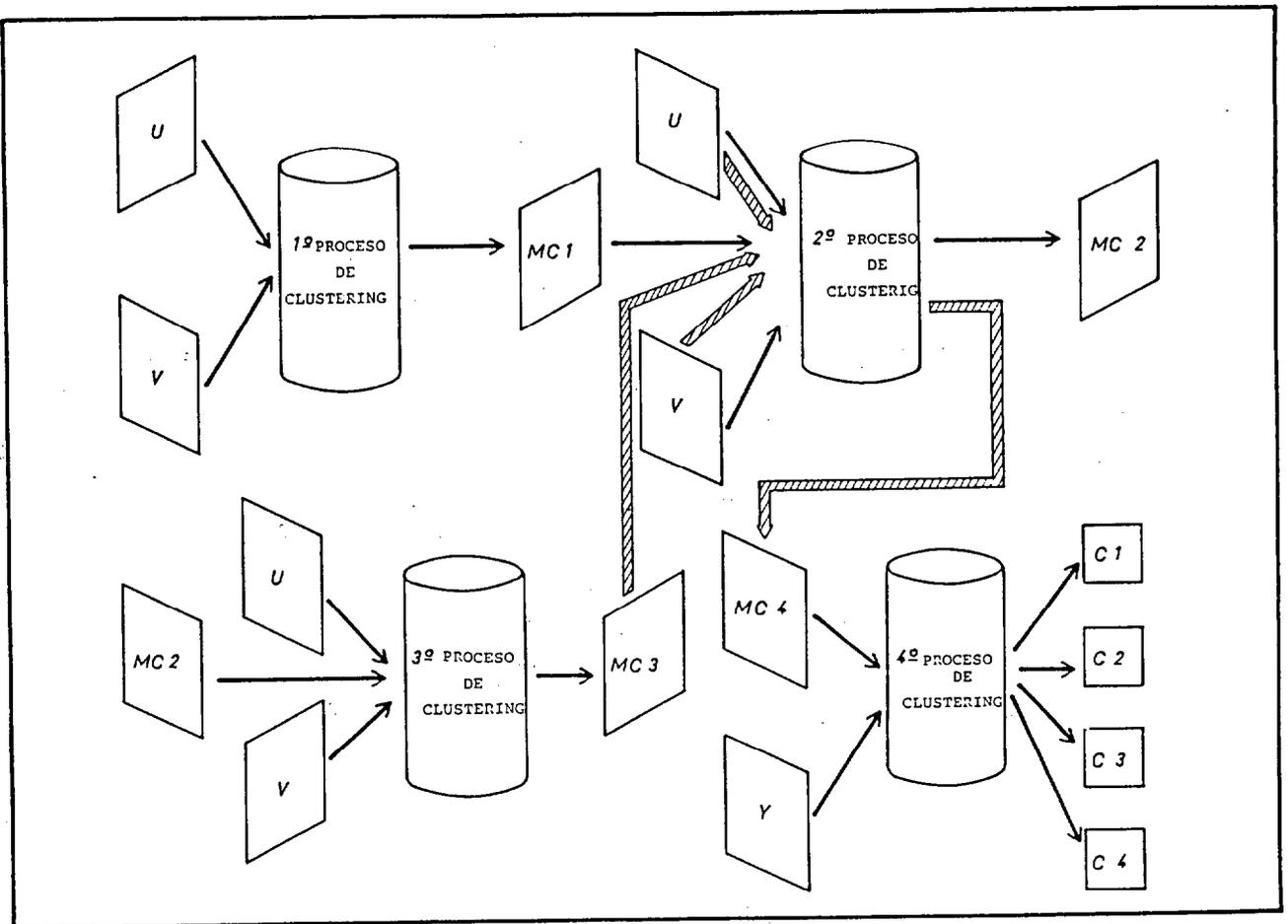


Fig. 3.6 Diagrama de bloques del proceso de clusterización

El proceso anterior se ha aplicado a la imagen cuyas componentes cromáticas B, G, R se muestran en las fig. 3.7 componente B, fig. 3.8 la componente G, fig. 3.9 la componente R. La luminancia de la imagen se muestra en la fig. 3.10.

Se ha reconstruido la imagen cromática original a partir de sus componentes. Para ello hemos usado la relación de conos R:G:B en la retina humana que varios autores basados en estudios neurofisiológicos consideran como la más probable, que es de 36:12:1. La misma se muestra en la fig. 3.12.

En las figs. 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16, se muestran los distintos clusters cromáticos obtenidos. La fig 3.17 muestra el cluster correspondiente a los acromáticos. cluster correspondientes a los acromáticos.

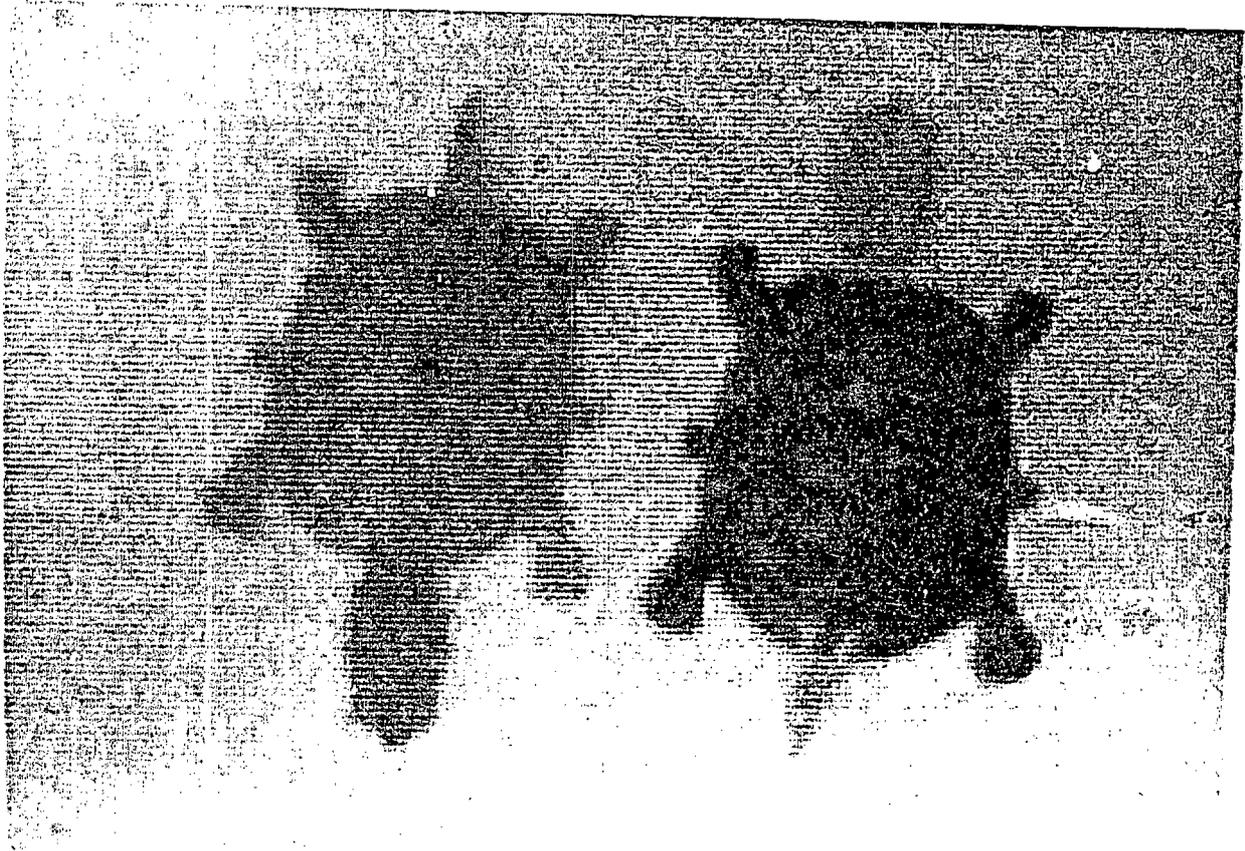


Fig. 3.7 Componente Azul



Fig. 3.8 Componente Verde



Fig. 3.9 Componente Roja

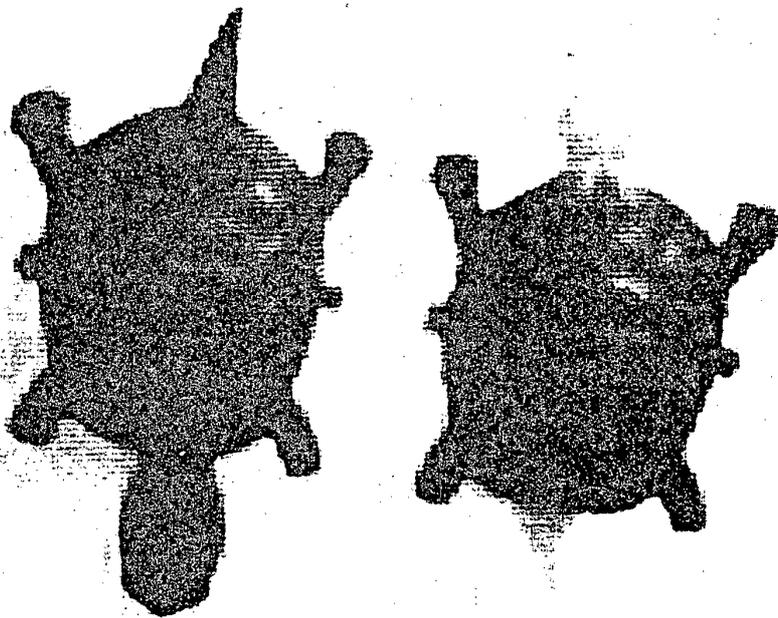


Fig. 3.10 Componente de Luminancia



Fig. 3.12 Imagen Reconstruida a partir de sus Componentes

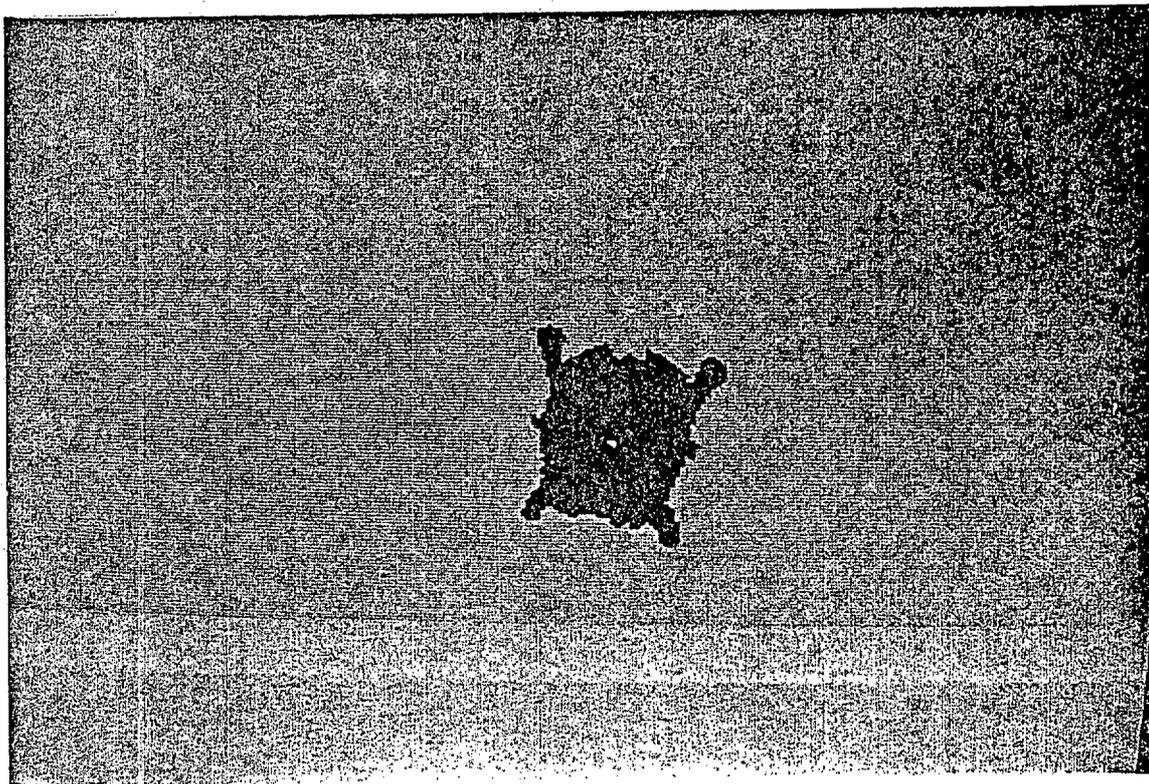


Fig. 3.13 Cluster n 1

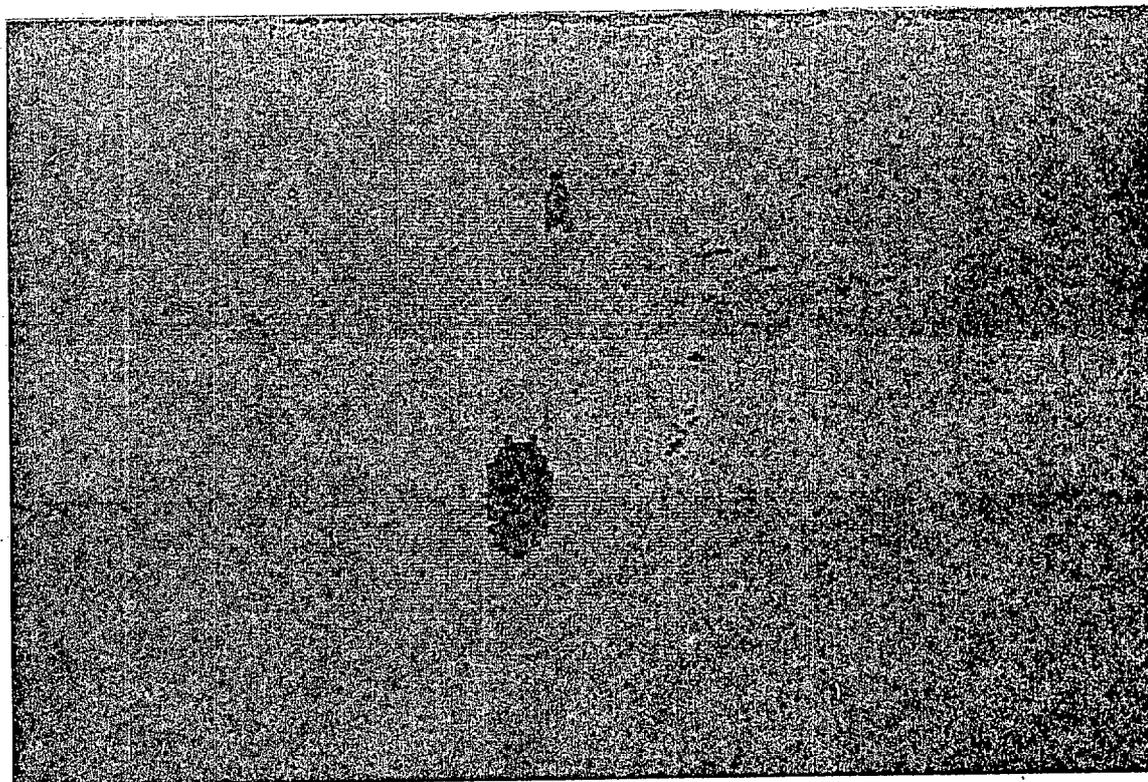


Fig. 3.14 Cluster nº 2

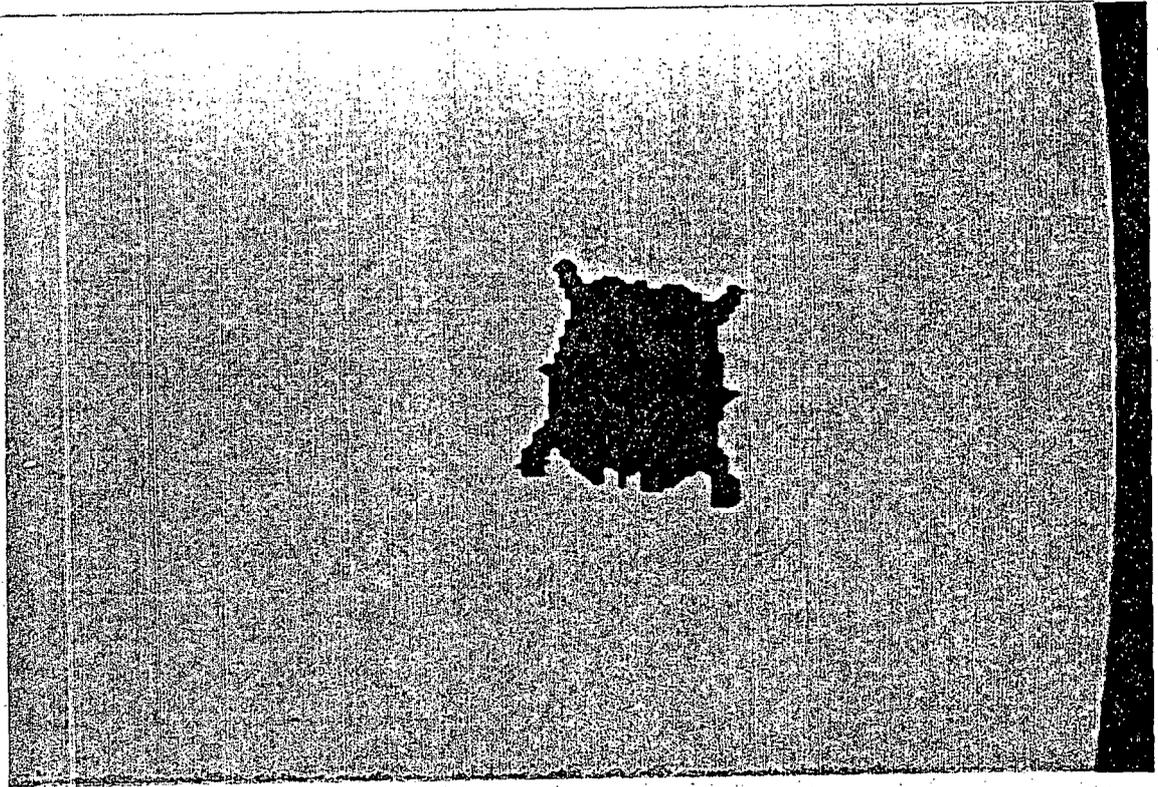


Fig. 3.15 Cluster nº 3

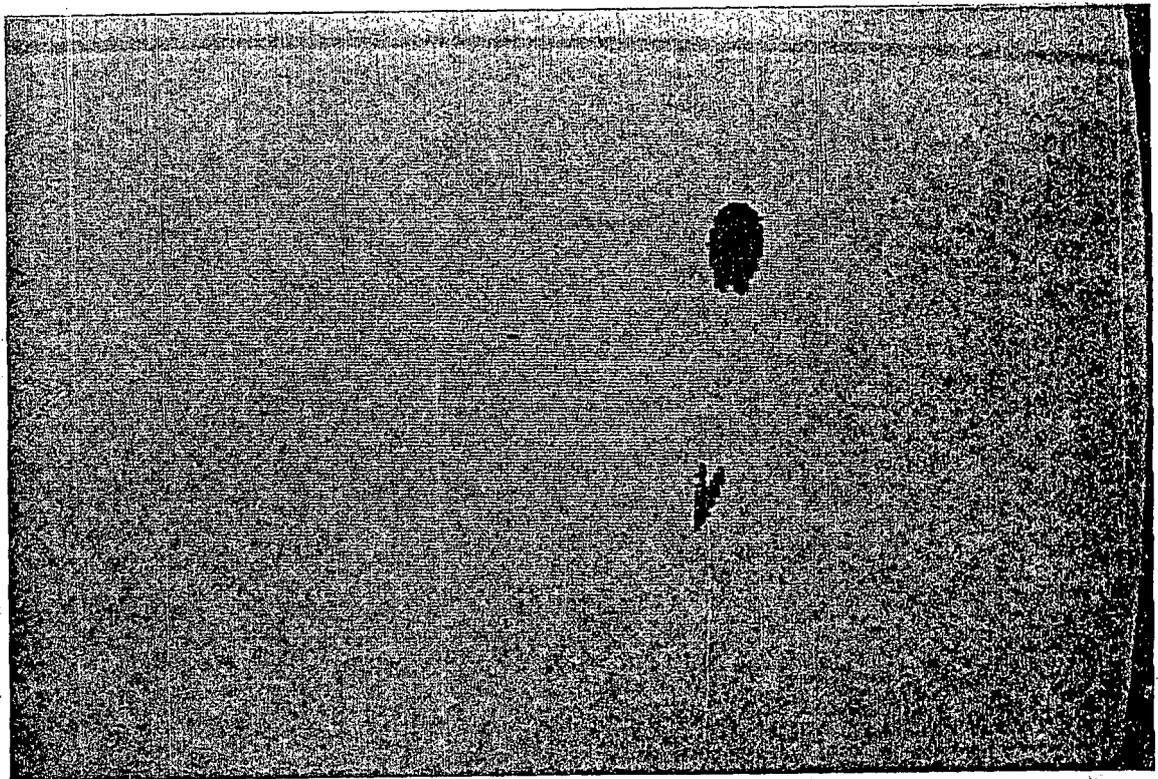


Fig. 3.16 Cluster nº 4

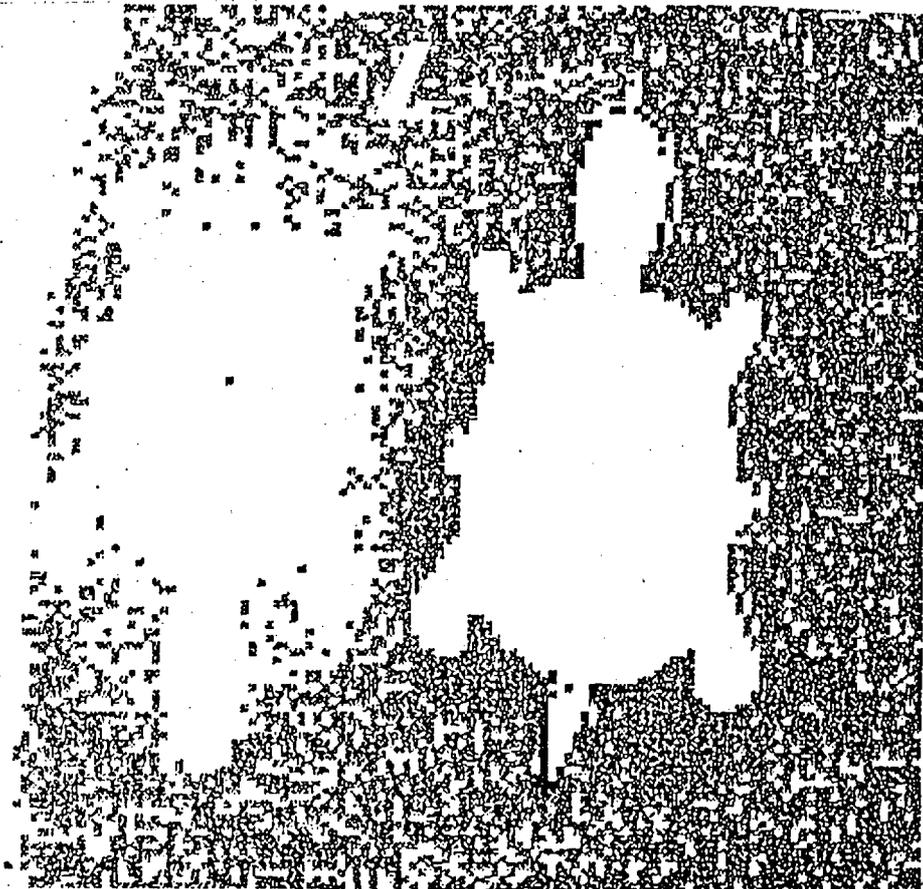


Fig. 3.17 B Cluster correspondientes a los Acromáticos

3.2. -Algoritmos de interacción lateral en espacios de color

3.2.0 Introducción

En esta sección presentamos los resultados de aplicar los conceptos ALI al proceso de color que se realiza con el objetivo de converger en una teoría cuantitativa de la codificación retinal.

Partimos de una capa de elementos computacionales , que en los vertebrados inferiores , puede ser asociada a las células ganglionares , mientras que se referirían a las células corticales en los vertebrados superiores, cuando se busca la correspondencia paradigmática con las redes neuronales. Se definen regiones centrales y periféricas para cada unidad computacional. Los procesos en ambas regiones consisten en la "medida" del color dentro de un espacio standard. La salida de la unidad de computación es la distancia medida en el espacio de color convenientemente codificada.

La simulación del proceso se ha llevado a cabo utilizando una cadena cámara-computador, que extrae la información correspondiente a las componentes cromáticas de la imagen. Esto se consigue a partir de las componentes RGB tomadas con tres filtros retinex y una cámara en blanco y negro.

De estas componenetes se pasa al espacio de color U-V-Y. En el espacio de color se ha realizado asimismo una clusterización para proporcionar un "etiquetado" mínimo a los correspondientes colores, con vistas a utilizar el procedimiento en segmentación cromática para visión artificial.

Las distancias computadas en el espacio de color son distancias euclídeas, aunque puede usarse cualquier otro tipo de distancia. El reconocimiento de un color, puede por tanto realizarse bien sobre el espacio U-V-Y o bien sobre el "plano" que contine las salidas de las unidades computacionales. En este último plano, se observa que el procedimiento incluye, de forma unificada, todos los procesos neurofisiológicos de codificación encontrados en las células retinales.

3.2.1 Procesos de inhibición lateral

La búsqueda de un esquema funcional para explicar la codificación en color en las células ganglionares en la retina de los vertebrados Moreno Díaz et al. (1980) ha llevado a la necesidad de disponer de entrada visuales cromáticas reales en el computador con las cuales experimentar los distintos modelos retinales.

Los procesos cromáticos de más interés tanto teórico como prácticos, son aquellos en que hay interacción

espacial, y estos solo pueden investigarse en modelos de complejidad tal que requieren su simulación en computador, Gonazález-Rodríguez et al (1983)

La percepción del color y de sus características está intimamente ligada al estudio de detectores de contrastes en las células retinales.

Mach postulaba que la inhibición lateral era un mecanismo cerebral por el cual la excitación de una fibra nerviosa por un punto luminoso, quedaba bloqueada por los axones vecinos.

Indudablemente esta operación magnifica el contraste entre el punto brillante y sus alrededores. La inhibición lateral puede ser usada para explicar el fenómeno de contraste simultaneo. La respuesta de una célula es una respuesta logarítmica y puede ser computada usando la brillantez entre la parte central y la periferia.

Marr and Hildreth (1980) proponen que para detectar los cambios de intensidad de una imagen lo que hace es comparar los valores correspondientes de un punto con los de sus vecinos. Desde el punto de vista matemático esto equivale a tomar la derivada primera. Cuando la diferencia sea grande, la intensidad variará rápidamente. El operador que cumple estas condiciones es un filtro aplicado sobre una distribución de tipo gaussiano.

El filtro tiene que tener indudablemente dos características fundamentales:

1. - Debe extraer la primera y segunda derivada de la imagen. La primera detecta los cambios de intensidad de la imagen y la segunda detecta los pasos por cero.

2. - Debe poderse adecuar para detectar bordes en cualquier escala.

La aplicación de esta teoría al campo del color conlleva consigo una dificultad adicional, es que según la descripción que hace Gouras (1968) de las células color-oponentes en la retina del mono, los campos receptivos son una mezcla de centro-rojo, periferia-verde, ect.

De acuerdo con las descripciones fisiológicas, algunas células color-oponentes en la retina del mono tienen campos receptivos con una mezcla de propiedades espaciales y cromáticas (Gouras, 1964), (Monasterio and Gouras (1975).

La dificultad de usar estas técnicas en los campos receptivos de estas células es que las mismas tienen una compleja mezcla de información cromática y espacial. Sus señales (cromática o espacial) no son una función pura del filtro anteriormente citado para un simple canal cromático.

Las organizaciones espaciales-cromáticas de estas células se muestran en la fig. 3.17

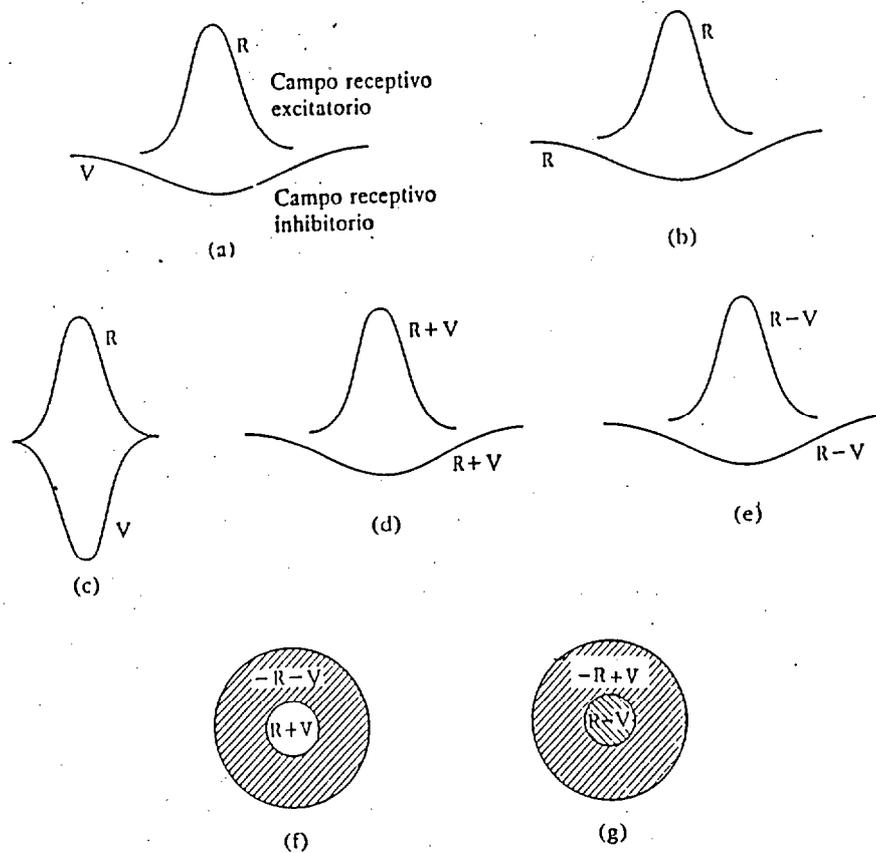


Fig. 3.17 Organización cromática del campo receptivo.

- a) Color-oponente del tipo rojo-verde .
- b) Rojo-centro, rojo-periferia.
- c) Rojo-verde con una distribución espacial idéntica.
- d) Una luminancia pura (rojo+verde).
- e) Una pura diferencia-color (rojo-verde).

Las combinaciones lineales de señales centro-periferia en los canales crómicos, no es sin embargo suficiente para explicar el comportamiento de las células

especializadas en la codificación del color. También las operaciones entre centro y periferia para generar canales cromáticos no parecen del tipo de las que actúan como un filtro espectral, pero además implican también una clase en la determinación o medida del color principalmente en la periferia (Dijk et al., 1983; Wienrich et al., 1983).

Esto es similar a lo que sucede en los detectores de contrastes en los procesos monocromáticos. Este tipo de operaciones puede ser formuladas mediante los Procesos Algorítmicos de Interacción Lateral (ALI).

De acuerdo con los conceptos avanzados por Mira et al (1983) y Moreno Díaz et al (1983) la retina puede ser considerada como un sistema de procesamiento de la información por capas donde cada capa de computación no tiene que coincidir con cada capa neurofisiológica de la retina.

La interacción lateral algorítmica (ALI) es interpretada por Moreno-Díaz (1983) como un proceso de relativamente alto nivel que tiene lugar entre unidades computacionales que forman una capa (computación en paralelo) y tiene su aplicación potencial tanto en la formulación de procesos en redes de neuronas como en sistemas artificiales de visión.

En su formulación más sencilla se considera que las unidades computacionales reciben información de un

mosaico bidimensional (espacio de entradas) dividido en centro y periferia y un espacio de salidas tambien dividido en centro y periferia. Cada unidad computacional mira un campo receptivo. Los campos receptivos de cada unidad computacional se solapan. Los procesos algorítmicos separados son ejecutados ambos en regiones centrales y periféricas y salida de la unidad puede ser el resultado de una regla de desición sobre aquellas.

3.2.2 - Estructura teórica

La estructura computacional es una capa de módulos idéntica distribuida en dos dimensiones. Esta capa computacional recibe información de un espacio de entradas, que consiste en una capa de datos y una capa de salidas que tambien es una simple capa de datos. Esta estructura se muestra en el diagrama de la fig. 3.18 a lo largo de un eje.

La Fig. 3.19 muestra la distribución centro-periferia de los campos receptivos extendidas al espacio de entradas y espacio de salidas.

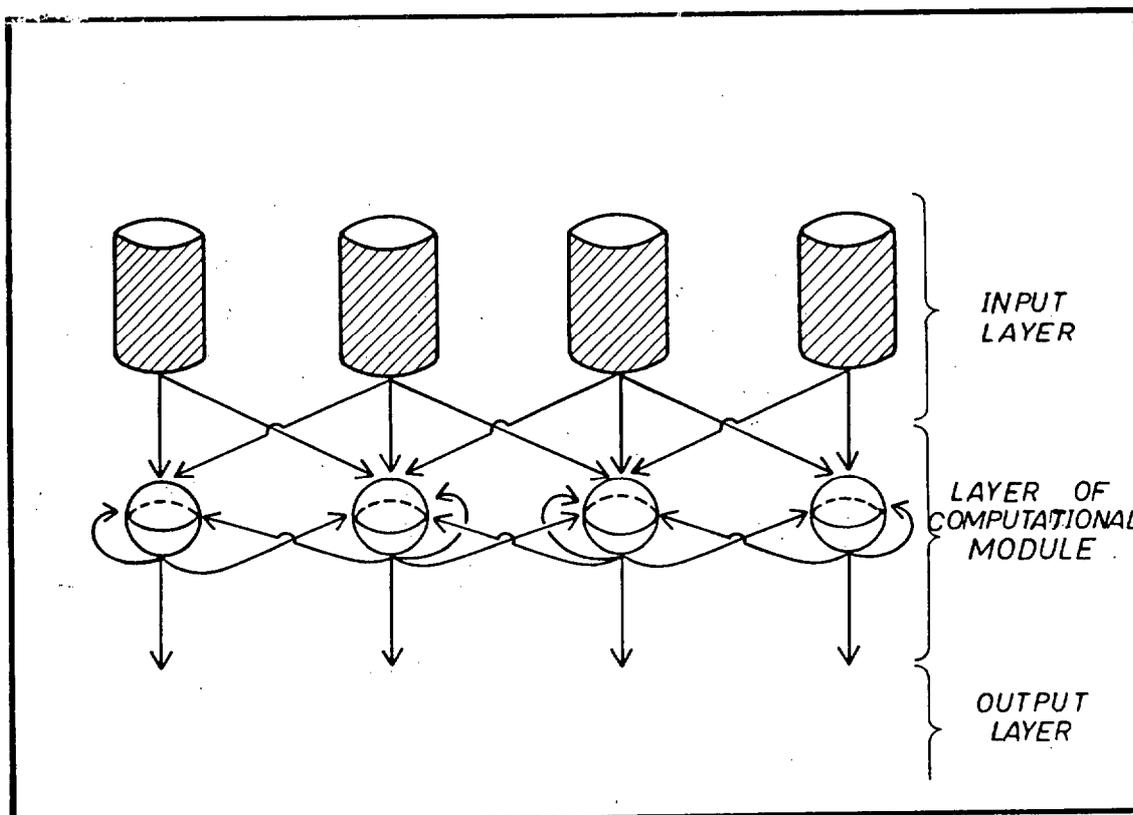


Fig 3.18 Estructura computacional a lo largo de un eje.

Como una generalización de la estructura centro-periferia de los campos receptivos, aquí admitimos la posibilidad de que hay al menos cuatro regiones del cual el modulo computacional recibe información. Estas son C_I , P_I , C_O , P_O , las cuales están divididas en centro y periferia en las capas de entrada y salida. La regla algorítmica está basada sobre decisiones tomadas sobre los resultados de las operaciones en estas regiones.

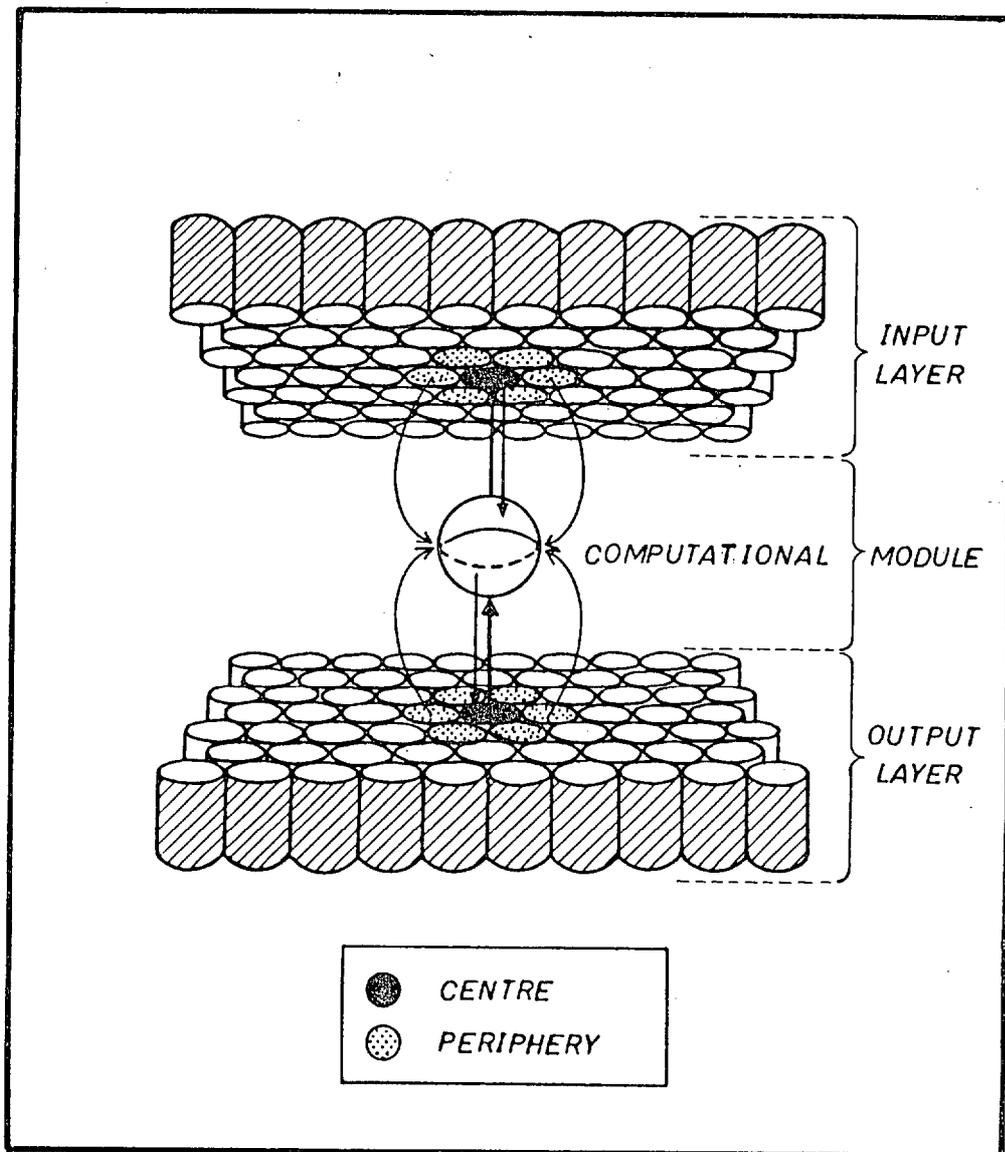


Fig. 3.19 Ilustración de la estructura centro-periferia de los campos receptivos con las capas de entrada y salida.

En general un proceso ALI de este tipo tiene una estructura que puede ser expresada por los siguientes procesos:

a)Proceso A: se toma el C_I , P_I , C_O , P_O , que son respectivamente el centro y la periferia de entrada y salida .

b)Proceso B: se mide la distancia euclidea (no es descartable cualquier otro tipo de distancia) entre C_I y los n elementos de la P_I .

c)Proceso C: se aplica una regla de decisión al proceso b), se selecciona la distancia maxima en el plano de color entre C_O y P_O .

d)Un punto de P_I se convierte en C_O en la capa siguiente de computación.

3.2.3- Simulación del proceso

Para la simulación de estos procesos hemos tomado las componentes cromáticas de la imagen mostradas en las figs. 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 .

La componente en luminancia de la imagen se ha obtenido a partir de:

$$Y=0.30 R+0.59 G+0.11 B$$

De aquí se ha pasado al espacio de color Y,U,V, donde $U=B-Y$ y $V=R-Y$.

Es en este plano de color donde hemos aplicado los procesos ALI. Para ello hemos utilizado dos métodos:

1. - En la utilización de la estructura centro-periferia se ha elegido para el centro $C = 1$ pixel, y como periferia se ha utilizado distintas estructuras simétricas y asimétricas que nos han permitido mostrar todos los posibles contrastes en color que se puedan dar.

El algoritmo utilizado, es un algoritmo recurente en el cual cada punto de la periferia se convierte en punto central en el siguiente módulo computacional. El punto de la imagen reconstruida se obtiene midiendo la distancia entre el punto del centro la media aritmética de todos los puntos de la periferia.

2. - El segundo sistema utilizado es el mismo con una estructura centro-periferia pero aquí el algoritmo recurente está basado en la utilización de una regla de desición. Aquí se ha tomado periferias simétricas pero con distintos pixels. Se ha calculado la distancia euclídea entre el centro y los distintos puntos de la periferia y se ha seleccionado la distancia máxima de todas ellas (esta es la regla de desición).

La fig. 3.20 muestra el resultado de aplicar este proceso a la imagen de entrada para una periferia de 3*3 pixels.

La fig. 3.21 nos muestra el resultado de aplicar el proceso para una periferia de 5*5 pixel y la fig. 3.22 muestra el resultado para una periferia de 6*6 pixel.

La Fig. 3.23 es resultado cuando se han aplicado estos procesos calculando los valores medios de la periferia y se ha medido directamente la distancia euclídea en el plano de color.

Los procesos ALI en los espacios de color suministran un simple y natural camino para formular los procesos codificadores de color en prácticamente todas las células procesadoras de color del camino visual, al menos en el nivel electrofisiológico. Como ha sido demostrado aquí, simples medidas en los espacios de color más una regla de desición es suficiente para generar una buena detección en el contraste de color, compatible con los resultados experimentales.

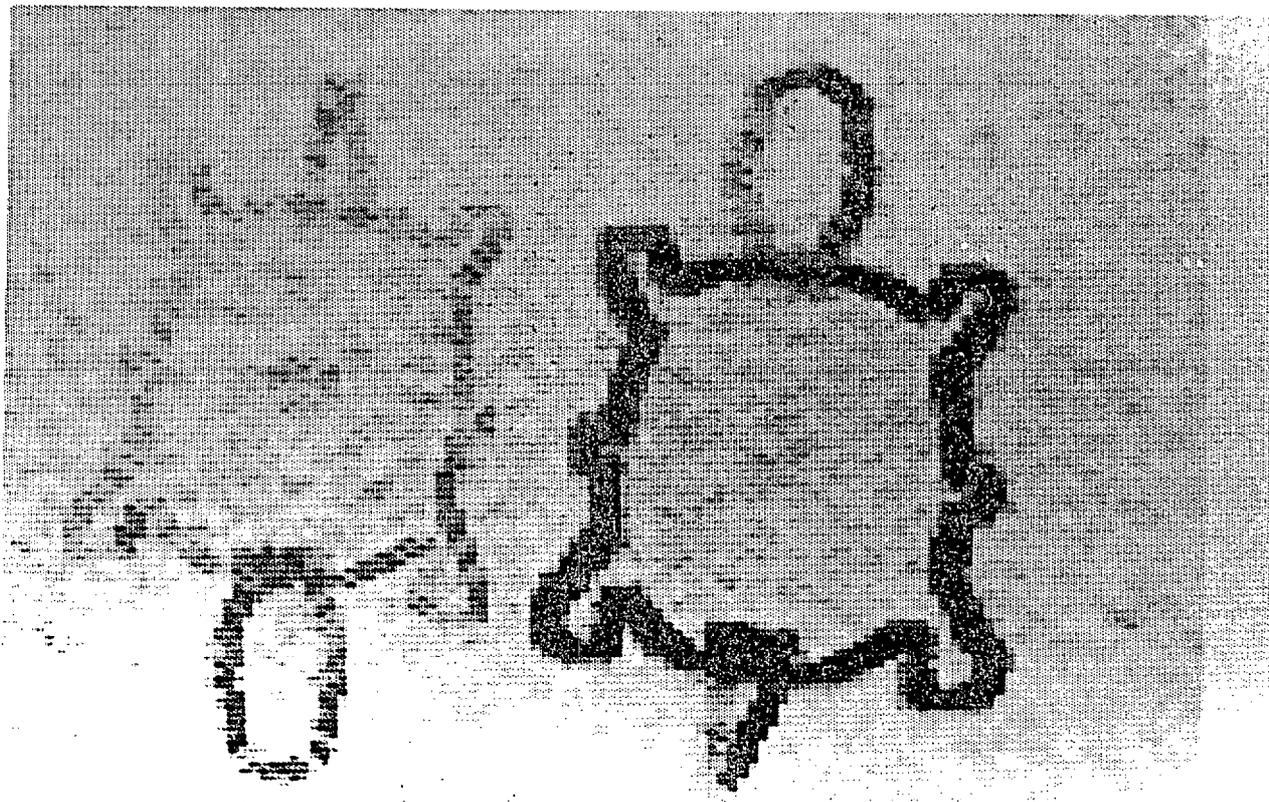


Fig. 3.20 Resultado para una Periferia de 3*3 Pixels

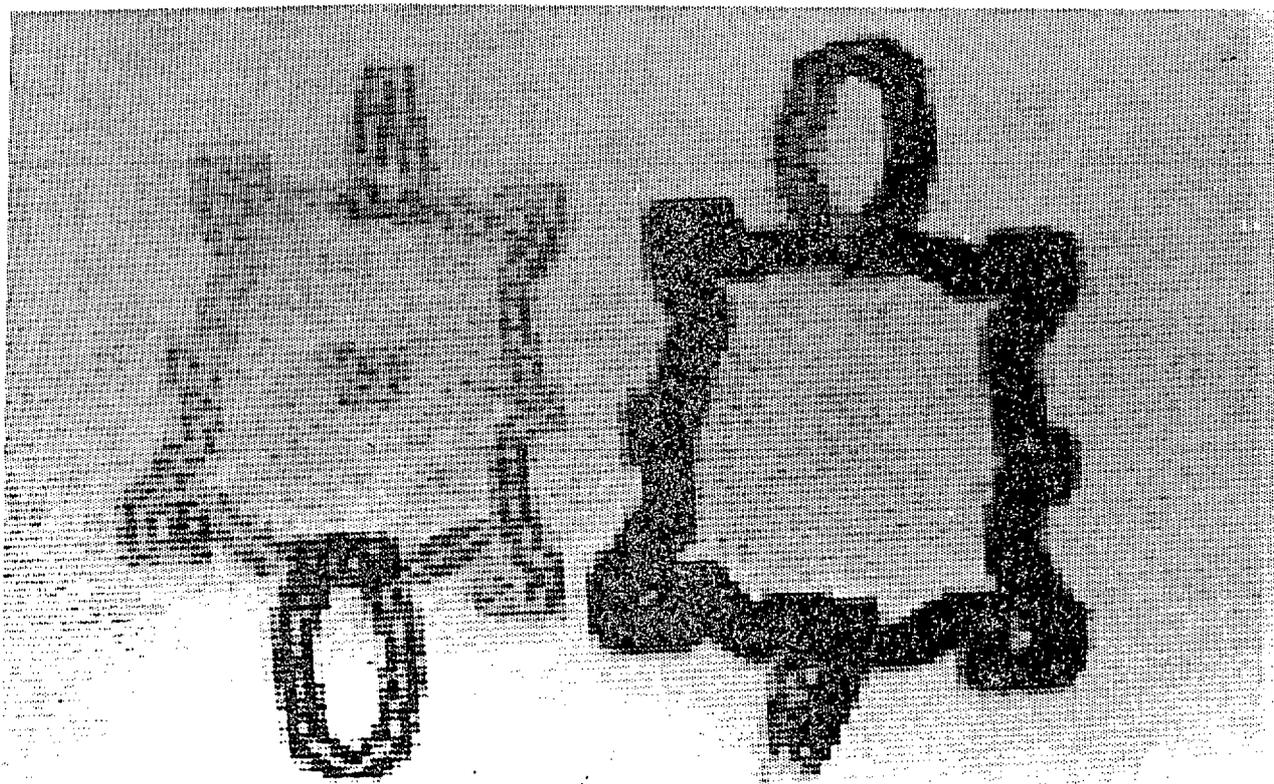


Fig. 3.21 Resultado para una Periferia de 5*5 Pixels

3.3. - Detectores en el espacio de color

En muchos casos los contornos de los objetos en una escena son suficientes para describir toda la información relevante de la imagen original. Por ello la idea de extracción de bordes de los objetos que aparecen en una imagen ha sido ampliamente tratada en la bibliografía referente a la visión en color, (Marr and Hildreth, 1980), (Rossenfeld et al., 1971), (Davis, 1975) ect..

La problemática de la búsqueda ó extracción de contornos de una imagen es bastante complicada debido a la ambigüedad del término "contorno"; de hecho un contorno es más un concepto más intuitivo que formal. Sin embargo el contorno en una imagen digital puede abordarse de una manera simplista: existirá el contorno en una imagen si existe al menos dos regiones de una imagen en el que difieran el valor de la intensidad.

Fundamentalmente un contorno en una imagen cromática se puede definir como aquella zona de la imagen en la que se ha producido un cambio sustancial en algunos de los valores cromáticos que la definen. Esta definición involucra a todo el conjunto de las coordenadas cromáticas incluyendo la posibilidad de que se produzcan cambios de tono o saturación en zonas de la imagen de luminancia constante o viceversa. Así, dependiendo del sistema de referencia cromático elegido, es posible indicar la existencia de un borde o un

contorno por variación de algunos de los parámetros que definen el referencial.

La extracción de bordes de una imagen se basa en la utilización de métodos locales y descriptores semilocales.

Los métodos locales se basan en operadores de diferenciación espacial. Este método requiere la determinación de derivadas direccionales a lo largo de direcciones ortogonales. Uno de los operadores más simples para la obtención del gradiente es el llamado operador de cruces de Roberts.

$$\text{Grad } f(x, y) = \left([f(x, y) - f(x-1, y)]^2 - [f(x, y) - f(x, y-1)]^2 \right)^{1/2}$$

El operador de Roberts sería:

$$\text{Grad } f(x, y) = \left([f(x, y) - f(x+1, y+1)]^2 - [f(x+1, y) - f(x, y+1)]^2 \right)^{1/2}$$

Cuando el tiempo de cálculo sea costoso se suele emplear la siguiente expresión que es cualitativamente similar, debida también a Roberts:

$$\text{Grad } f(x, y) = f(x, y) - f(x+1, y) + f(x+1, y) - f(x, y+1)$$

Existen otras formas de computación del gradiente mucho más elaboradas para la componente en intensidad de la imagen que son aplicables al conjunto de la información cromática. Entre estos se encuentra el operador de Sobel, que hemos aplicado directamente en plano U-V.

| | | |
|----------------|--------------|----------------|
| $A_{i-1, j-1}$ | $A_{i-1, j}$ | $A_{i-1, j+1}$ |
| $A_{i, j-1}$ | $A_{i, j}$ | $A_{i, j+1}$ |
| $A_{i+1, j-1}$ | $A_{i+1, j}$ | $A_{i+1, j+1}$ |

Donde:

$$U = A_{i-1, j+1} + 2A_{i, j+1} + A_{i+1, j+1} - [A_{i-1, j-1} + 2A_{i, j-1} + A_{i+1, j-1}]$$

$$V = A_{i+1, j-1} + 2A_{i+1, j} + A_{i+1, j+1} - [A_{i-1, j-1} + 2A_{i-1, j} + A_{i-1, j+1}]$$

Donde la magnitud del gradiente viene dada por:

$$S = [(U^2 + V^2)]^{1/2}$$

que nos daría la saturación y el tono vendría dado por

$$\theta = \text{tang}^{-1} [U/V]$$

Otro tipo de operador utilizado es el operador de Prewitt que en el plano de color toma la forma:

$$U = A_{i-1, j+1} + A_{i, j+1} + A_{i+1, j+1}$$

$$- [A_{i-1, j-1} + A_{i, j-1} + A_{i+1, j-1}]$$

$$V = A_{i+1, j-1} + A_{i+1, j} + A_{i+1, j+1}$$

$$- [A_{i-1, j-1} + A_{i-1, j} + A_{i-1, j+1}]$$

Un detector de transiciones locales lo tenemos en la versión digital de la laplaciana, que en forma de máscara de convolución que tiene la forma:

$$L = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Estos operadores se pueden utilizar como detectores de bordes elementales presentados en formas de máscaras de convolución, directamente en el plano U-V, teniendo las matrices de convolución dos componentes, una para la dirección de U y otra para la de V. La imagen se reconstruye tomando:

$$S = [(U^2 + V^2)]^{1/2}$$

Así los operadores anteriores serían:

Roberts:

$$U = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Sobel:

$$U = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

Prewitt:

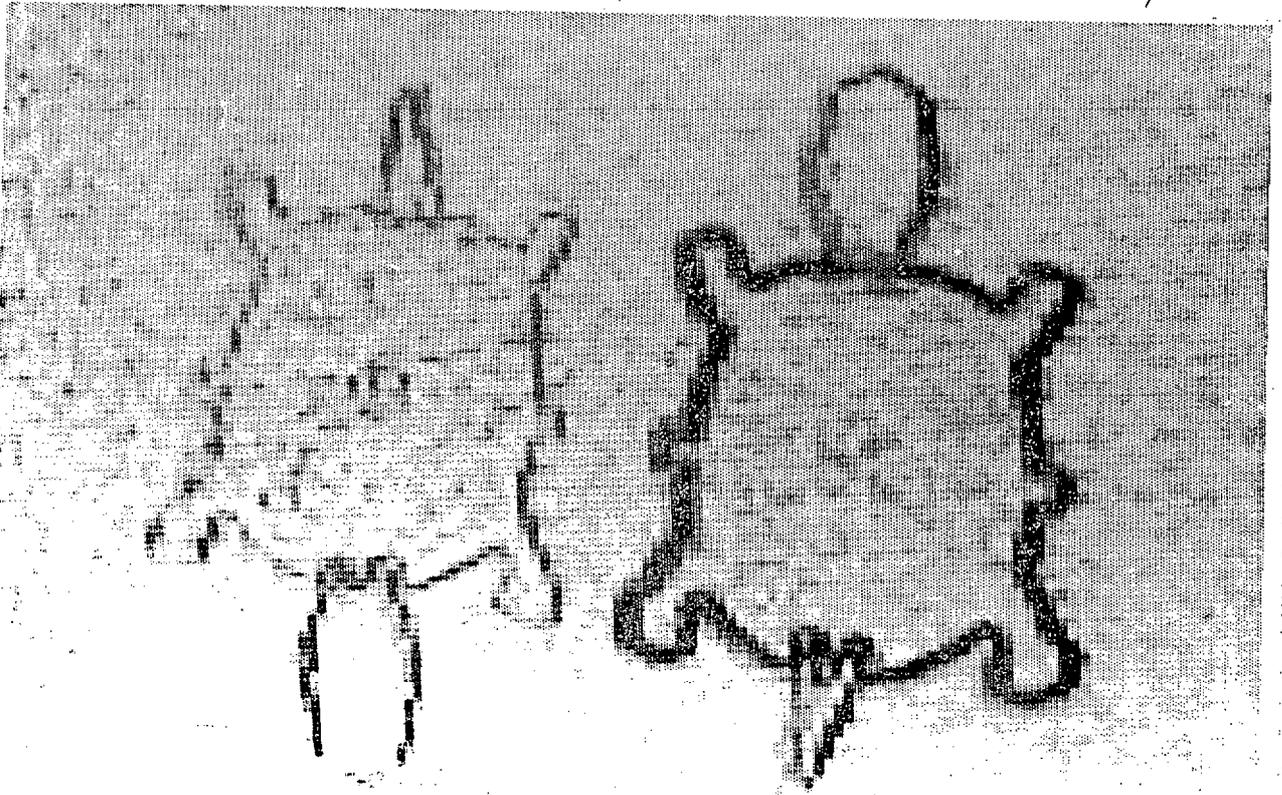


Fig. 3.24 Resultado de aplicar el Operador de Roberts en el plano de Color.

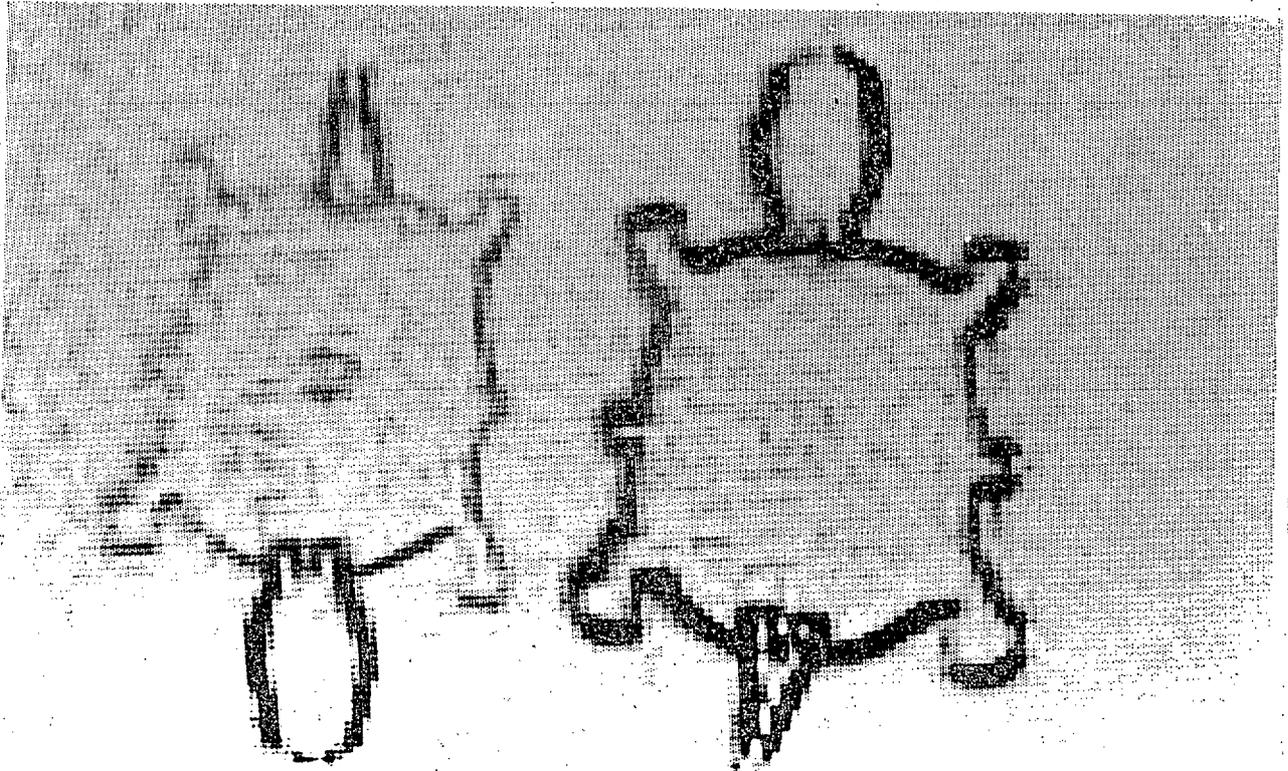


Fig. 3.25 Resultado de aplicar el Operador de Sobel en el plano de Color

$$U = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} \qquad V = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Kirsch:

$$U = \begin{vmatrix} 3 & 3 & -5 \\ 3 & 0 & -5 \\ 3 & 3 & -5 \end{vmatrix} \qquad V = \begin{vmatrix} 3 & -5 & -5 \\ 3 & 0 & -5 \\ 3 & 3 & 3 \end{vmatrix}$$

Los resultados de estos procesos aplicados en el espacio de color se muestran en las figs. 3.24 para el operador de Roberts y la fig. 3.25 para el de Sobel.

Cuando se desea detectar bordes de orientaciones arbitrarias, se pueden usar máscaras no simétricas. Hemos experimentado con las siguientes para incrementos de 30°.

$$\begin{vmatrix} -100 & -100 & 0 & 100 & 100 \\ -100 & -100 & 0 & 100 & 100 \\ -100 & -100 & 0 & 100 & 100 \\ -100 & -100 & 0 & 100 & 100 \\ -100 & -100 & 0 & 100 & 100 \end{vmatrix}$$

Para 0°

| | | | | |
|------|------|------|-----|-----|
| -100 | 32 | 100 | 100 | 100 |
| -100 | -78 | 92 | 100 | 100 |
| -100 | -100 | 0 | 100 | 100 |
| -100 | -100 | -92 | 78 | 100 |
| -100 | -100 | -100 | -32 | 100 |

Para 30.

| | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| -32 | 78 | 100 | 100 | 100 |
| -100 | -92 | 0 | 92 | 100 |
| -100 | -100 | -100 | -78 | 32 |
| -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |

Para 60.

| | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |
| -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |

Para 90.

Los resultados obtenidos se muestran en las figs. 3.26 y siguientes.

Estos métodos locales basados en el gradiente y la

laplaciana son básicamente sensibles al ruido ya que los pilxes son extraídos independientemente de su organización. Hay otros métodos semilocales como el Hueckel que considera una zona circular, basada en encontrar el mínimo de una expresión.

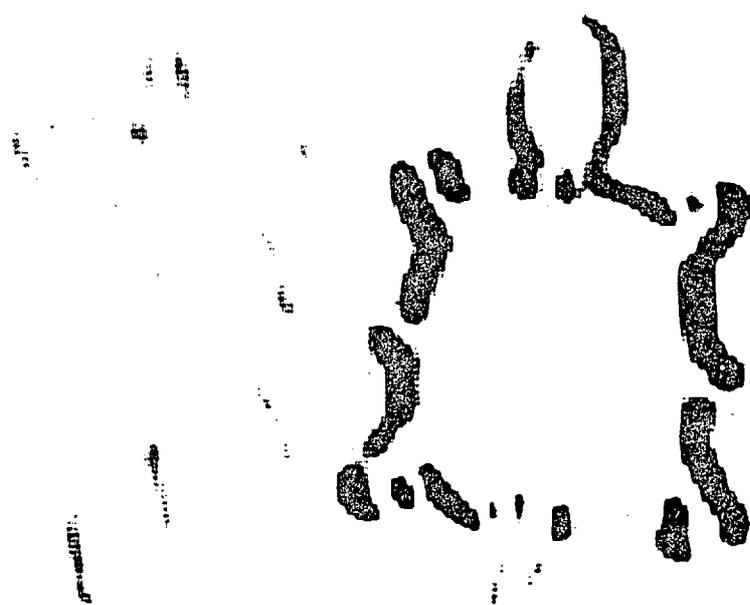


Fig. 3.26 Resultado par un ángulo de 0°

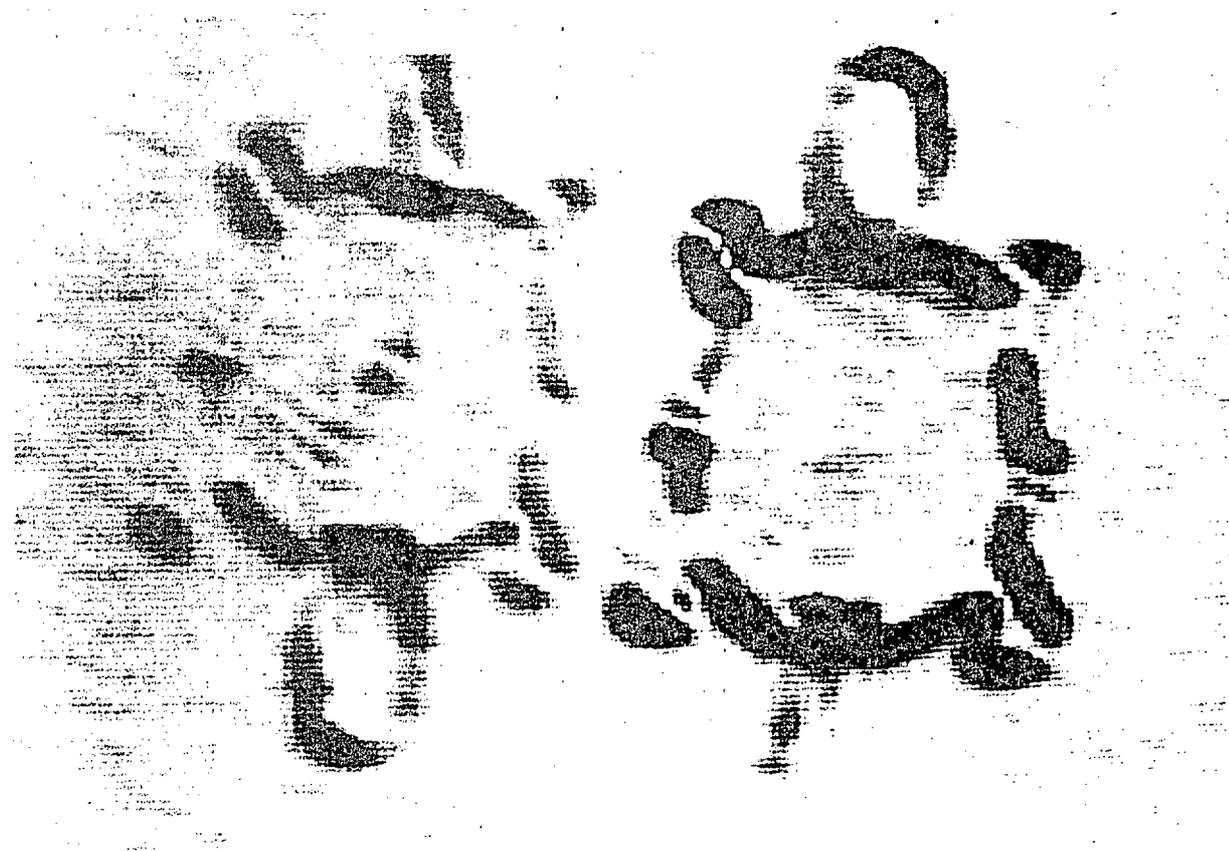


Fig. 3.27 Resultado para un ángulo de 30°

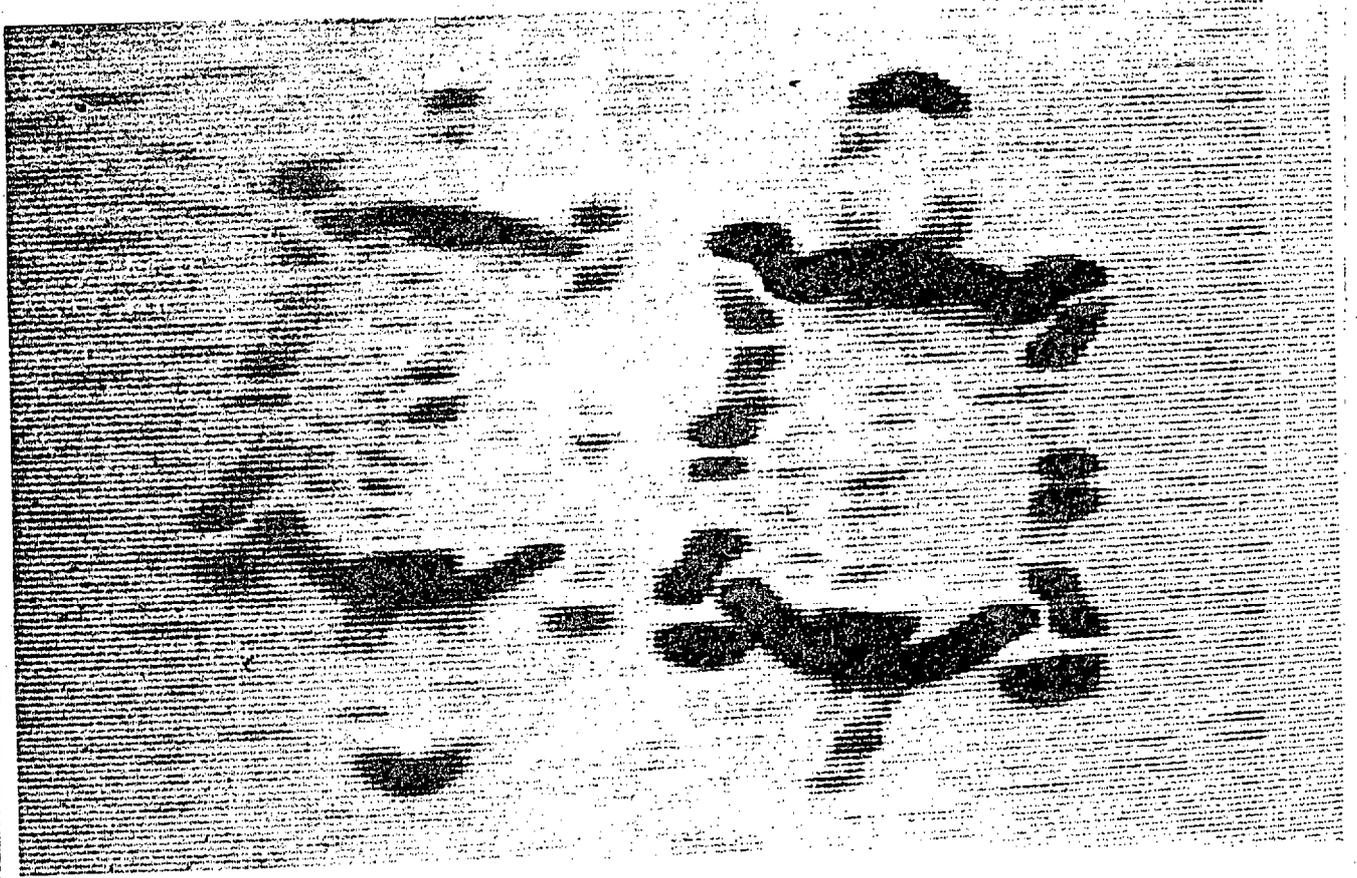


Fig. 3.28 Resultado para un ángulo de 60°



Fig. 3.29 Resultado para un ángulo de 90°

3.4 IMPLICACIONES EN SISTEMAS ARTIFICIALES

3.4.1 El Problema de la Percepción Robótica

Los sistemas robóticos generalizados son unos de los más completos paradigmas del Sistema Artificial, en el sentido ampliamente aceptado de las Ciencias de lo Artificial (Simmons, 1969). Por sistema robótico generalizado se entiende aquel sistema artificial capaz de sensar el medio, percibirlo e interpretarlo en términos de sus propios modelos; preparar en términos de objetivos generales de acción, estrategias apropiadas; planificar y encontrar "métodos viables de acción", de acuerdo con las estrategias y finalmente, desencadenar acciones motoras o efectoras en las que subyacen toda una serie de mecanismos de actuación y de control de dicha actuación (actuators). Un sistema artificial que incorpore estos "desiderata" desde el punto de vista práctico y operacional pertenece todavía a una generación futura (Mira y Moreno Díaz, 1987). En la actualidad, el robot aún es simplemente una máquina flexible para aplicar en entornos industriales o entornos peligrosos para el hombre, y sobre todo, dirigido "ad hoc", sin la generalidad conceptual anteriormente citada. En esencia un robot, desde el punto de vista de sus aplicaciones industriales, es una "máquina flexible" que puede programarse o aprender para realizar una serie de tareas diferentes en entornos variados. Hasta hace pocos años, el término robot ha

estado asociado al de una máquina que era utilizada en la industria como un manipulador ciego y repetitivo. Sin embargo, a partir de los últimos años, se ha intentado dotar a estos manipuladores de una cierta inteligencia y cierta capacidad de percibir el medio.

En esencia lo que se pretende es una nueva tendencia a que las generaciones presentes y futuras de robot sean capaces de sensor el medio y planificar por sí mismos los pasos detallados de una tarea cuando esta se le indica de forma general, y que, por tanto, sea asimismo capaz de superar situaciones cambiantes en el entorno.

De acuerdo con ello, se deduce que las componentes básicas de un sistema robótico inteligente (Nitzan, 1985) deben ser:

a) Los sensores

Que pueden ser:

a1) De contacto.

a2) Remoto.

b) Efectores: (manos, brazos, piernas....).

c) Computadoras (con sus correspondientes canales de comunicación):

c1) De alto nivel de control.

c2) De bajo nivel.

d) Equipo auxiliar: (Herramientas, Cintas de transporte.....).

El sistema robótico está controlado por una única computadora de alto nivel y resulta obvio que aunque el robot ejecuta ciertas tareas humanas, no tiene por qué tener su misma presencia física, lo importante es que la máquina presente flexibilidad e inteligencia.

La investigación en robótica implica, por lo tanto, la interacción de ramas muy diversas: desde la mecánica y electrónica a las más elaboradas técnicas de ciencias de la computación, en la que destacan la planificación en tareas de I.A; la planificación de secuencias efectoras y la integración de los datos sensoriales y la elección del método apropiado de representación del conocimiento por parte del sistema robótico.

Por otro lado, el garantizar el uso efectivo del sistema robótico requiere el desarrollo de lenguajes de programación específicos, que faciliten y hagan práctica la comunicación y programación de los distintos subsistemas.

Un sistema robótico ha de ser considerado en su conjunto para lograr un diseño efectivo, y en ello inciden consideraciones adicionales de definición de los entornos de aplicabilidad y, por supuesto, consideraciones socio-económicas. En el desarrollo de lenguajes de programación para robots es donde quizás se haga notar más esta necesidad. En la actualidad, los lenguajes existentes están muy ligados al tipo de robot,

y no poseen el grado de flexibilidad y capacidad deseable. Los mismos han de desarrollarse para cubrir un amplio espectro de usuarios potenciales, desde el trabajador de la factoría al científico.

3.4.1.1 Categorías funcionales robóticas

Hay tres categorías funcionales robóticas generales:

- a) Selección y colocación.
- b) Propósito general.
- c) Lazo cerrado.

Estas categorías refieren el nivel de sofisticación de construcción en los sistemas robóticos.

1. - Unidades de selección y colocación.

Los sistemas robóticos menos sofisticados son los sistemas de selección y colocación. Las funciones de estas unidades están limitadas a tomar un objeto, transporte del mismo a una determinada localización y colocación del objeto en la misma. Los sistemas robóticos cubiertos en esta categoría están capacitados para altas velocidades y a veces no pueden ser programados fácilmente para operar en secuencias variadas. Máquinas de carga/descarga y forjas son ejemplos típicos de funciones que realizan estos sistemas.

2. - Unidades de propósito general.

Estas unidades no están especializadas en ninguna aplicación. Pueden ser equipadas con gran variedad de componentes y se pueden programar para realizar varias tareas. Estas unidades están diseñadas para producir especificaciones dadas por el usuario. Estas aplicaciones incluyen funciones tales como: revestimiento industrial, soldadura y pulido.

3 .- Unidades de lazo cerrado.

Este sistema robótico es el más sofisticado. Utiliza una variedad de entradas sensoriales avanzadas para ajustar la función de la unidad a parámetros específicos. De nuevo, este sistema está adaptado a las especificaciones del productor y del usuario. Los sistemas de lazo cerrado pueden utilizar algún grado de inteligencia artificial de lógica binaria para ejecutar tareas. La tecnologías robóticas utilizadas en exploración del espacio son un primer ejemplo de sistemas de lazo cerrado.

3.4.1.1.1 Percepción Sensorial.

Un campo interesante en robótica es el de la percepción sensorial. La verdadera inteligencia artificial debe utilizar información obtenida selectivamente desde sensores externos. La industria ha invertido enormes

cantidades de horas de trabajo y recursos fiscales en el desarrollo de sistemas sensoriales prácticos.

A) Percepción sensorial visual.

Las imágenes visuales representa la mayor fuente de información y dotar a un un sistema robótico de un sistema visual no tiene gran complejidad. Sin embargo, para que un robot comprenda que lo está viendo, es necesaria la I.A. El desarrollo más importante en sistemas visuales ha ocurrido en los últimos cinco años con la introducción del chip, también conocido como el sistema de inyección de carga (CID), sistema de carga acoplada (CCD), o array de fotodiodeo. Este chip es capaz de recibir luz ochenta veces más eficientemente que un film fotográfico. Además es capaz de detectar luz débil y diferencias sutiles en intensidad.

El chip ofrece visión con precisión geométrica inalcanzable con otros sistemas ópticos. Como resultado de esto, la precisión de control de visión tridimensional es ahora una realidad.

La velocidad en los procesos visuales es de gran importancia en orden a tratar en computadores lógicos de tiempo real, que revisten grandes ventajas en manufacturación. El chip es capaz de procesar más de 20 imágenes por segundo

Para que los sistemas robóticos entiendan lo que están

viendo, las imágenes deben ser estructuradas para que puedan ser comprensibles en lógica binaria. La visión depende de la percepción de imágenes, extracción de características distintivas, y análisis de entrada de imágenes.

La percepción de imágenes requiere que los sensores permitan la percepción de una señal. Estos sensores se dividen en dos tipos, activos y pasivos. Los sensores activos emiten energía (en forma de ondas de luz o ondas de sonido). Los sensores pasivos utilizan iluminación externa para suministrar energía reflectiva. Estos sensores entonces extraen y procesan las características de la misma forma que los activos.

Una vez que el sensor ha recibido la imagen, son extraídas las características. Este proceso implica la segmentación de la imagen en diferentes regiones. Las regiones son colecciones de características que tienen propiedades similares, tales como color, intensidad, brillo y/o textura. Puntos con características similares generalmente pertenecen al mismo objeto en una imagen. Las características son pues segmentadas en regiones distintas. Las técnicas de segmentación no pueden separar los objetos de una imagen en regiones comprensibles. Por tanto, la extracción de características distintivas requieren un conocimiento a priori de la imagen. La imagen, dividida en regiones

generales con características similares, es además definida por la detección de contornos. En este proceso, cuando se transpasa un contorno son definidas e identificadas variaciones en intensidad, color y/o textura que son utilizadas para identificar puntos del contorno de cualidades similares. Este proceso es conocido también como "la función de inclinación de características de contorno". La extracción de características distintivas está ahora completa. El robot ha obtenido un perfil del objeto, con conocimiento del color, intensidad y textura debiendo ahora analizar la entrada.

El perfil general, color, textura e intensidad de la imagen es almacenado en lógica binaria para comparar la información, especificaciones y parámetros listos en ficheros. Esta comparación se puede realizar como las llevadas a cabo con plantilla, buscando dimensiones aleatorias o una búsqueda masa/volumen. En la identificación de características similares la imagen producida es comparada con la almacenada. De esta forma el robot puede determinar si el objeto está posicionado correctamente en escena, si es de buena calidad ect...

B) Percepción sensorial táctil.

Para aumentar la eficiencia en los sistemas robóticos utilizados en el campo de la manufactura, se requieren otros sentidos como suplemento del sistema visual del robot. La percepción táctil es importante para llegar a allí donde es deficiente el sistema visual. Además, los sistemas robóticos requieren esta percepción para mejorar el control de movimientos. Recientes avances en el desarrollo de sensores táctiles ha llevado a desarrollar un dedo robótico capaz de distinguir entre seis objetos con resolución comparable a la del dedo humano. En la recepción de los modelos obtenidos al contactar el dedo del robot con un objeto, el sistema robótico realiza un análisis de imágenes similar al del sistema visual. Se realizan comparaciones via plantilla, utilizando dimensiones aleatorias o pesos. Recientes desarrollos en el campo de sensores táctiles incluye la utilización de fibras ópticas en sistemas robóticos y efectores.

3.4.1.2 Visión en Robots.

Las cuestiones de visión en robots coinciden, en su planteamiento más general, con la visión por computador. La visión mecanizada como subsistema exige partir de los fines globales del sistema. A niveles altos, la visión robótica ha de considerarse conjuntamente como la integración multisensorial y utilizar el conocimiento global del medio, como parte fundamental del reconocimiento visual. Para ello se debe utilizar:

- a) Un modelo del medio
- b) Estrategias de acción aprendidas o impuestas.
- c) Reglas de decisión basadas en mecanismos cooperativos.

Desde un punto de vista puramente pragmático, para aplicaciones tecnológicas, las cuestiones relativas a la visión computarizada admite, en principio, dos planteamientos:

1. -¿ Qué puede hacerse con las tecnologías actuales de adquisición y proceso rápido de datos, a partir de la imagen visual, para extraer propiedades de aplicación práctica?.

2. - A partir de las posibilidades de representación del conocimiento que las modernas tecnologías de soft y hard proporcionan en los grandes computadores, ¿Cuál es la familia de representaciones apropiadas al mundo

visual y multisensorial?, ¿Cuáles son las transformaciones que permiten pasar a representaciones de más bajo nivel?.

En las aplicaciones robóticas típicas, la necesidad de converger en un sistema concreto y funcional obliga a adoptar la metodología descrita en el apartado 1.

En esencia, el problema de la visión para robots puede resumirse en ensamblar el hard y desarrollar el soft para la adquisición y manejo rápido de datos visuales desde un sensor (cámara de TV o similar), la extracción de propiedades globales relativamente sencillas de la imagen y la representación de las mismas en un formato que sea aceptable para la acción del robot.

Es decir, en lugar de partir de una lista de acciones robóticas deseables que han de estar controladas por la información visual, se parte de dicha información y de los procesos prácticos posibles sobre ella y se concluye cuales son las acciones robóticas que se verían mejoradas por su uso.

La mayoría de los sistemas comerciales de visión robótica existentes en la actualidad presentan un grado de elaboración relativamente bajo. En algunos casos, el sistema visual puede ser utilizado indistintamente en tareas de inspección y de manufactura automática. Por ejemplo:

a) El OMS, desarrollado en Alemania Federal, es un

dispositivo que puede ser usado según, sus fabricantes, en tres modos básicos:

a1) Modo de análisis, para inspección y reconocimiento remoto.

a2) Modo maestro, en que el sistema puede controlar un manipulador en simples tareas automáticas.

a3) Modo esclavo, en el que el sistema es utilizado como subsistema visual de otro computador maestro en tareas de automatización más complejas.

b) El sistema VS-PUMA.

Está integrado, en cambio por manipulador concreto.

c) El sistema Westinghouse.

Este incluye a diferencia de los anteriores, la posibilidad de trabajar en una escala realmente amplia de niveles de grises.

La proliferación de sistemas visuales para aplicaciones robóticas ha sido enorme en los últimos años como quedó de manifiesto en la exposición de VISION-85 de Detroit.

3.4.1.4 Integración del Sistema Visual en un Sistema Artificial

3.4.1.4.1 Introducción

Podemos considerar que la estructura funcional de un sistema de visión artificial consta de dos partes básicas:

1. - Parte de Bajo Nivel.

Estaría compuesta por:

- a) El sensor (cámara).
- b) La representación por pixels (en intensidad).
- c) Los mecanismos de extracción de propiedades (regines, bordes).
- d) La representación de propiedades intrínsecas (distancia, orientación, reflectancia).

Las características principales de este nivel son:

- a) Su independencia del tipo de aplicación.
- b) Sus operaciones están controladas por los datos.
- c) la representación es una imagen (geométrica).

2. - Parte de Alto Nivel.

Las funciones fundamentales:

- a) La segmentación.
- b) La interpretación (reconocimiento, clasificación, expansión semántica).

La representación es simbólica, es específica para cada tipo de aplicación y está controlada por los objetivos

deseados para el sistema.

La concepción más genuina de un sistema visual obliga a considerarlo como un subsistema de un sistema más general a cuyos fines contribuye. Es decir el sistema visual es una parte sensorial, en muchos casos la más relevante, de un sistema completo de "comportamiento artificial" y muchas veces no puede ser entendido sino dentro del contexto del comportamiento global del sistema.

Por ejemplo en el caso de una aplicación robótica, incluso la más sencilla, como es el caso de un manipulador bidimensional, nos permite identificar los dos niveles descritos anteriormente, así como detectar e ilustrar los niveles superiores. Estos han de incluir una posible integración multisensorial, la confección de un modelo sensorial del medio, que en última instancia deben proporcionar un modelo del propio sistema en el medio y otros conceptos relativos a la parte efectora.

3.4.1.4.2 Robótica visual integrada :

Consideremos un sistema visual para ser integrado en un sistema robótico para manipular piezas bidimensionales aisladas. El esquema funcional se muestra en la fig 3.34

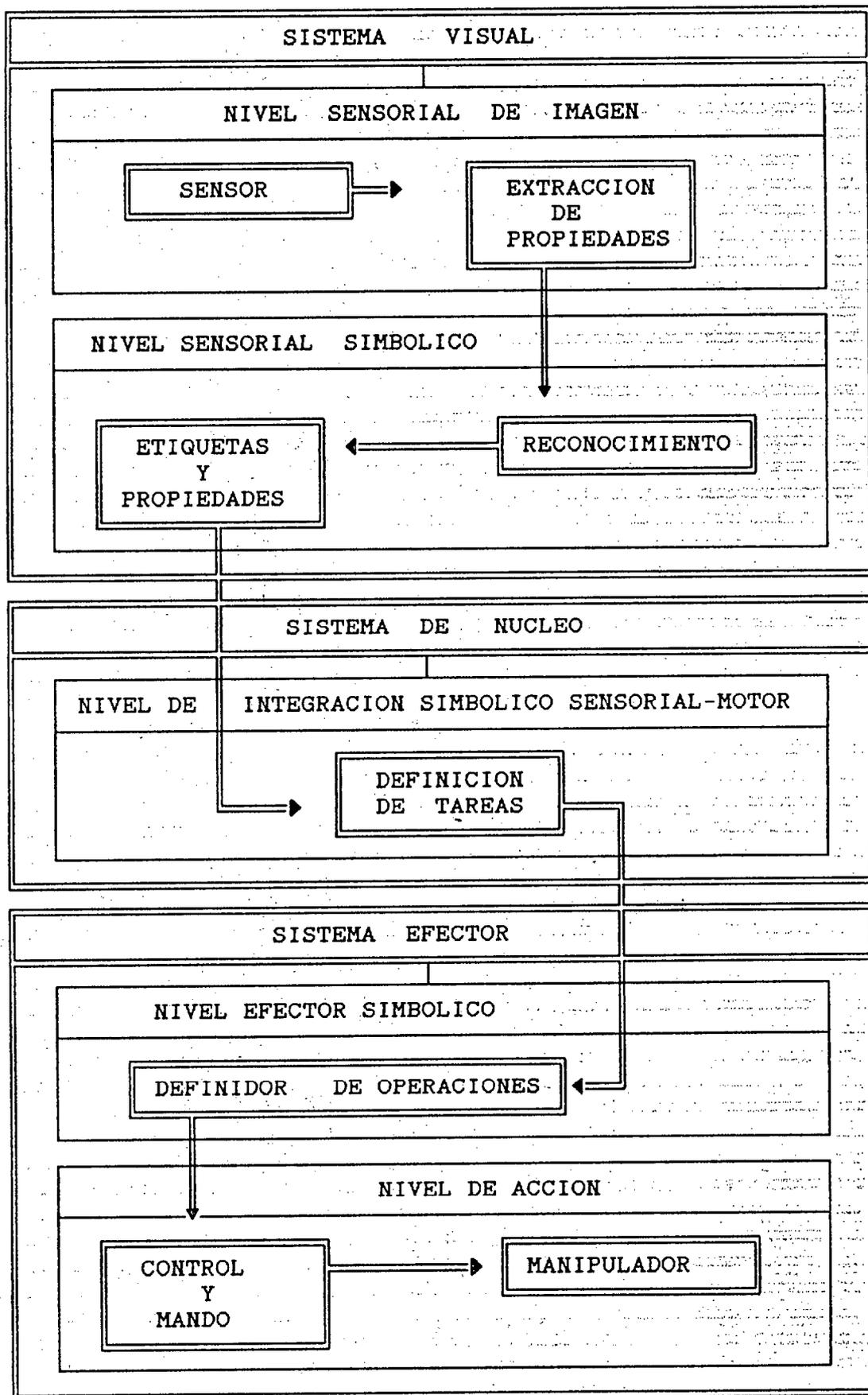


Fig. 30. Esquema funcional de un sistema robótico visual integrado

En este caso, las operaciones a realizar en cada nivel son fácilmente descriptibles e implican operaciones relativamente sencillas, que en caso del sistema visual se pueden resumir en:

1. - Para el nivel de imagen o bajo nivel.

a) Umbralizado de la imagen.

b) Aislamiento de "clusters".

c) Determinación de parámetros para calcular la posición y orientación.

c) Determinación de descriptores integrales que permitan la clasificación.

2. - Nivel sensorial simbólico.

a) Reconocimiento

b) Etiquetado.

O sea que se procede a generar un descriptor simbólico de la pieza, que indica el tipo, posición y orientación.

3. - Nivel de integración simbólico sensorial-motor.

La información generada en el nivel anterior es suministrada al núcleo, donde las tareas están definidas de acuerdo con las mismas. Seleccionada la tarea, a nivel simbólico, (por ejemplo, tomar la pieza en los puntos de

agarre prefijados y llevarla a una localización determinada).

4- Nivel efector-simbólico.

La información del nivel simbólico es transmitida al sistema efector. La parte simbólica de este nivel admite esta descripción y selecciona, o genera, trayectorias y comportamientos motores concretos.

5. - Nivel de acción.

Las trayectorias y los comportamientos motores del nivel anterior a través de este nivel se transforman en las acciones de manipulación deseadas. Naturalmente el nivel de acción es no simbólico.

¿ A qué niveles existe conocimiento exterior "inyectado"? Indudablemente a nivel de reconocimiento y etiquetado visual; en la definición de tareas, y posiblemente, en la definición de trayectorias apropiadas. Es decir en los niveles simbólicos sensorial y motor y a nivel del sistema de núcleo.

Nótese que la diferencia entre procesos controlados por el conocimiento o por los datos no es esencial en la definición de un esquema de comportamiento artificial, aunque sirve para sofisticar el proceso sensorial o motor.

También se puede hablar de "conocimiento estructurado" que sirve para definir trayectorias "complejas" en base a la concatenación, con reglas, de trozos de acción motoras de más bajo nivel.

3.4.2. -Modelo general para el uso de la información cromática en un Sistema Artificial

En los sistemas natural y artificial, la información cromática se utiliza como pista a distintos niveles de abstracción. En un Sistema Artificial lo anterior presenta dos cuestiones, que desde el punto de vista de la inteligencia artificial, pueden ser formuladas de la forma siguiente:

a) ¿Cuál es el marco apropiado de representación de las pistas visuales cromáticas?.

b) ¿A qué niveles y con qué simbolismo debe estar presente dicho conocimiento, dentro de la cadena típica percepción-planificación-acción?.

Para atacar estas dos cuestiones, y según lo que hemos desarrollado en las secciones anteriores, partimos de los dos puntos siguientes:

a) El uso de dos técnicas complementarias para la representación cromática.

b) La apropiada codificación multi-nivel que permite el acceso a los distintos estadios del sistema global de percepción-acción.

Cualquier propuesta en el sentido anterior supone la existencia de un modelo global de percepción-acción.

Ello es así porque, como ha sido reiteradamente indicado desde hace más de veinte años (Sutro, et al., 1965), el fenómeno perceptual artificial no puede ser entendido separado de la acción. Ocurre que dicho modelo de percepción-acción puede ser implícito (o supuesto), o ser explícito. Para lo que sigue, se explicita el modelo en el que nos basaremos, lo que facilita extraordinariamente su seguimiento. Este se corresponde al propuesto por Moreno-Díaz y Mira (1987), y se presenta en la fig. 3.32

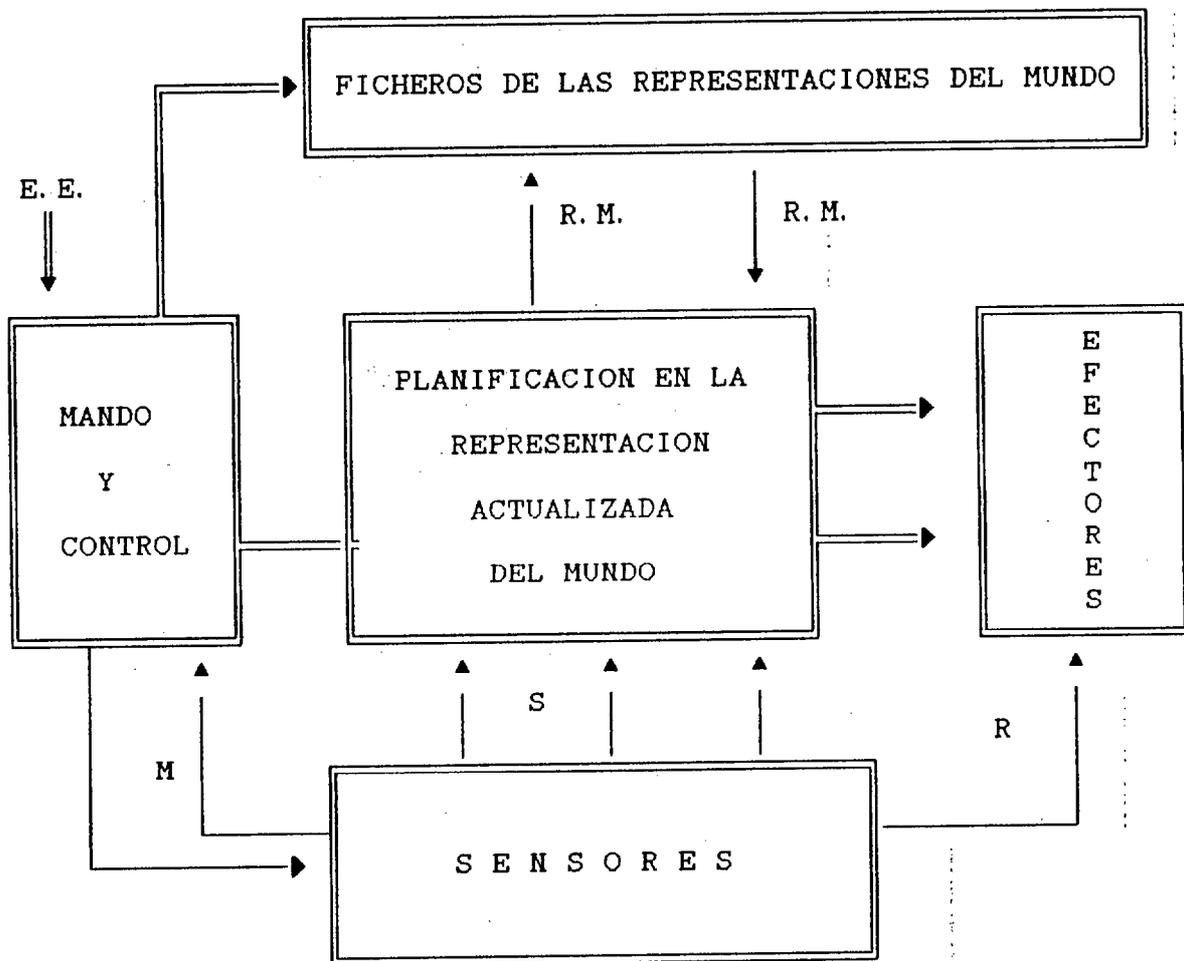


Fig. 3.32 Estructura General para Integración de la Percepción-Acción

Una simplificación de una vista muy general del Sistema Nervioso (S.N.) en términos análogos a los propuestos por McCulloch y Sutor (1969) se muestra en la figura 3.32. Aunque realmente esto simplifica su propósito original, tiene la considerable ventaja de que cada uno de los componentes principales muestran tener contrapartidas muy concretas en la inteligencia artificial y robótica modernas.

Primero, el sistema global presenta un conjunto de "modos de comportamiento" que imitan el modelo de comportamiento aceptado de los vertebrados (Kilmer et al., 1969). La selección de un modo particular es realizado por el sistema de mando y control, basado principalmente en la información sensorial presente y en el estado del sistema. Desde el mundo exterior se permite una entrada externa (E.E.) (en la práctica, procede de una consola del operador) para modular la selección de un modo.

La información concerniente al modo seleccionado (M) se envía a los sensores que son adaptados para optimizar la adquisición de datos sensoriales relacionados con el modo de acción. También es enviada al componente denominado Ficheros de Representaciones del Mundo, en el cual el modelo apropiado del medio y del sistema en el medio es seleccionado para enviarlo al componente llamado Planificación de Representación del Mundo

Actualizado (P. R. M. A.). Finalmente, el modo seleccionado manda y controla el proceso de establecer objetivos acordes con el modo, el proceso de planificación y ejecución del plan, teniendo en cuenta continuamente los datos sensoriales (S) procesados. Las representaciones del mundo actualizado, son devueltas a través de las líneas R. M. cuando el modo cambia.

También hay conexiones directas entre sensores y efectores (línea R) las cuales son equivalentes a trayectorias reflejas. La línea E suministra instrucciones de alto nivel a los efectores de acuerdo con el plan de acción, que son decodificadas en acciones concretas motor-efector.

La información cromática es un aspecto, o pista, a ser usada en los distintos niveles decisorios del sistema percepción-planificación-acción. Por consiguiente, debe estar presente en dichos niveles con el apropiado etiquetado representativo.

Para ello, distinguiremos el nivel de clustering crómico, el nivel crómico sensorial invariante y el nivel de etiquetado simbólico.

La cualidad cromática es adjudicable a zonas identificadas o no, en el campo visual, en un proceso que parte de la retina por un lado, y puede venir impuesta como hipótesis de coherencia desde un procesador superior. Esto permite distinguir el tipo de

entradas a cada proceso cromático, tal como se ilustra en la fig. 3.32.

El clustering cromático en el espacio físico de la entrada visual actúa esencialmente en los mecanismos de decisión del "modo de acción" del sistema.

Desde el punto de vista filosófico, ello significa que en el Sistema Nervioso Natural las conexiones básicas que proceden de la retina o los cuerpos geniculados, hasta la formación reticular son señales con un bajo grado de proceso, indicados por las líneas A.

Estos contienen información cromática elemental que la filogenia ha asociado -con otros signos y síntomas visuales- a situaciones de supervivencia. De ahí la importancia de la integración multimodal representada en la fig. 3.32 .

El sistema de Mando y Control es el que sintoniza los filtros sensoriales, en particular el color. Esto se realiza a través de las líneas de control B. Dada una situación espacio-temporal sensorial, el sistema de mando y control puede ordenar una espacial sintonía del sistema sensor en los niveles -si no físicos- sí de invarianzas y etiquetado simbólico.

El sistema perceptual cromático es, a todas luces, un sistema "esclavo", por ser subparte funcional del sistema visual, tal como se indicó en subsecciones

anteriores.

Estructuralmente, este no es distinguible de un sistema perceptual visual. Pero si las mismas estructuras realizan distintas funciones, el pensar en dicotomías estructurales, no reales, pero funcionales, es apropiado. En ese sentido, se justifican las distribuciones funcionales siguientes:

a) Para la definición del "modo de acción" por parte del Sistema de Comando y Control, son pistas importantes las identificaciones espacio-temporales-cromáticas realizadas a nivel de clusterización en espacios cromáticos físicos.

b) De la misma manera, lo son las identificaciones a nivel de invarianza en transformaciones del contenido espectral, aunque éstas empiezan a tener un sentido de utilidad en planificación, dadas sus extensiones espacio-temporales.

c) La representación cromático-simbólica (esto es, lo que significa determinado color asociado a un objeto) en un determinado contexto, corresponde y es controlado por las estructuras de planificación corticales.

Esto es relativo a las salidas, a distinto nivel del sistema cromático de percepción.

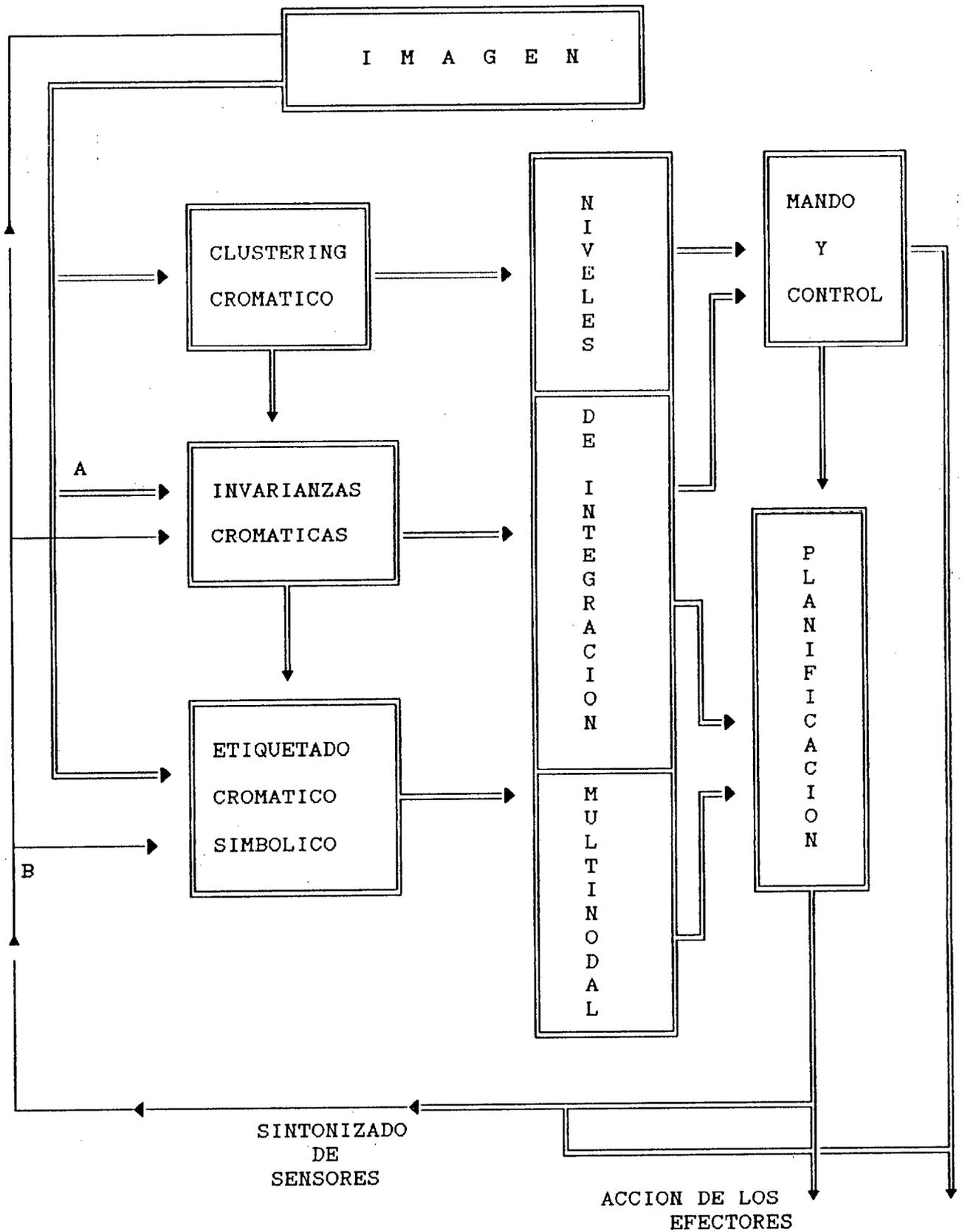


Fig. 3.32 Niveles Decisorios del Sistema Percepción-Planificación-Acción

Respecto del control ejercido por estructuras superiores sobre el subsistema perceptual, en lo que respecta a la modalidad cromática, y según la misma fig. 3.4.2, existen controles en, al menos, dos niveles, los dos superiores.

Un color determinado (azul oscuro), en extensiones físicas amplias puede ser un síntoma que es interpretado como perjudicial. El sistema de mando y control sintonizará los sensores, y actuará sobre el espacio de invarianzas cromáticas, para la situación modal de alerta.

En orden superior, por procesos de aprendizaje, se puede adquirir la regla de estar alerta - es decir, de ir a un modo de comportamiento, - por la presencia asociada de una propiedad cromática, independientemente de su composición espectral física concreta. En este caso, son dominantes las estructuras del nivel 2, de invarianzas.

Y finalmente, con etiquetados simbólicos en colores, objetos y situaciones, en el modo de planificación, no sólo se pueden percibir los valores físicos o invariantes, sino que estos pueden ser "forzados", por coherencia de planificación, a "parecerse" al color más próximo, en uno de los espacios anteriores, sea el de clusterización física, o el de invariantes cromáticos.

Lo anterior es una propuesta de integración de las

pistas cromáticas en la cadena percepción-acción. Creemos que sólo la integración multimodal ayude a llegar a un sistema sofisticado de percepción-acción. En ese sentido, admitimos las limitaciones sobre nuestras propuestas, pero se insiste en la relevancia que las pistas cromáticas tienen en el comportamiento de los vertebrados evolucionados, a distintos niveles. Por consiguiente esta propuesta indica cuáles son los temas de investigación relevantes en percepción cromática relacionada con el comportamiento artificial.

La formulación de un modelo actualizado del medio multimodal sigue siendo uno de los grandes temas pendientes lo mismo que el problema de la representación visual. En el lado efector, los problemas son semejantes, encontrándose quizá en la definición de "átomos" de acción apropiados para construir acciones efectoras complejas.

Se llega así, en visión artificial cromática o acromática, a un punto parecido al que ha llegado el análisis de la percepción humana.

El fenómeno perceptor humano no puede ser entendido aisladamente considerando cada modalidad. Es preciso adoptar un punto de vista de comportamiento considerando efectores y la acción de cierto sistema núcleo como elemento de mando y control. El desarrollo fragmentario y "ad hoc" de los temas relacionados con la visión

artificial presenta síntomas parecidos a los de la neurofisiología del camino visual y de la percepción visual humana cuando ésta no ha tomado actitudes integradoras, por lo que al menos, estos dan una pista sobre lo que no debe hacerse en los proyectos de visión, percepción y comportamiento artificial.

IV MODELOS DE CODIFICACION RETINAL (TEORIA RETINAL)

MODELOS DE CODIFICACION RETINAL

4.1- Formulación General.

4.1.1. - Objetivos.

La retina codifica la información visual en forma de impulsos, a partir de la células ganglionares como respuestas a estímulos visuales, como ha sido ampliamente demostrado. Se ha intentado estudiar esta codificación mediante distintos modelos retinales que se agrupa en diferentes categorías : modelos lineales-espaciales, modelos lineales-cromáticos, modelos lineales espacio-cromáticos y modelos no lineales.

El modelo espacio-cromático se supone que la retina es un sistema de computación por capas sin que ello signifique una correspondencia biunívoca entre dichas capas de computación y las capas anatómicas de la retina.

A cada capa se le asocia un sistema de referencia bidimensional, de modo que cualquier elemento computacional será localizado por un par de coordenadas espaciales.

Para especificar la función realizada por cada elemento de computación, se define una función que relaciona las salidas con las entradas a la capa, dicha función

será la misma para todos los elementos de una misma capa.

Basándonos en el esquema funcional básico para el caso estático desarrollado con anterioridad para explicar el proceso monocolor, hemos elaborado un modelo de primer nivel de proceso retinal del color, extendiendo a tres dimensiones el esquema anterior, siendo la tercera dimensión considerada la longitud de onda del estímulo físico incidente en la retina. La operación estática de las células retinales aparece entonces como una convolución en el espacio de tres dimensiones homogéneas (dos coordenadas espaciales más una de la longitud de onda).

Los núcleos espacio-color, que lógicamente son postulables para las convoluciones, que corresponden a la generalización de las estructuras centro-periferia encontradas en el espacio, en el comportamiento monocolor, y que aparecen así mismo cuando se incluye la coordenada tiempo.

Se ha estudiado el comportamiento del modelo, mediante la simulación del mismo con un sistema cámara-ordenador, siendo las entradas del sistema imágenes reales, las cuales han sido coloreadas mediante un programa de ordenador.

4.1.2 Hipótesis básicas.

Basándonos en el esquema funcional básico desarrollado anteriormente por Rubio-Royo (1969) y Fernández-Escartín (1976) completados con los modelos generalizados por (Moreno-Díaz et al., 1978), nos ha sugerido el modelo espacio-cromático-temporal, que sirve de marco para la simulación de las propiedades de la mayoría de las células codificadoras de color observadas en los vertebrados.

La idea básica del modelo aplicado para desarrollar los modelos anteriores es suponer que el proceso de datos en la retina se realiza por capas de elementos computacionales, es decir que consideramos la retina como un sistema que procesa por capas la información que le llega del exterior. La neurofisiología retinal sugiere la posibilidad de un tratamiento de la información recogida por los fotorreceptores se realice por capas, ahora bien, estas capas computacionales no tienen que coincidir con las capas funcionales. Normalmente en los modelos microscópicos, donde varias capas computacionales corresponden a una capa de células o sinapsis, o lo contrario como es nuestro caso en que modelos globales "input-ouput" que a una capa computacional corresponden diferentes estructuras anatómicas y/o funcionales.

No pretendemos que nuestro modelo refleje exactamente las funciones retinales, sino que proporcione en primera aproximación cuales son las posibles operaciones que la retina realiza con respecto al color, de acuerdo con su estructura morfológica.

En este primer nivel solo estudiaremos el "input-ouput" del sistema, lo que nos puede dar una idea aproximada de como la retina procesa el color. Tomaremos en consideración los siguientes puntos:

a) Centramos la atención del modelo en la fovea, punto que neurofisiológicamente hay una mayor concentración de conos que van disminuyendo paulativamente hacia la periferia de la retina, ya que los conos son los principales protagonistas del color aunque no los únicos.

b) La interacción lateral entre distintos fotorreceptores tienen lugar a través de factores de peso, que serán función de los elementos que interaccionan, dentro del cual va incluido un factor de la longitud de onda.

c) El efecto total sobre un elemento sujeto a interacción lateral lo consideramos lineal.

4.1.3. - Formulación

Para un desarrollo adecuado del modelo, es preciso realizar una descripción detallada de lo que entendemos por computación por capas, independientemente del nivel de aplicación del concepto en la descripción de las funciones retinales. En general, la computación por capas sucede no sólo en sistemas de procesamiento visual, sino en cualquier sistema cuyas funciones globales pueden decomponerse en subfunciones que son llevadas a cabo por elementos de computación con características funcionales semejantes. Dichos elementos de computación son, precisamente, las componentes de cada capa, de tal manera que la subfunción realizada por dicha capa se expresa como la función cooperativa de los elementos computacionales que la forman.

En principio, no existen restricciones a las posibles interconexiones entre elementos de computación y, por lo tanto, se admite la realimentación entre capas.

Las líneas de entrada a una capa computacional, proporcionan la información de entrada a dicha capa y, del mismo modo, la capa transmite la información de salida a través de un número de líneas de salida, una por cada elemento computación. Se supondrá un sistema de referencia bidimensional para cada capa, de modo que cualquier elemento computacional, pueda ser localizado por un par de coordenadas espaciales (x, y) . La función

llevada a cabo por cada elemento de computación es por medio de una función que relacione las salidas de dicha capa con las entradas, siendo la misma para todos los elementos de dicha capa. Esta función podrá ser lineal, o no lineal.

Introduciremos en primer lugar la formulación general de sistemas lineales espacio-temporales-cromáticos.

Si consideramos una imagen como el resultado de la incidencia de una función luminosa $Y(x, y, \lambda, t)$ procedente de una fuente luminosa que emite energía radiante sobre una escena. Todo el conjunto constitutivo de la misma absorberá, reflejará, transmitirá determinadas radiaciones. Luego la imagen es el producto de una acción representada en términos de reflectancia, esto es:

$$F_1(x, y, \lambda, t) = Y(x, y, \lambda, t) R(x, y, \lambda, t) \quad (4, 1)$$

Para $0 < Y(x, y, \lambda, t) < \infty$

La función $R(x, y, \lambda, t)$ caracterizará a la escena a la cual llega la radiación, que normalizada poseerá valores comprendidos entre 0 y 1.

La reflexión es siempre un fenómeno de banda ancha y el color de un objeto es debido a las grandes bandas de absorción que le caracterizan. Así un objeto que absorba toda la radiación es un cuerpo negro y su reflectancia valdrá:

$$R(x, y, \lambda, t) = 0 \quad \text{para todo valor de } t \text{ y } \lambda.$$

mientras que el blanco absoluto reflejará todo lo que le llega, siendo

$$R(x, y, \lambda, t) = 1$$

Por lo tanto esta función tendrá valores comprendidos entre 0 y 1.

$$0 < R(x, y, \lambda, t) < 1$$

La función; $F(x, y, \lambda, t)$ constituye la imagen en su aspecto más general, en cada punto de la misma existe una radiación, con un espectro de energía determinado cuya composición es variable a lo largo del tiempo. Esta función nos permite generar un espacio de entradas, que llamaremos $X_{\alpha\beta\lambda\tau}$ y un espacio de salidas Y_{xyt} .

$$Y_{xyt} = F(X_{\alpha\beta\lambda\tau}) \quad [4.2]$$

Donde F representa la acción ejercida por el sistema sensor sobre el conjunto de la radiación incidente y dependerá como es lógico de la estructura global del mismo. La fig. 4.1 nos muestra la generación de la imagen incidente y el espacio de salidas.

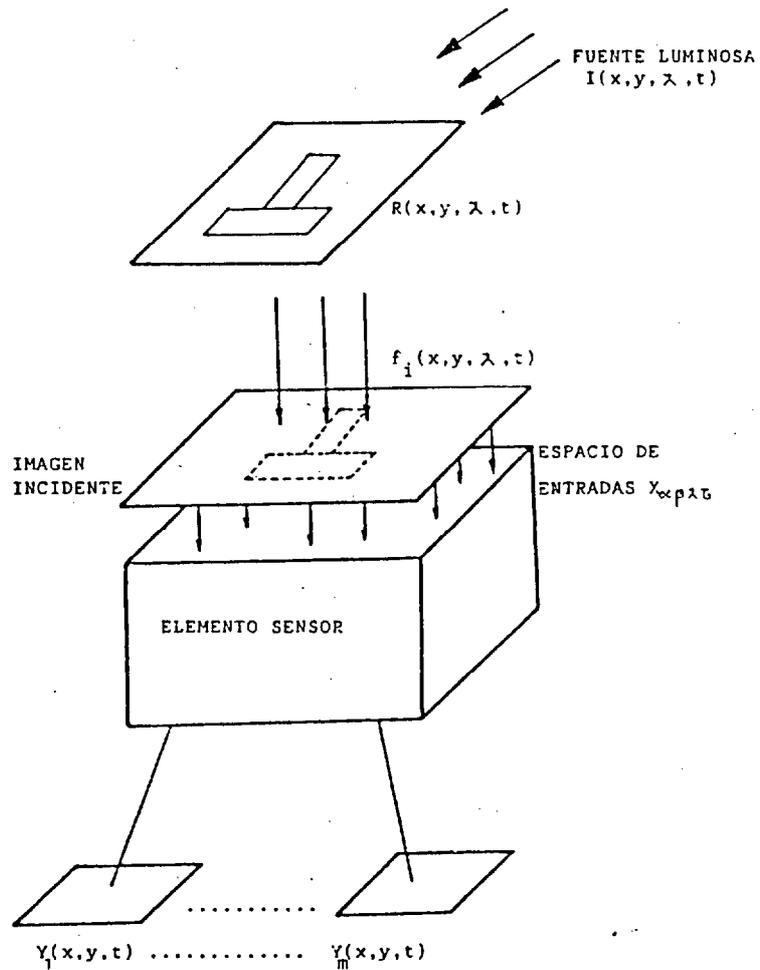


Fig. 4.1 Generación de la imagen incidente.

Con la finalidad de obtener expresiones más concretas que describan mejor el espacio de salidas y que se ajusten a casos particulares Rubio-Royo (1979), Moreno-Díaz et al. (1979) se desarrolla en serie de Taylor, teniendo en cuenta la respuesta espontánea $F_{xyt}(0)$ que se produce en el sistema en ausencia de estímulo incidente:

$$Y_{xyt} = F_{xyt}(0) + \sum_{\alpha\beta\lambda} W_{xyt\alpha\beta\lambda} X_{\alpha\beta\lambda\tau} +$$

$$+ \sum_{\alpha\beta\lambda\tau} \sum_{\alpha'\beta'L'} W_{xyt;\alpha'\beta'L'\tau';\alpha\beta\lambda\tau} X_{\alpha\beta\lambda\tau} X_{\alpha'\beta'L'\tau'}$$

[4. 3]

Donde:

$$W_{xyt\alpha\beta\lambda\tau} = \left[\begin{array}{c} \frac{\partial F}{\partial X_{xyt}} \\ \frac{\partial X_{\alpha\beta\lambda\tau}}{\partial X_{\alpha\beta\lambda\tau}} \end{array} \right] X_{\alpha\beta\lambda\tau} = 0$$

$$W_{xyt, \alpha\beta\lambda\tau, \alpha'\beta'L'\tau'} = 1/2 \left[\begin{array}{c} \frac{\partial^2 F}{\partial X_{xyt} \partial X_{\alpha\beta\lambda\tau}} \\ \frac{\partial X_{\alpha'\beta'L'\tau'}}{\partial X_{\alpha'\beta'L'\tau'}} \end{array} \right] 0$$

Los distintos sumandos globales de la ecuación anterior representan la interacción espacio-cromático-temporal llevada a cabo por el sistema.

Para (λ) continua la ecuación anterior nos quedaría para núcleos computacionales lineales en (λ) .

$$\begin{aligned}
Y(x, y, t) = & F(x, y, t) + \int_{-\infty}^t \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \iint_R W(x, y, t; \alpha, \beta, \lambda, \tau) \\
& X(\alpha, \beta, \lambda, \tau) \, d\alpha \, d\beta \, d\lambda \, d\tau + \\
& + \int_{-\infty}^t \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \iint_R \int_{-\infty}^{\lambda_n} \iint_R W(x, y, t; \alpha, \beta, \lambda, \tau; \alpha', \beta', \lambda', \tau') \\
& + X(\alpha, \beta, \lambda, \tau) X(\alpha', \beta', \lambda', \tau') \, d\alpha \, d\beta \, d\lambda \, d\tau \, d\alpha' \, d\beta' \, d\lambda' \, d\tau' +
\end{aligned}$$

[4.4]

Donde R es el campo receptivo del sistema sensor y supondremos que $F(x, y, \lambda, t)$ se encuentra definida para todos los puntos y y λ_1, λ_n los límites de percepción espectral del sistema. Se admite que las entradas λ_1, λ_n proceden de un sistema continuo, mientras que las salidas forman también un espacio continuo. Desde el punto de vista anatómico, ello implicaría que los elementos retinales en cada capa estarían lo suficientemente próximos los unos a los otros, para poder pasar de una doble suma a una integral doble, lo cual se extendería sobre toda la retina.

Si $X(\alpha, \beta, \lambda, t)$ es la entrada del sistema en el punto (α, β) para la capa (λ) en el instante t y $Y(x, y, t)$ la salida en el punto (x, y) en el instante t . Con lo cual para sistemas continuos e invariantes en el tiempo, el espacio de salidas queda:

$$Y(x, y, t) = F(x, y, t) + \int_{\lambda_1}^{\lambda} \int_R W(x, y; \alpha, \beta, \lambda) X(\alpha, \beta, \lambda, t)$$

$$d\alpha \, d\beta \, d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda} \int_R \int_{\lambda_1}^{\lambda} \int_R W(x, y; \alpha, \beta, \lambda; \alpha', \beta', \lambda')$$

$$X(\alpha, \beta, \lambda, t) X(\alpha', \beta', \lambda', t') \, d\alpha \, d\beta \, d\lambda \, d\alpha' \, d\beta' \, d\lambda' + \dots$$

[4. 5]

4.2. - Codificación espacio-cromática: Modelo Estático

En esta parte nos restringimos al caso estacionario, de esta manera no se consideran los posibles retardos que puedan presentarse en la interacción. Suponemos que debido al grado de interacción del elemento sensor, las fluctuaciones en la radiación incidente pueden considerarse despreciables frente al orden de magnitud de los tiempos.

Entonces la ecuación [4.5] puede escribirse

$$\begin{aligned}
 Y(x, y) = & F(x, y) + \int_{\lambda_1}^{\lambda} n \iint_R W(x, y; \alpha, \beta, \lambda) X(\alpha, \beta, \lambda) d\alpha d\beta d\lambda + \\
 & + \int_{\lambda_1}^{\lambda} n \iint_R \int_{\lambda_1}^{\lambda} n \iint_R W(x, y; \alpha, \beta, L; \alpha', \beta', \lambda') X(\alpha, \beta, \lambda) \\
 & X(\alpha', \beta', \lambda') d\alpha d\beta d\lambda d\alpha' d\beta' d\lambda' + \dots
 \end{aligned}$$

[4.6]

Entonces para procesos lineales continuos en el espacio y en (λ) e invariantes en el tiempo sin respuesta espontánea tendremos:

$$Y(x, y) = F(x, y) + \int_{\lambda_1}^{\lambda} n \iint_R W(x, y; \alpha, \beta, \lambda) X(\alpha, \beta, \lambda) d\alpha d\beta d\lambda$$

[4.7]

El modelo está formado por una serie de capas espaciales en (x, y) donde el tercer eje (λ) forma ya parte del espacio de representación del estímulo de entrada. Como la estructura de la retina indica que existe contacto entre los pies de conos adyacentes (Dowlin, 1966) ello implica que la respuesta de un cono no depende del estímulo a que se encuentre sometido, sino de la respuesta de los más próximos. Debido a esto y al efecto de feed-back entre células horizontales y pie de conos Miller (1986) la interacción es de la llamada recurrente

Fig. 4.2

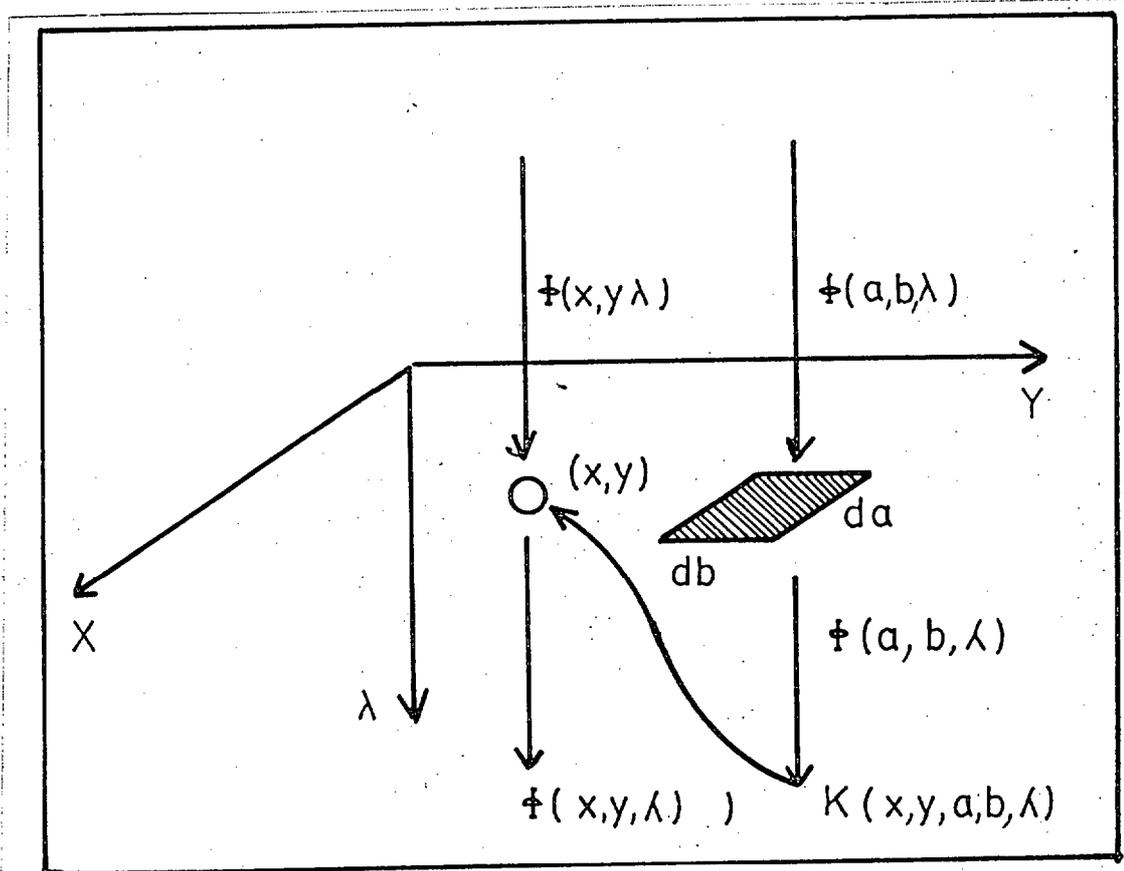


Fig. 4.2 Sistema de referencia cromático-estático

Si se acepta que los distintos fotorreceptores interaccionan sólo con los de su mismo tipo, con lo cual sólo se van a activar aquellos para los cuales dicha longitud de onda le hace superar el umbral de disparo, luego podemos suponer n canales independientes y a cada canal corresponderá una ecuación del tipo anterior

$$Y_K(x, y) = F(x, y) + \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \iint_{R_K} W(x, y; \alpha, \beta, \lambda) X(\alpha, \beta, \lambda) d\alpha d\beta d\lambda$$

[4. 8]

Para $k= 1, 2, \dots, n$

Si suponemos que los núcleos

$$W_K(x, y; \alpha, \beta, \lambda) = W_{SK}(x, y; \alpha, \beta) W_{CK}(\lambda) \quad [4. 9]$$

Lo cual significa que la parte cromática de la respuesta es la misma para todos los puntos de la capa.

Si suponemos que el núcleo es factorizable se puede poner como un núcleo de diferencias en el espacio multiplicado por un factor correspondiente a la longitud de onda. Esto implica una invariancia espacio-cromática, es decir que todos los elementos de una capa desarrollan la misma función.

4.2.2. - Simulación.

Para simular el modelo en el ordenador se ha utilizado un espacio-color de entrada que se ha rellenado con una serie de versiones (o componentes) por un sistema cámara-ordenador, donde se ha utilizado una cámara en blanco y negro.

Para la adquisición y digitalización de la imagen se ha utilizado el sistema cámara-ordenador cuyo esquema se representa en la fig. 4.3 .

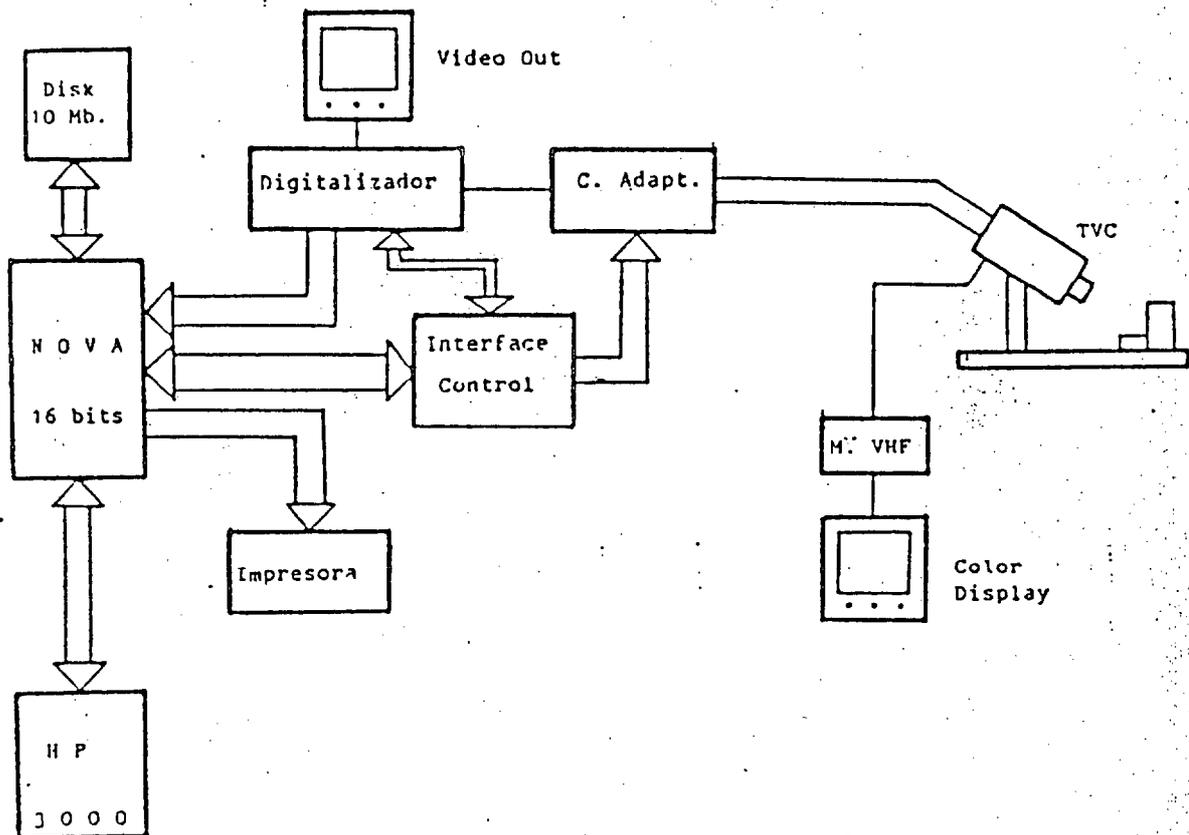


Fig. 4.3 Esquema de la adquisición de imágenes

La imagen original digitalizada se pasa al Editor del HP-3000 en una matriz de 116*128. Esta imagen tiene unos tonos de grises que varían desde 0 a 255, correspondiendo 0 al blanco y 255 al negro.

A partir de esta imagen inicial, las distintas versiones -que corresponden a la simulación de las distintas componentes a lo largo del eje de longitudes de onda- se obtienen cambiando la intensidad relativa de la imagen original y de la imagen a escala invertida.

Las imágenes a escala invertida se obtienen cambiando la escala de grises haciendo una correspondencia de

0====> 255 y 255====> 0.

De esta manera la imagen inicial y la imagen a escala invertida se someten a un proceso de "coloreado" con un programa llamado COLORED

Este proceso de "coloreado" origina diez versiones, de las cuales cinco se corresponden con las componentes no invertidas que han sido guardadas en ficheros con los nombres de NINVER1 hasta NINVER4.

La imagen a escala invertida también es "coloreada" y guardada en ficheros con los nombres de INVER1 hasta INVER4.

De esta manera formamos el espacio-color de entrada con diez versiones a las que se le han añadido dos versiones de componente nula. El espacio-color de entrada se representa en la fig. 4.4

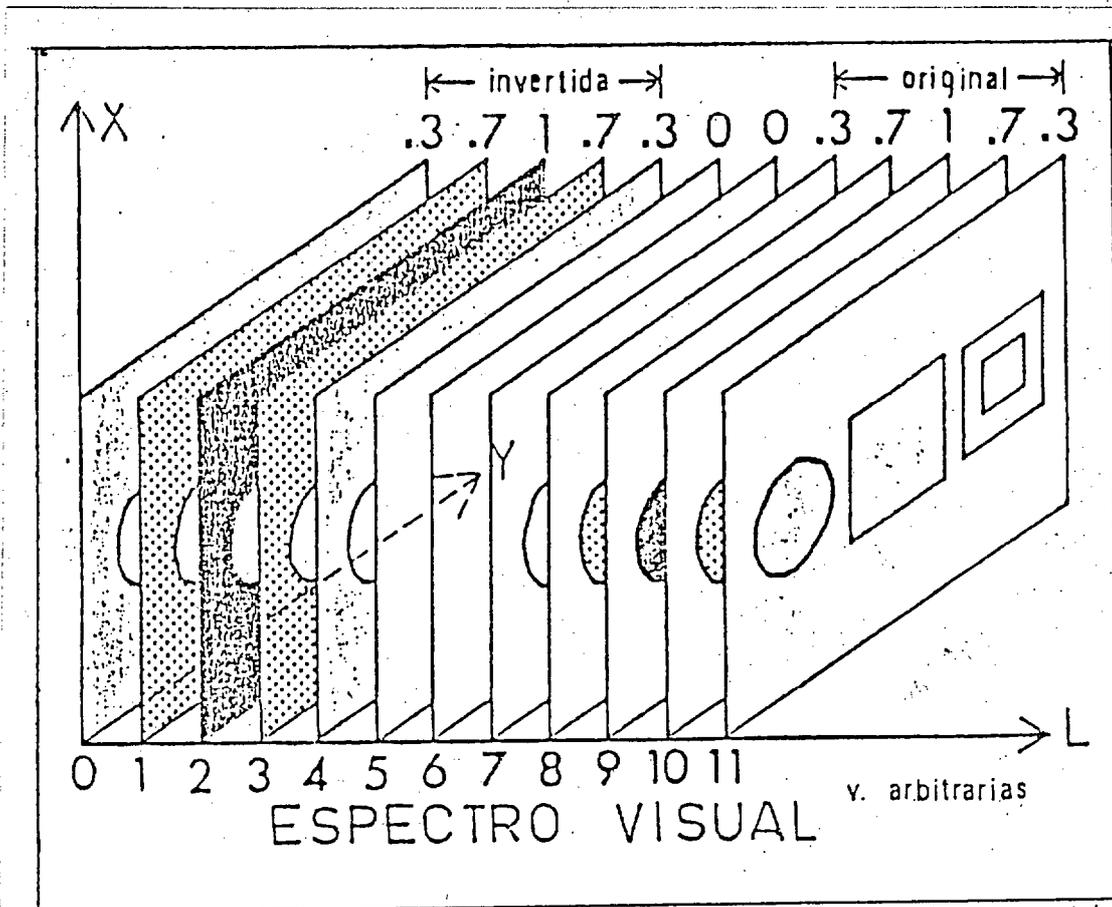


Fig. 4.4 Esquema del espacio-color de entrada

En la figura vemos que se utiliza un eje de longitudes de ondas con unidades arbitrarias, donde cada versión lleva el correspondiente factor de escala. La imagen inicial [señalada por (a) en la fig. 4.4] y la imagen a escala invertida [señalada por (b) en la misma] se muestran en la fig. 4.5 y 4.6 respectivamente.

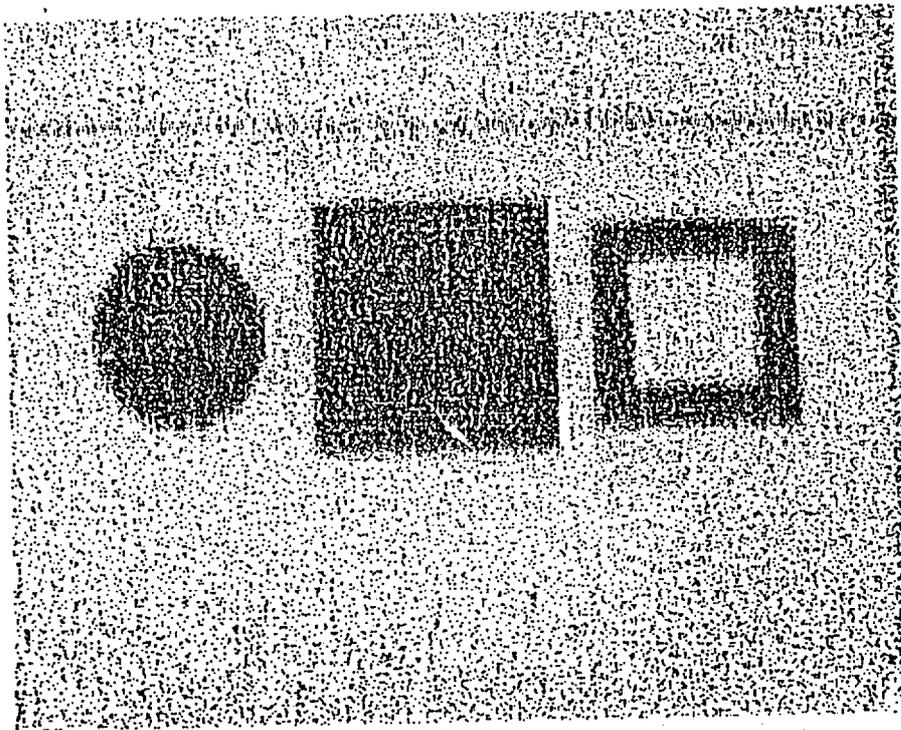


Fig. 4.5 Imagen inicial

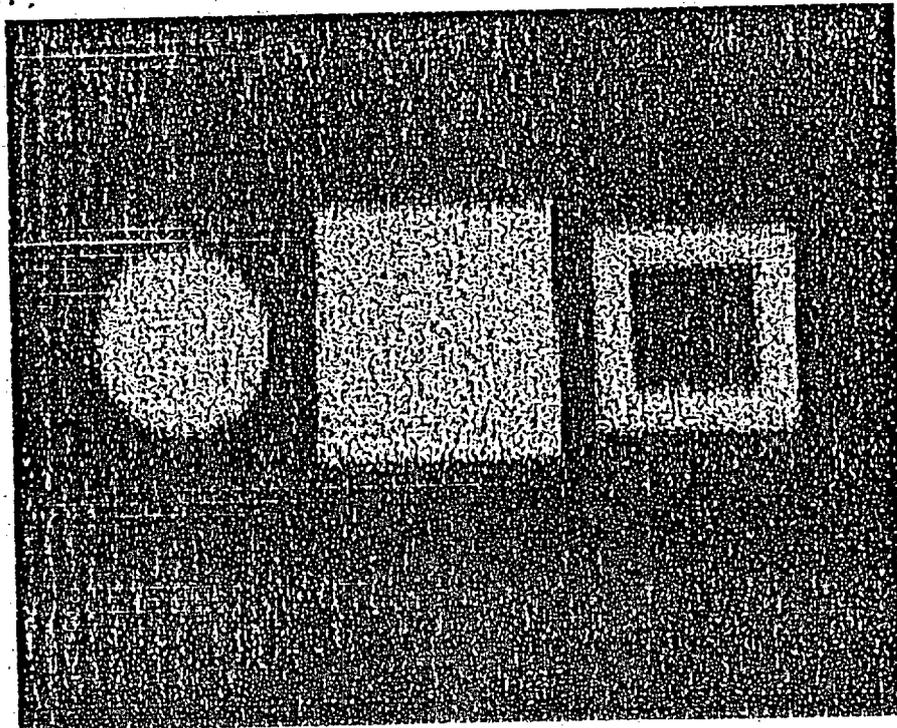


Fig. 4.6 Imagen invertida

En la primera parte de la simulación se han utilizado núcleos de convolución espacio-cromáticos más sencillos. La parte espacial de los núcleos de convolución es equivalente a un filtro pasa baja, que degrada en principio, la resolución inicial de cada componente. La parte cromática corresponde lo que por analogía temporal, pueden denominarse ON y OFF cromáticos. Los núcleos de convolución utilizados se ilustran en la fig. 4.7.

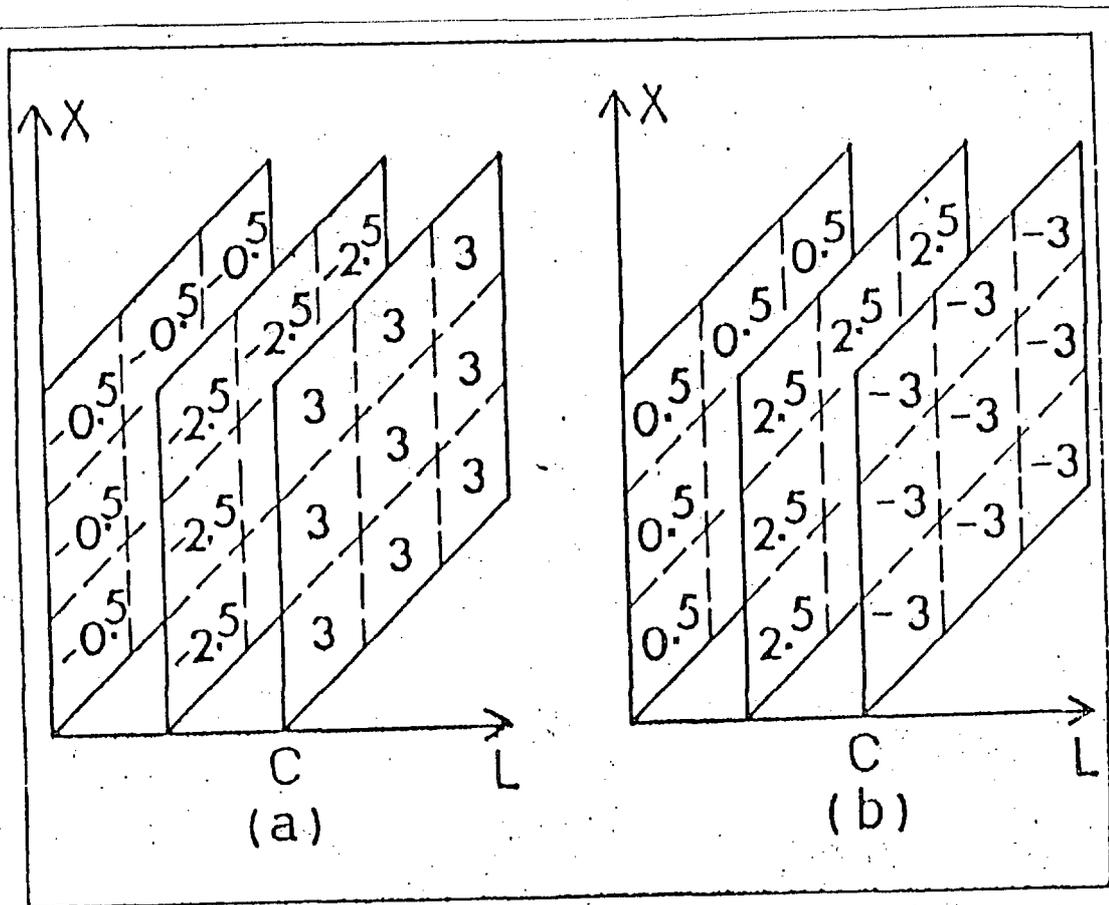


Fig 4.6 Núcleos espacio-cromáticos de convolución

Donde a) es el núcleo ON y b) es el núcleo OFF siendo C el centro del núcleo. En las interpretaciones que siguen se supone que el centro del núcleo corresponde a la componente de mayor longitud de onda del mismo.

4.2.3 Intepretación de resultados.

Los resultados se han obtenido haciendo convolucionar el núcleo a través de todo el espacio de entradas. Esto se ha desarrollado con un programa ESPROM1 que nos guarda los resultados de la convolución en unos ficheros creados previamente en EDITOR llamados SFOTO numerados de 1 a 10. Mostramos aquí sólo algunos de los resultados obtenidos.

La fig. 4.7 muestra el resultado de la convolución con el núcleo (a) en el punto 2.

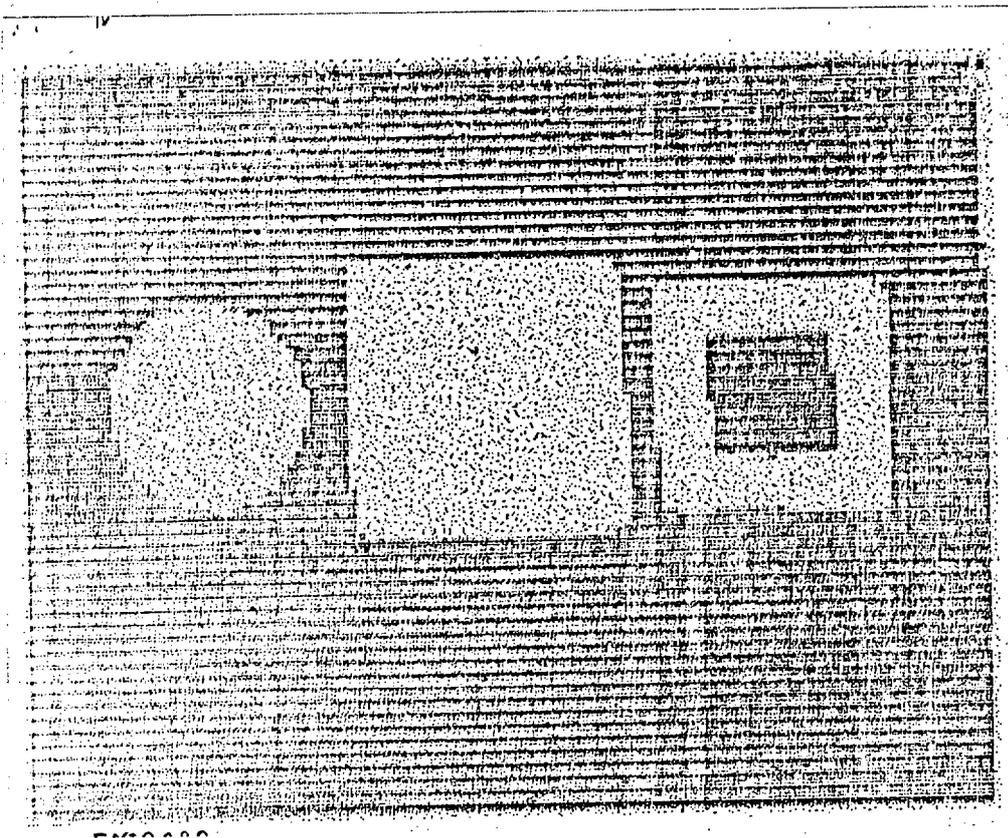


Fig. 4.8 Resultado de la convolución de (a) en 2.

Según se ve, la componente presente en la versión dos es inhibida por las componentes presentes en la 0 y 1 por lo que después del proceso, se reproduce la componente 2 atenuada y ligeramente desenfocada.

El resultado de la convolución en el punto 4 es mostrada en la fig. 4.9.

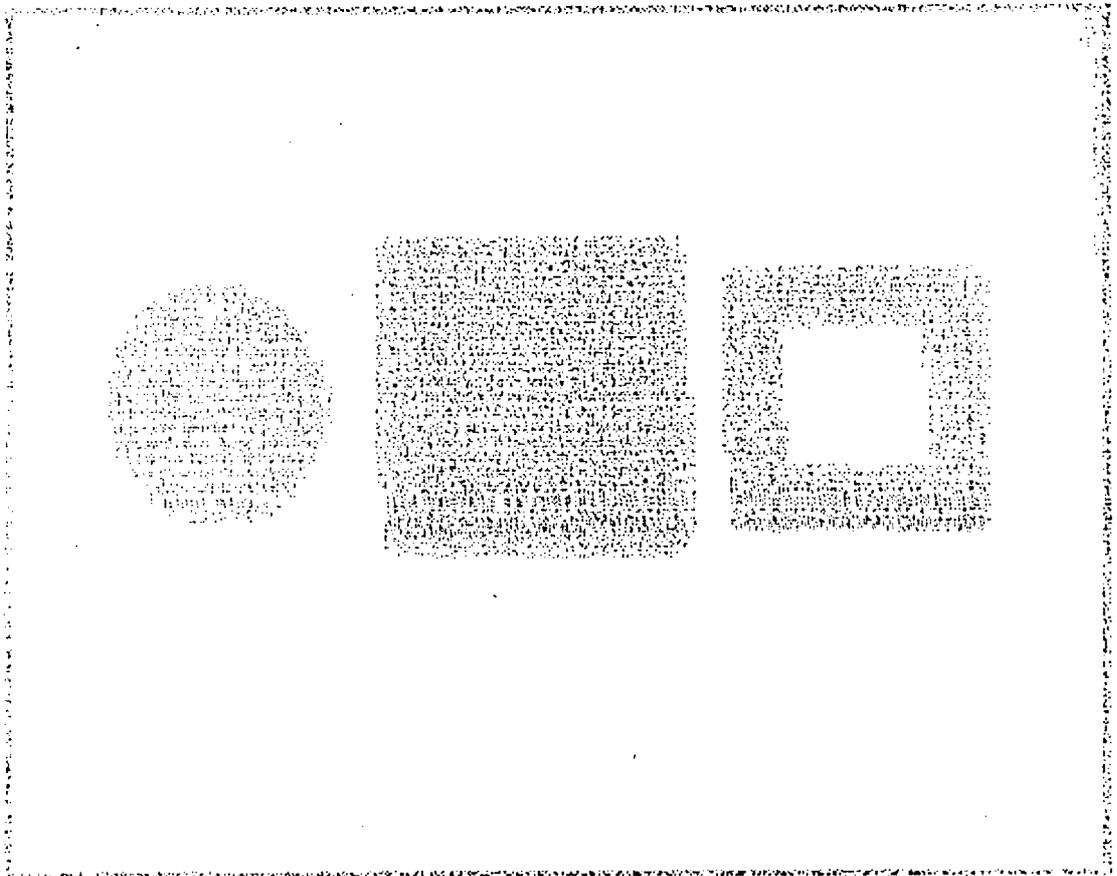


Fig. 4.9 Resultado de la convolución de (a) en 4

Como se ve, reproduce la imagen original atenuada, a pesar de que todas las componentes de entrada corresponden a la imagen a escala invertida. Ello es debido a la acción inhibidora dominante y a la linealidad del proceso.

Si se consideran las componentes de la 0 a la 5 la imagen correspondiente en el espacio de entrada no presenta contrastes espaciales en color, puesto que cada punto de cada componente se obtiene a través de un factor aplicado a una misma imagen original que en este caso es la imagen invertida en escala.

Sin embargo, el resultado del proceso de convolución del punto 2 a 5 si presenta contrastes cromáticos espaciales, por aparecer versiones de la otra imagen en los resultados, o sea de la imagen original. Por lo tanto este tipo de núcleos realiza transformaciones en el espacio de color.

La fig. 4.10 muestra el resultado de convolucionar el núcleo (b) en el punto 8.

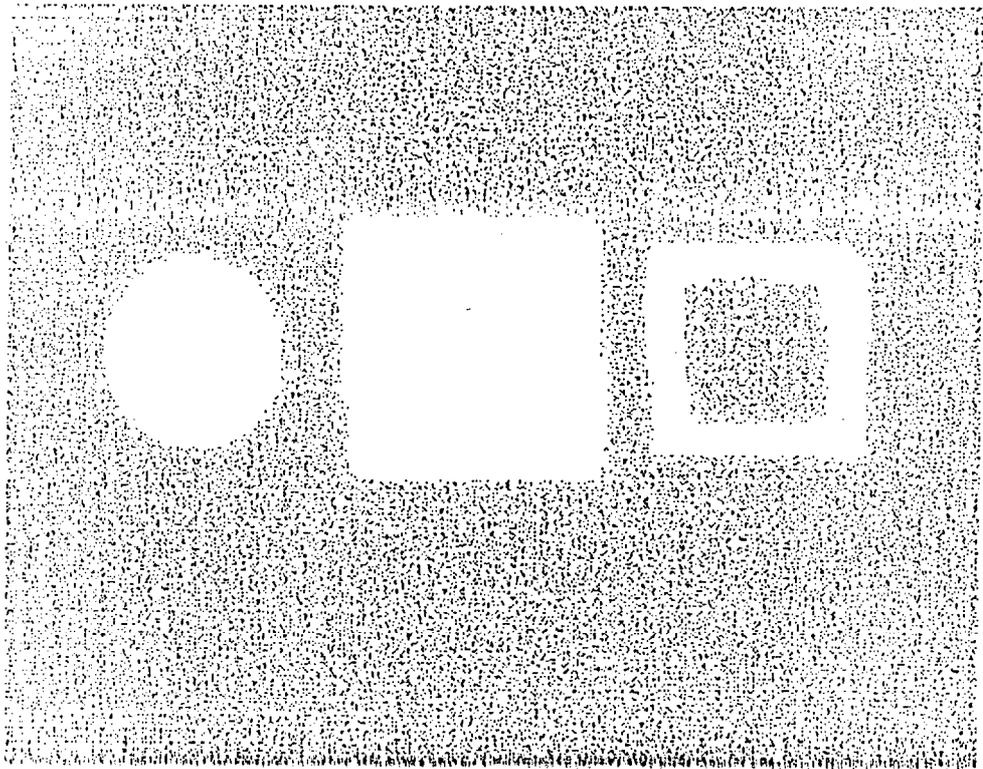


Fig. 4. 10 Resultado de la convolución de (b) en 8

De nuevo el espacio de entradas contine componentes solo de la imagen original y sin embargo las componentes del resultado son invertidas. se produce por lo tanto la aparición de contrastes cromáticos espaciales.

La fig. 4. 11 muestra el resultado de convolucionar el núcleo (b) centrado en el punto 9. En este caso el espacio de entradas contine componentes no invertidas. El resultado del proceso es la componente 10 ligeramente desenfocada.

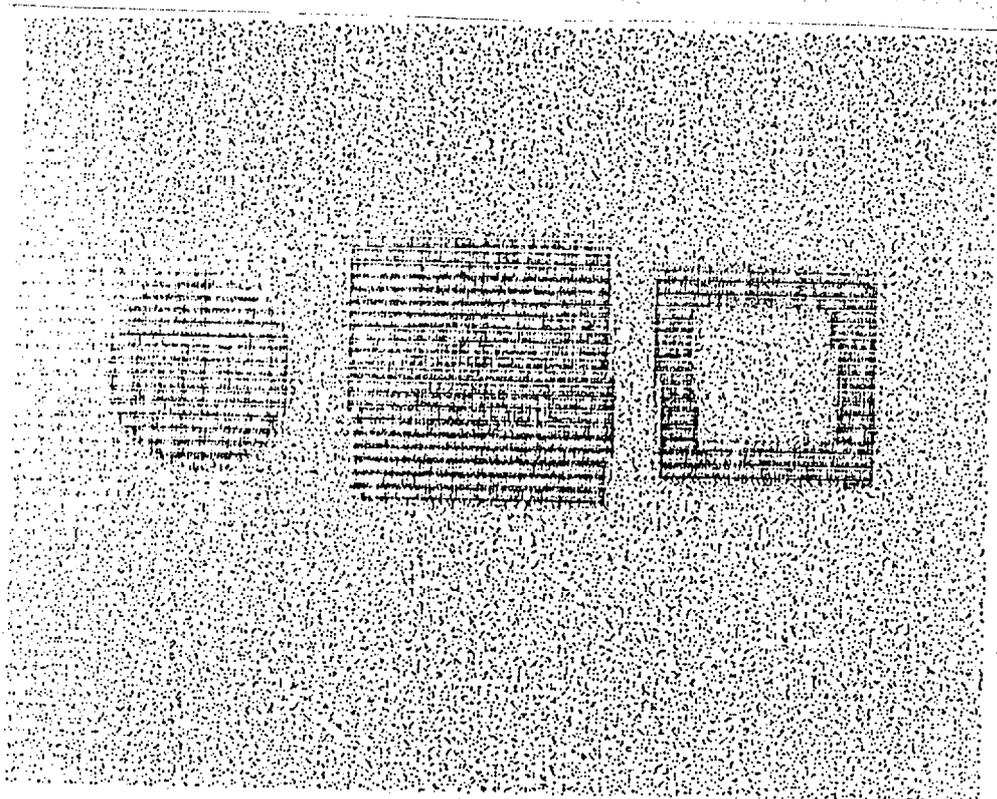


Fig. 4.11 Resultado de la convolución de (b) en 9

La fig. 4.12 muestra el resultado de aplicar los procesos anteriores con el núcleo (b) centrado en el punto 11. Las entradas del sistema corresponden a la imagen original (no invertida) y el resultado del proceso es la imagen a escala invertida ligeramente desenfocada lo que implica la aparición de contrastes cromáticos-espaciales.

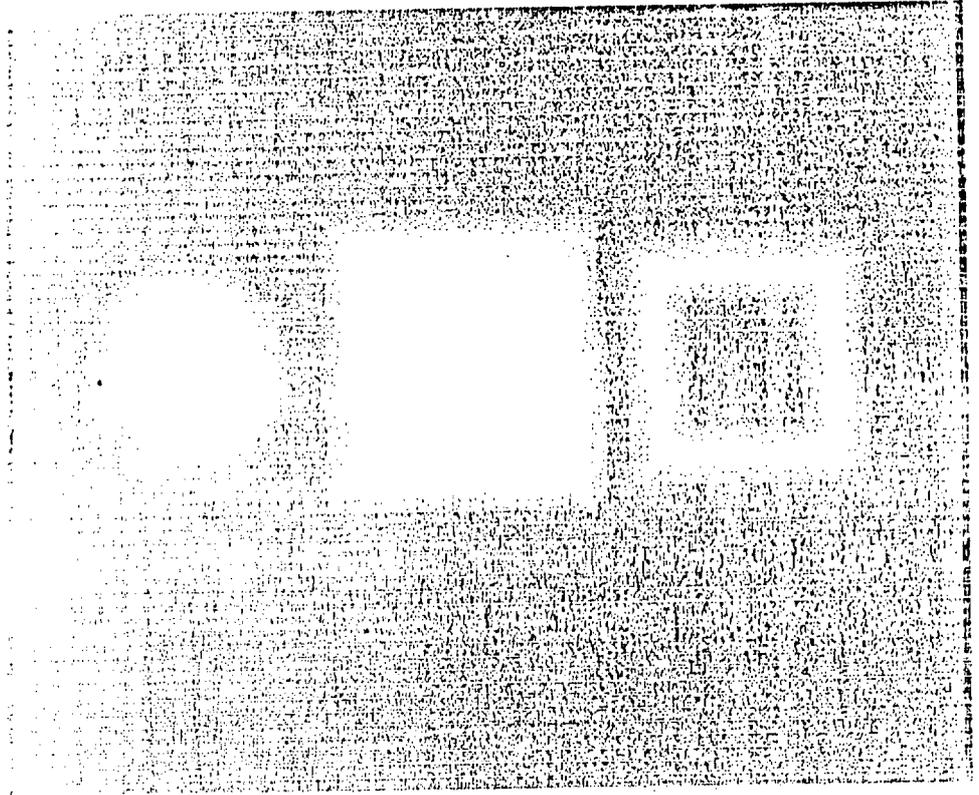


Fig. 4.12 Resultado de la convolución de (b) en 11

En el modelo de procesos cromáticos en la retina que se ha desarrollado presenta un gran potencial para explicar el comportamiento de las células codificadoras de color.

De hecho la simulación de los casos más simples, por medio del modelo lineal, ya proporciona resultados que tienen incidencia, no sólo en la codificación neurofisiológica, sino en la percepción del color.

4.3. - CODIFICACIÓN ESPACIO-TIEMPO-COLOR: MODELO DINAMICO.

4.3.1. - Modelo Teórico.

Desde el punto de vista dinámico la operación retinal puede sintetizarse como sigue:

Los datos espacio-temporales de entrada en la retina son procesados por los fotorreceptores, bipolares y horizontales de las capas exteriores, ofreciendo canales o niveles de propiedades espacio-temporales, según la especie en cuestión. La información de cada canal es el resultado de operaciones que pueden ser cualitativamente descompuestas en una transformación lineal espacio-lineal seguida de umbrales adaptativos.

En la CPI cada uno de los canales interactúa lateralmente de un modo peculiar para cada tipo de ganglionar. Esta interacción lateral no lineal estaría gobernada por las sinapsis bipolar-ganglionar y amacrina-ganglionar.

La célula ganglionar pondera los resultados de uno o varios de estos niveles y calcula, mediante simple excitación con interacción facilitadora o desfacilitadora, una función lineal o no lineal que determina su frecuencia instantánea de disparo.

Tal como Moreno-Díaz (1980) han concluido, las capas exteriores generan versiones con diversos retardos de las señales que al interactuar en la capa plexiforme interna explican las propiedades tanto de las ganglionares simples como de las complejas y codificadoras de color. Con ello, estas bases unificadas, excepto por la formulación matemática, son apropiadas a nivel conceptual para elucidar los mecanismos que determinan la totalidad de los procesos retinales en los vertebrados, tal como ha sido registrado en neurofisiología.

La completa sistematización y generalización de estos conceptos no ha sido realizada por anatomistas y neurofisiólogos por la no aplicación de la moderna teoría de sistemas, que se precisa para la formulación de una verdadera teoría del sistema visual de la retina.

Las capas plexiforme externa y las capas nucleares externa e interna constituyen las capas de preproceso. De especies inferiores a superiores se observa una variación desde muy drásticas no linealidades en las ganglionares, a pocas no linealidades. También es conocida la existencia de umbrales en las capas externas, de cuyo mecanismo resultan no linealidades locales.

De esta manera las capas exteriores de la retina poseen la estructura anatómico fisiológica necesaria para la

realización de un conjunto de preproceso. Al menos pueden estar presentes señales rápidas y retardadas, de abrillatamiento, contraste y oscurecimiento local, lo que depende de la estructura concreta de cada especie.

Nosotros consideramos que la computación por las capas exteriores de la retina consiste esencialmente en no-linealidades locales más transformaciones espacio-temporales lineales.

La no linealidad local más significativa es la que genera la función $I(r, t)$ de la intensidad de la luz incidente sobre la retina para un punto r y un instante t ; función que puede tomarse logarítmica.

Las señales rápida y retardada son ambas el resultado de transformaciones espacio-temporales sobre $I(r, t)$ donde nosotros asumimos que están dados por kernels factorizables.

$$W_{F\lambda}(r, r', s) = H_{F\lambda}(s) W_{F\lambda}(r, r') \quad (4.10)$$

$$W_{R\lambda}(r, r', s) = H_{F\lambda}(s) W_{R\lambda}(r, r') \quad (4.11)$$

La simple relación entre $H_{F\lambda}(s)$ y H_R es

$$H_R = \frac{H_{F\lambda}(s)}{1 + \gamma s} \quad (4.12)$$

el término temporal de retraso debido a las horizontales.

En efecto, la señal rápida $f_{F\lambda}(r, s)$ es la resultante del procesamiento de $I(r, t)$ por los fotorreceptores y bipolares y el núcleo (4.10) no es más que un filtro espacio-temporal-color paso bajo.

Para precisar la naturaleza de la señal retardada $f_{R\lambda}(r, s)$ detallamos la operación de proceso en que intervienen las horizontales y amacrinas juntamente con los fotorreceptores y bipolares.

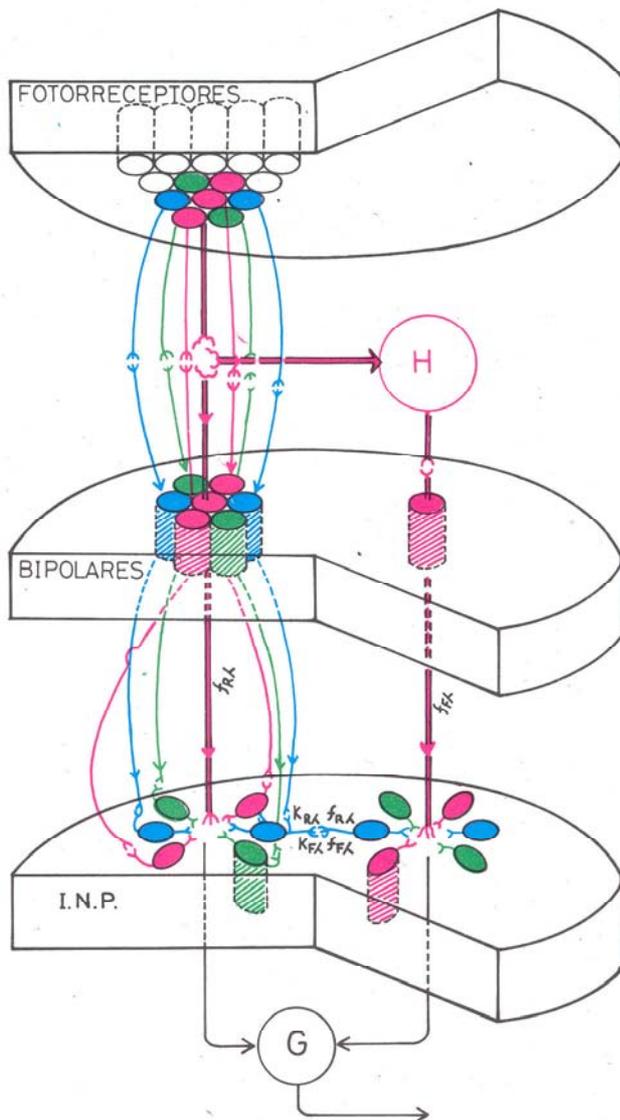
Para este tipo de señales las células horizontales realizan una traslación lateral isotrópica de la información, resultado desde la transformación (4.10); esta traslación es representable por un kernel idealizado:

$$W_{H\lambda}[r, r'] = d(|r - r'| - R_{H\lambda}) \quad (4.13)$$

donde $R_{H\lambda}$ es la distancia de traslación lateral. Nótese que un estímulo puntual origina una estimulación circular de radio $R_{H\lambda}$.

El retorno isotrópico de las señales es proporcionado por vía amacrina que implica una transformación del tipo (4.13) que es un kernel:

$$W_{A\lambda}[r, r'] = d(|r - r'| - R_{A\lambda}) \quad (4.14)$$



para que la interacción sea efectivamente local se requiere que $R_{A\lambda} = R_{H\lambda}$.

Desde (4.11), (4.13) y (4.14) resulta que:

$$W_{RA}(r, r') = \int_P \int_{P'} W_{FA}(r''', r') W_{HA}(r''', r'') W_{AA}(r, r'') dr''' dr'' \quad (4.15)$$

Es decir:

$$W_{RA}(r, r') = \int_r \int_{r''} W_{FA}(r''', r') W_{HA}(r''', r'') d(|r''' - r''| - R_{HA}) \cdot d(|r''' - r''| - R_{AA}) dr''' dr'' \quad (4.16)$$

La aproximación de esta integral por su término principal lleva a:

$$W_{RA}(r, r') = 2\pi R_{HA} \cdot W_{FA}(r, r') \quad (4.17)$$

Nosotros asumimos una retina conteniendo fotorreceptores de diferente sensibilidad espectral con canales específicos de color sobre la capa plexiforme interna. En la misma ocurre una interacción lateral no lineal la cual, entre otras podría explicar la codificación del color. esto se ilustra en la lámina 5.

Para una retina continua considerando solo términos de primer orden y de (4.10), (4.12) y (4.17) se obtiene:

$$f_{F\lambda}(r, s) = H_{F\lambda}(s) \int_{r', F\lambda} W_{r', F\lambda}(r, r') I(r', s) dr' \quad (4.18)$$

$$f_{R\lambda}(r, s) = \int_{r', F\lambda} W_{r', F\lambda}(r, r') I(r', s) dr' = \frac{f_{F\lambda}(r, s)}{1 + rs} \quad (4.19)$$

donde se ha omitido el factor constante $2\pi R_{H\lambda}$.

Donde $f_{F\lambda}$ y $f_{R\lambda}$ son las transformadas de Laplace de las señales rápida y retardada para canales de color de longitud de onda λ .

La señal rápida $f_{F\lambda}(r, s)$ es interpretada como la resultante del procesamiento de $I(r, s)$ por los fotorreceptores y bipolares y se puede asumir que el núcleo (4.11) no es más que un filtro paso-bajo espacio-temporal-color centrado en λ .

La señal retardada $f_{R\lambda}(r, s)$ que es la resultante de la traslación lateral debida a las horizontales se interpreta como la resultante del procesamiento de $I(r, s)$ por los fotorreceptores, horizontales y bipolares.

4.3.2.1. - Computación en la CPI: Modelo general .

Los retardos de la señal en las capas exteriores son suficientes para explicar con éxito las operaciones retinales a nivel de las ganglionares simples y complejas en el gato y en las aves. Sin embargo en la rana *pipiens* ha sido necesario introducir altas no linealidades, como son la facilitación y desfacilitación multiplicativas.

¿Cómo pasar de esas no linealidades drásticas a las expresiones casi lineales de las ganglionares del gato, mono y quizás el hombre?.

Un primer enfoque será proveer al sistema con un desarrollo funcional en serie de potencias, pudiéndose restringir, para el caso lineal, a los primeros términos de la serie. Esto equivale a efectuar una descripción del sistema no lineal del tipo de las propuestas por Volterra y Wiener.

Las formulaciones clásicas de Volterra o Wiener de la teoría de sistemas no lineales mantienen una descripción externa del sistema, como si fuera una "caja negra". Este modo de operación apenas resulta útil en la teoría que, pese a su generalidad, puede calificarse desde nuestro enfoque como "ciega", en cuanto ignora la naturaleza del sistema. En el mejor de los casos sabremos qué hace el sistema, pero muy poco acerca del procedimiento.

Surge también la limitación de trabajar con señales monocanales o en todo multicanales (multientrada), pero pocas e independientes entre sí, sin interacción espacio-temporal de importancia. Más en la realidad muchos sistemas biológicos presentan aspectos espaciales no abordables desde esa perspectiva.

Según esto, es preciso considerar que los núcleos de la operación son núcleos adaptativos, de acuerdo con la señal de entrada, aunque no invariantes (no evolutivos). Para ello una formulación de Moreno-Díaz (1980) nos pone en camino para lograr la generalización de la operación retinal de las ganglionares.

Las señales $f_{F\lambda}(r, s)$ y $f_{R\lambda}(r, s)$ experimentan interacciones no lineales en CPI. Esta Interacción Lateral no lineal en CPI podría estar descompuesta en una lateral inhibición lineal más una rectificación local de media onda.

El resultado son dos posibilidades, la inhibición lateral lineal de $f_{F\lambda}(r, s)$ por $f_{R\lambda}(r, s)$ y viceversa.

Si $X_{1\lambda}(s)$ $X_{j\lambda}$ son las transformadas de Laplace de señales aferentes a la capa, la inhibición de $X_{1\lambda}(s)$ por $Y_{j\lambda}(s)$ genera $X_1'(s)$ tal que:

$$X_1'(s) = X_{1\lambda}(s) - \sum_j K_{1j}(s) Y_{j\lambda}(s) \quad (4.20)$$

Donde $K_{1j}(s)$ representa los factores de peso de la interacción.

Para una retina continua:

$$X'(r, s) = X(r, s) - \int_{r'} K(r, r', s) Y(r', s) dr' \quad (4.21)$$

Si la inhibición proviene de pequeñas superficies S de área A , en la que los factores de peso son constantes, las dos posibles resultantes de la interacción de una señal rápida y otra retardada son:

$$X_{1\lambda}(r, s) = f_{F\lambda}(r, s) - \frac{K_R}{A_R} \sum_{\lambda} \int_{r'} U(r, r') f_{R\lambda}(r', s) dr' \quad (4.22)$$

$$X_{2\lambda}(r, s) = f_{R\lambda}(r, s) - \frac{K_F}{A_F} \sum_{\lambda} \int_{r'} U(r, r') f_{F\lambda}(r', s) dr' \quad (4.23)$$

Aquí la inhibición viene desde pequeñas superficies S_R y S_F de las áreas A_R y A_F . $U(r, r')$ es una función de valor 1 sobre dichas superficies y cero en otros casos y K_F y K_R son los pesos constantes de la inhibición.

Nótese que, después de la inhibición desde las áreas A_R y A_F , contendrá en general señales desde varios canales

de color, esto es, señales en banda ancha en color, como consecuencia de la suma de λ

La no-linealidad por umbrales, cuando esté presente, puede formularse por:

$$X'_{1\lambda}(r, t) = \text{Pos} \left[L^{-1} \int_{r',1} W(r, r', s) X(r', s) dr' - \Theta(r, t) \right]$$

(4.24)

Donde en nuestro caso $X(r, s) = f_{F\lambda}(r, s)$, $i = 1, 2$ y donde Pos indica que los valores negativos se toman cero; y $\Theta(r, t)$ es un escalón local.

La rectificación local en media onda genera señales $X'_{1\lambda}(r, t)$ y $X'_{2L}(r, t)$ dada por:

$$X'_{1\lambda}(r, t) = \text{Pos} \left[L^{-1} X_{1\lambda}(r, s) \right] \quad (4.25)$$

$$X'_{2\lambda}(r, t) = \text{Pos} \left[L^{-1} X_{2\lambda}(r, s) \right] \quad (4.26)$$

Las señales $X'_{1\lambda}(r, t)$ y $X'_{\lambda}(r, t)$ y alcanzan las dendritas de las ganglionares donde son sumadas y pesadas para cada canal de color, separadamente o juntamente (de forma simple para el gato y las aves) excitando un tren de impulsos de frecuencia instantánea de disparo $G(t)$ que está dada por:

$$G(t) = \text{Pos} \left[G_0 + \sum_{\lambda} \int_r \int_{t'} K_{1\lambda}(r, t-t', \lambda) X'_{1\lambda}(r, t') dr dt' + \right. \\ \left. \sum_{\lambda} \int_r \int_{t'} K_{2\lambda}(r, t-t', \lambda) X'_{2\lambda}(r, t') dr dt' \right]$$

(4.27)

Donde G_0 es la respuesta espontánea; si existe, y $K_{1\lambda}$ y $K_{2\lambda}$ son los pesos ganglionares para cada canal de color. Nótese $K_{1\lambda}$ y $K_{2\lambda}$ puede ser para cualquier λ , lo cual implica una sensibilidad al color no marcada para cada célula ganglionar.

4.3.2.2. - Procesos no-lineales:

Primero, nosotros consideramos la respuesta para un estímulo local. Las respuestas no-lineales ON-OFF al color, se obtienen a partir de las fórmulas (4.22) y (4.23), que ahora se reducen a:

$$X_{1\lambda}(r, s) = f_{R\lambda}(r, s) - \frac{K_R}{A_R(1+rs)} \sum_{\lambda} f_{R\lambda}(r, s) \quad [\lambda\text{-ON}]$$

(4.28)

$$X_{2\lambda}(r, s) = f_{R\lambda}(r, s) - \frac{K_F}{A_F(1+rs)} \sum_{\lambda} f_{F\lambda}(r, s) \quad [\lambda\text{-OFF}]$$

(4.29)

depués una rectificación de media onda genera $X'_{1\lambda}$ y $X'_{2\lambda}$. Nótese que la inhibición ON-OFF proviene no sólo desde el color considerado, sino también desde los colores complementarios.

La detección de contrastes espaciales de color ocurre de acuerdo con (4.22) y (4.23), donde es un hecho evidente para estímulos estacionarios. En semejante caso, debido a la suma del lado derecho de (4.22) y (4.23) el color-contraste es realizado por la presencia de los colores complementarios en los dos lados de la frontera del color.

La codificación no-lineal en color puede no parecer tan evidente en la salida de las ganglionares debido a los efectos de los diferentes canales de color, como indica la posible diferencia relativa de los valores para $K_{1\lambda}$ y $K_{2\lambda}$ en (4.27).

Un ejemplo de la codificación no-lineal centro-periferia podría ser para los kernels $K_{1\lambda}$ y $K_{2\lambda}$ mostrados en la fig. 4.11

Aquí las células ganglionares tendrían centro-Rojo-ON y periferia-Azul-OFF

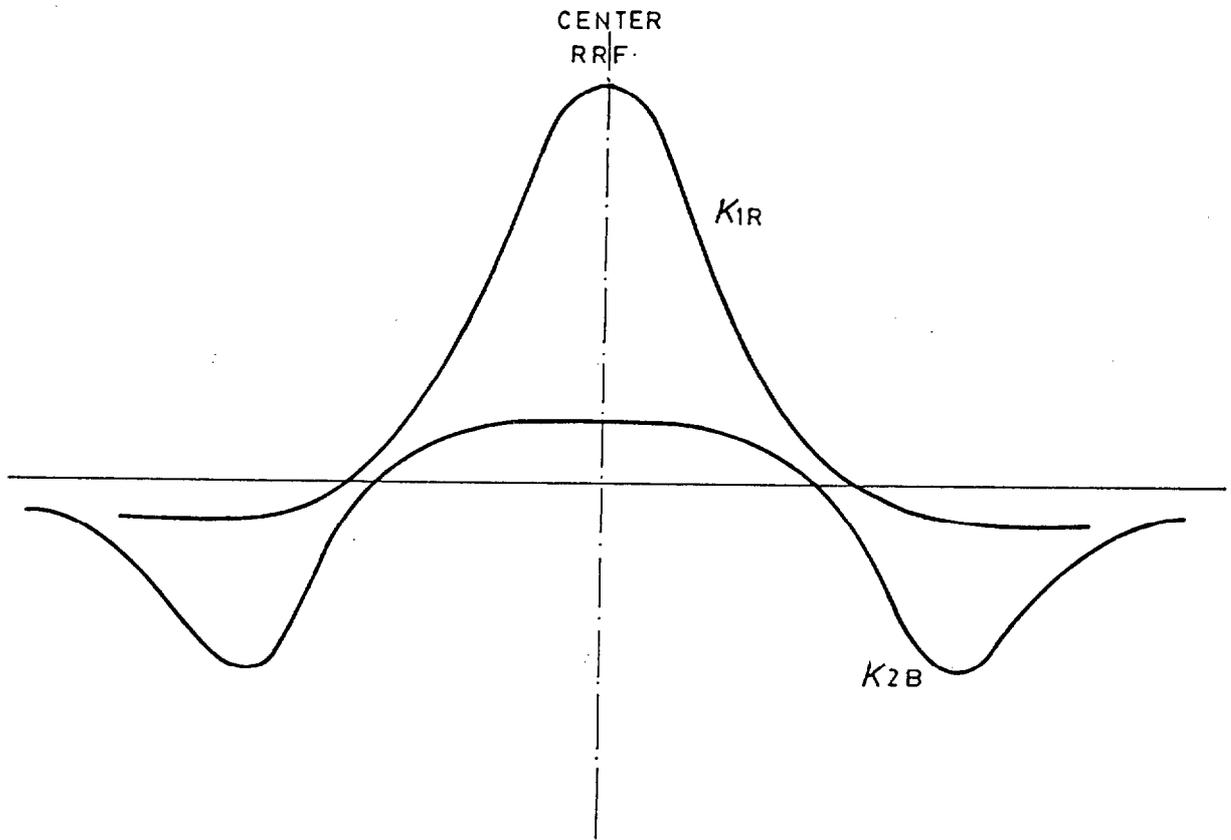


Fig. 3.14 Ilustración de $K_{1\lambda}$ y $K_{2\lambda}$ para un Centro-ON-Rojo y Periferia OFF-Azul para codificación no-lineal de las células ganglionares

4.3.2.3. - Proceso lineal:

Todo el significado de las operaciones espacio-temporales-color no lineales desaparecen para $K_R=0$ y $K_F=0$ en la interacción lateral en la capa plexiforme interna. La ecuación (4.27) se reduce a:

$$G(t) = \text{Pos } L^{-1} \left[\begin{array}{c} G \\ 0 \end{array} + \sum_{\lambda} \int_r \left[\begin{array}{c} K_{1\lambda}(r,s) f_{F\lambda}(r,s) \\ K_{2\lambda}(r,s) f_{R\lambda}(r,s) \end{array} \right] dr + \right. \\ \left. \sum_{\lambda} \int_r \int_{t'} \left[\begin{array}{c} K_{1\lambda}(r,s) f_{F\lambda}(r,s) \\ K_{2\lambda}(r,s) f_{R\lambda}(r,s) \end{array} \right] dt' \right] \quad (4.30)$$

Donde asumimos que $f_{F\lambda}$ y $f_{R\lambda}$ son positivos.

La ecuación (4.30) se corresponde a una expresión general para un invariante-lineal, de modelos espacio-tiempo-color, bajo la hipótesis de canales de color independientes. Todo el rango del comportamiento lineal, desde la sensibilidad e insensibilidad al color así como la codificación del color aparece como una consecuencia.

4.3. - Simulación

En la simulación se ha utilizado un espacio-color-tiempo de entrada que está compuesto de una serie de componentes cromáticas de una imagen real que se mueven con el tiempo animadas de una velocidad. De esta forma generamos la señales rápidas y retardadas. El esquema del espacio-color-tiempo de entrada se muestra en la fig.

4.15

La adquisición de las imágenes se realiza mediante un sistema cámara-ordenador con una cámara en blanco y negro mediante tres filtros de color R, G, B. El sistema utilizado es el mostrado en el diagrama de la fig. 4.14. El programa encargado de gestionar la adquisición de las diferentes tomas de las componentes de la imagen que se realiza desde el PDP/23 es ADQRGB que las almacena directamente en disco. Las mismas son transmitidas vía red en tiempo real al VAX/740 para su posterior procesamiento.

La componente en luminancia de la imagen se obtiene mediante una simple adición de las componentes cromáticas de la misma. A efectos de presentación se ha realizado un escalado lineal entre 0-255.

Las componentes R, G, B e Y de la imagen se muestran en las figs. 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 .

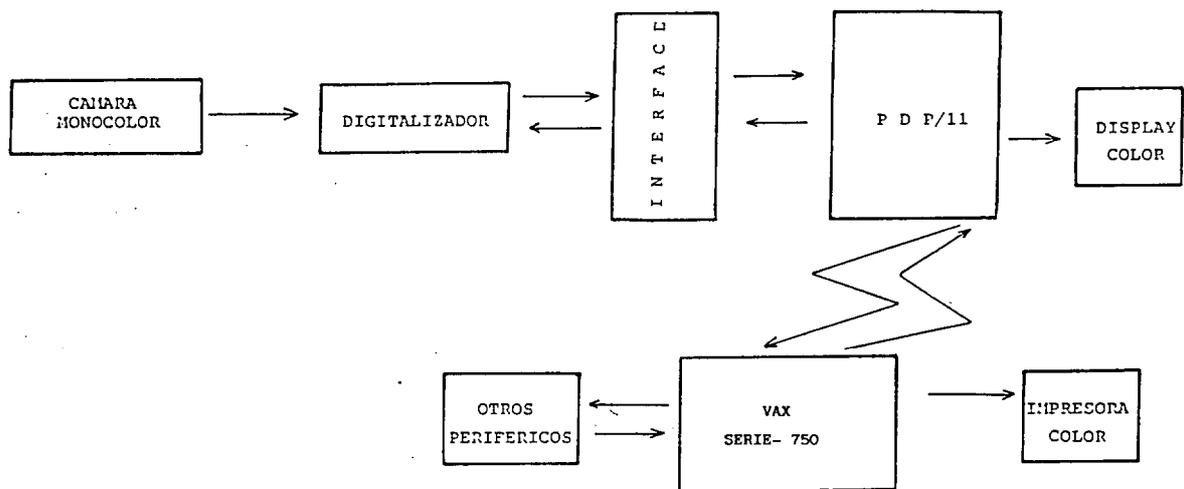


Fig. 4.13 Esquema del proceso de adquisición y transmisión de imágenes.

De esta manera formamos un espacio-color-tiempo de entrada en que cada componente cromática y la luminancia son animadas de una velocidad. Así se genera con el programa DESPLA una señal retardada y una rápida que se mueve con respecto de la anterior con la velocidad anteriormente indicada. La velocidad a que se ha sometido la imagen es de $V=3$.

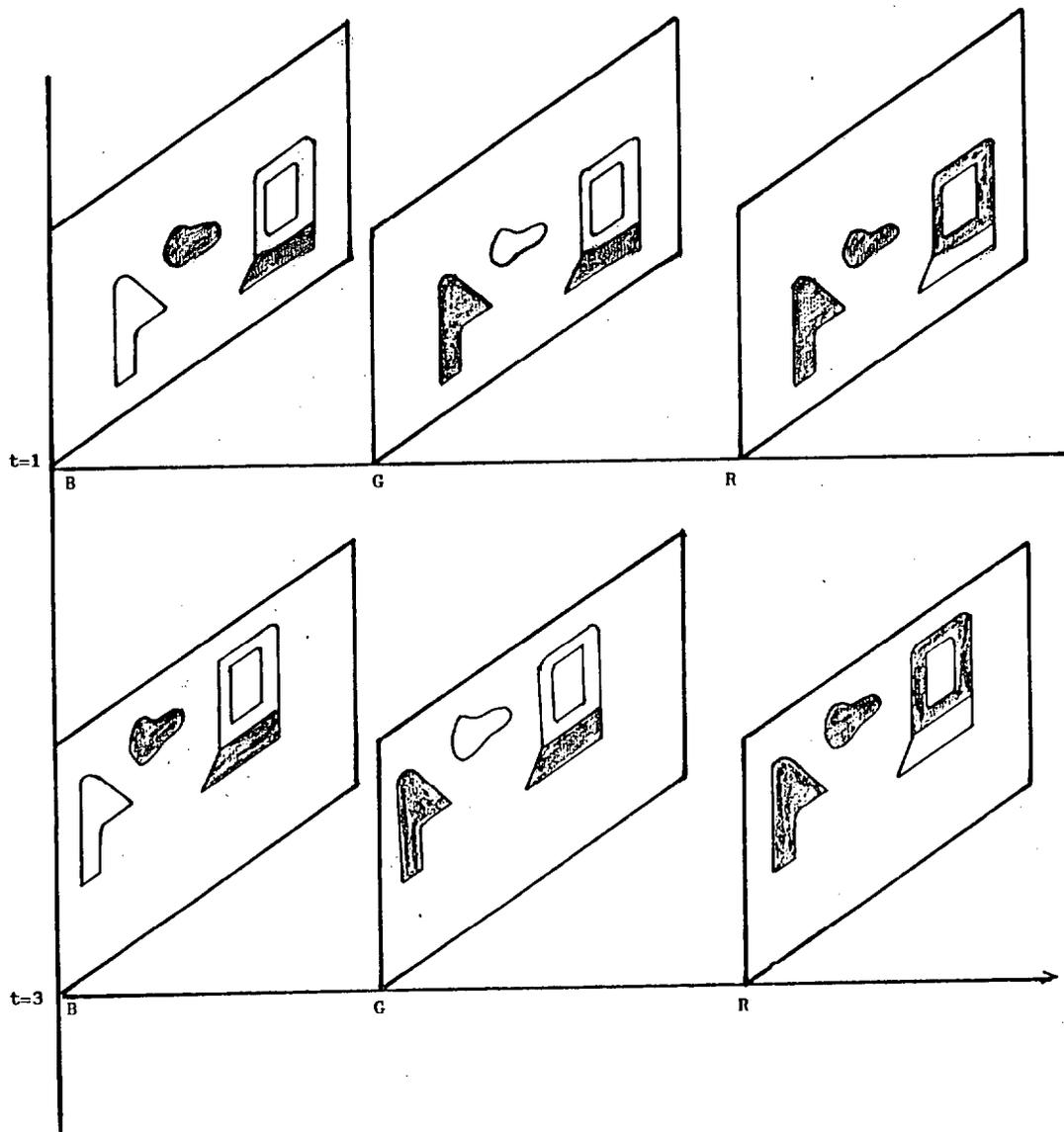


Fig. 4.14 Esquema del espacio-color-tiempo de entrada.

En el espacio de entradas se crea una estructura centro-periferia en las versiones correspondientes a la señal rápida o retardada. La periferia se toma en la luminancia que contendrá todos los niveles cromáticos de la imagen. Nosotros hemos utilizado una periferia de 8 pilxes y en el proceso de computación se ha tomado el valor medio de las intensidades de los mismos.

Para la simulación de los procesos lineales se ha utilizado el programa SERARECP, que basado en un algoritmo de tipo recurrente, toma el valor del centro en una de las componentes cromáticas de la imagen en un instante de tiempo en el movimiento de la misma y calcula la diferencia entre el mismo y el valor de la periferia que se corresponde con la versión de luminancia en otro instante de tiempo. Se calcula los valores máximos y mínimos y se realiza un escalamiento lineal poniendo el valor mínimo a 0 y el máximo a 255.

La fig. 4.20 muestra el resultado cuando se ha tomado para el centro la componente R en el instante $t=1$ y la luminancia en el instante $t=3$. O sea CR1-PY3.

Las figs 4.21 y 4.22 son el resultado del mismo proceso para las componentes G y B respectivamente, CG1-PY3 y CB1-PY3.

La fig. 4.23 muestra el resultado cuando la señal rápida corresponde a la componente roja en el instante $t=3$ y la señal retardada es la correspondiente a la luminancia en el instante $t=1$. O sea CR3-PY1.

La fig. 4.28 son los resultados del mismo proceso anterior pero aquí la señal central es inhibitoria y la periferica excitatoria. Esto es: PY3-CR1 , PY3-CG1 , PY3-CB1 , PY1-CR3.

En la simulación de los procesos no-lineales se ha utilizado el mismo algoritmo anterior, pero aquí se ha realizado una rectificación en media onda. Para ello todos los valores negativos del resultado C-P o P-C se hacen cero. También se realiza una escalación entre el valor máximo y el valor mínimo después de realizar la rectificación.

Las figs. 4.24, 4.25, 4.26, y 4.27 son las correspondientes a estos procesos para señales rápidas en la periferia inhibidora y señales retardada en el centro excitador. Serían: CR1-PY3, CG1-PY3, CB1-PY3, CR3-PY1.

Las figs. 4.29, 4.30, corresponden al proceso lineal cuando la señal en el centro es inhibitoria y en la periferia es excitatoria. Las figs. 4.31 y 4.32 es el mismo proceso anterior para procesos no-lineales.

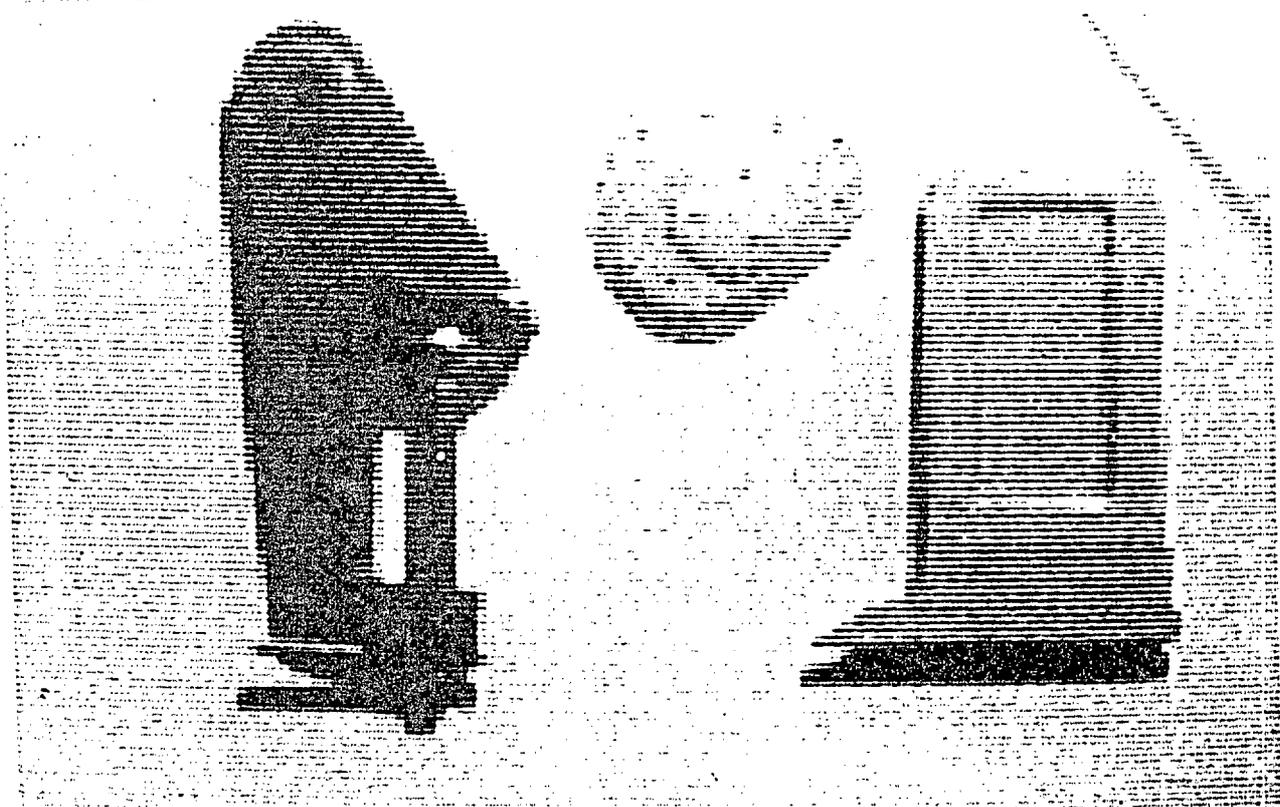


Fig. 4.16 Componente Azul

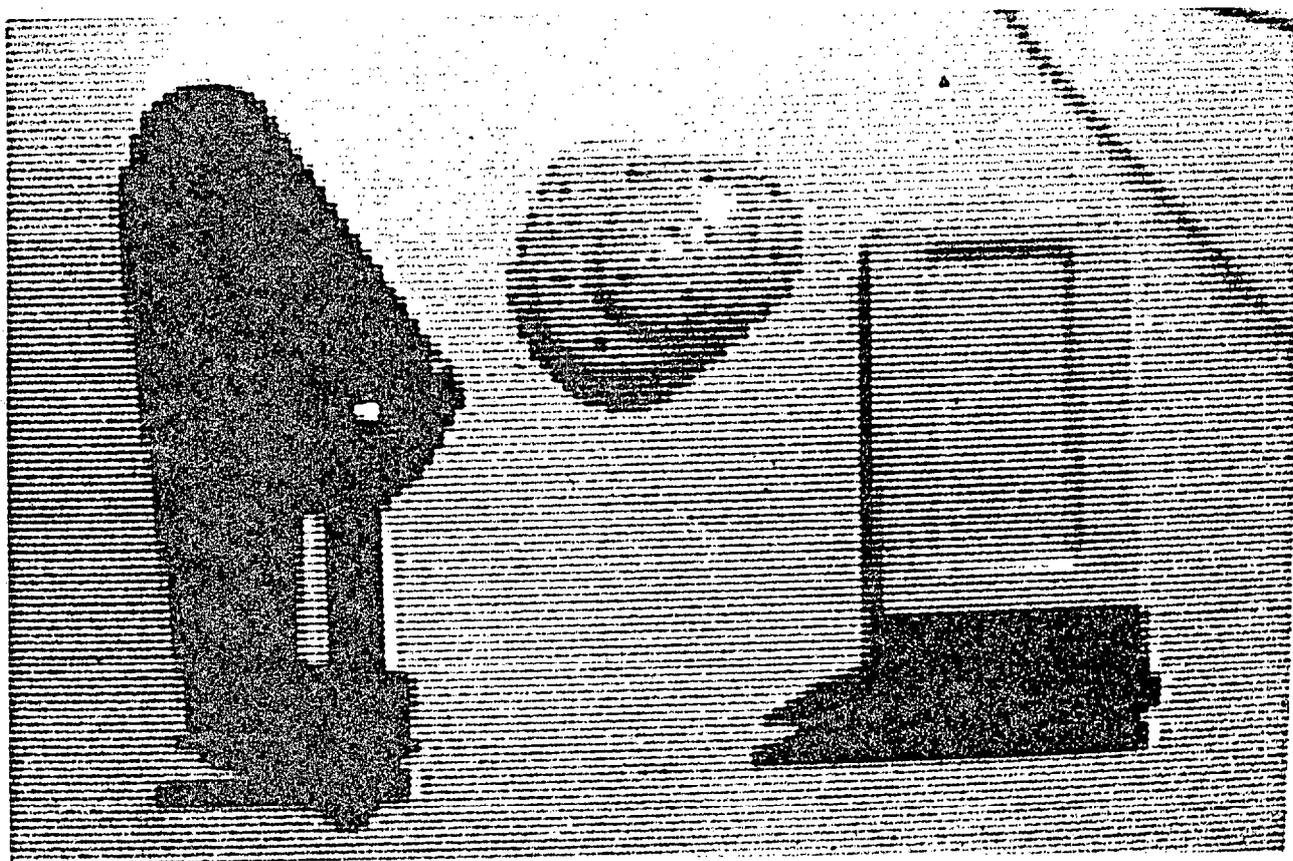


Fig. 4.17 Componente Verde

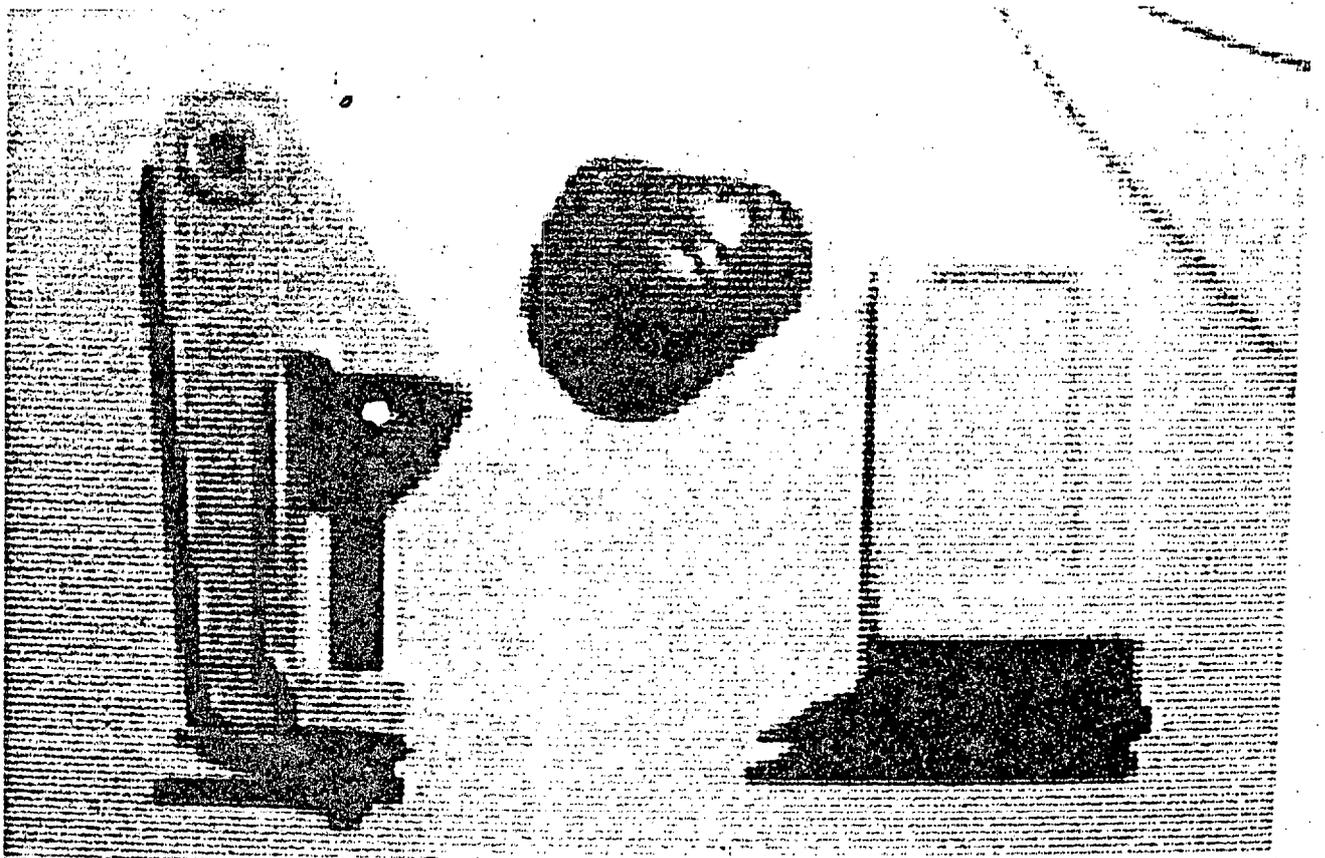


Fig. 4.18 Componento Roja

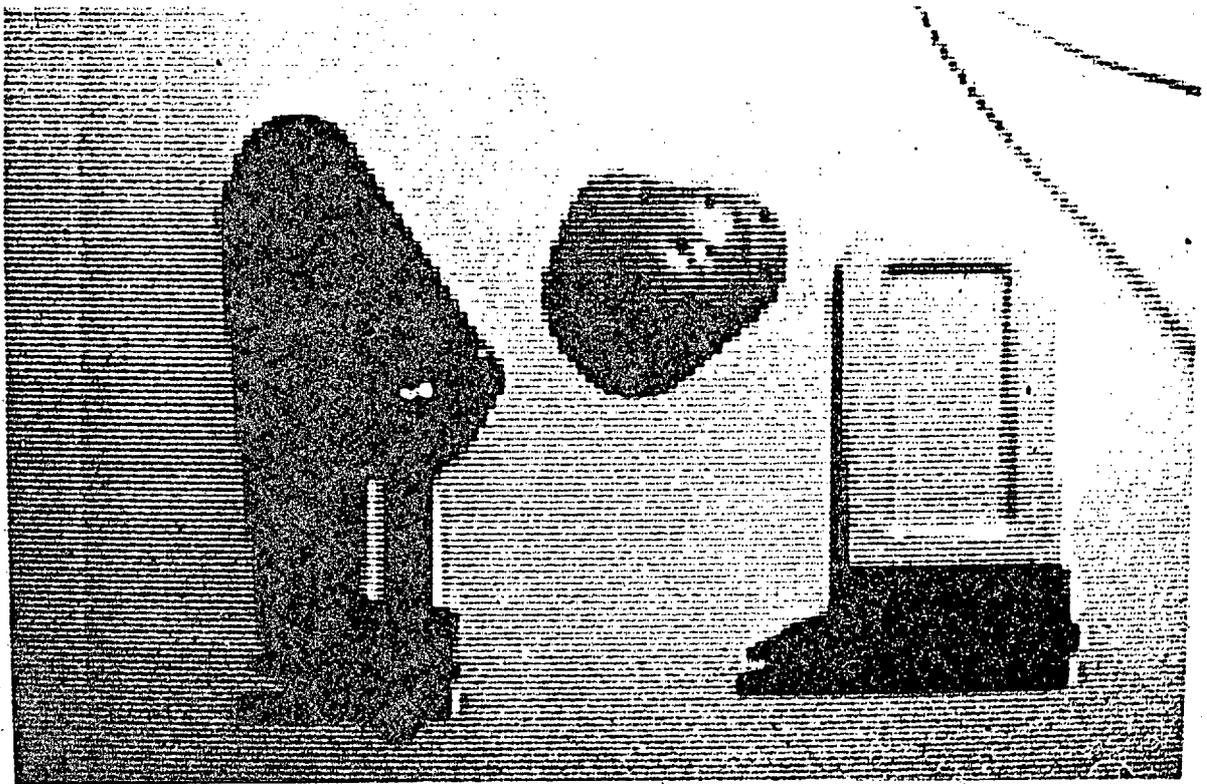


Fig. 4.19 Luminancia de la Imagen

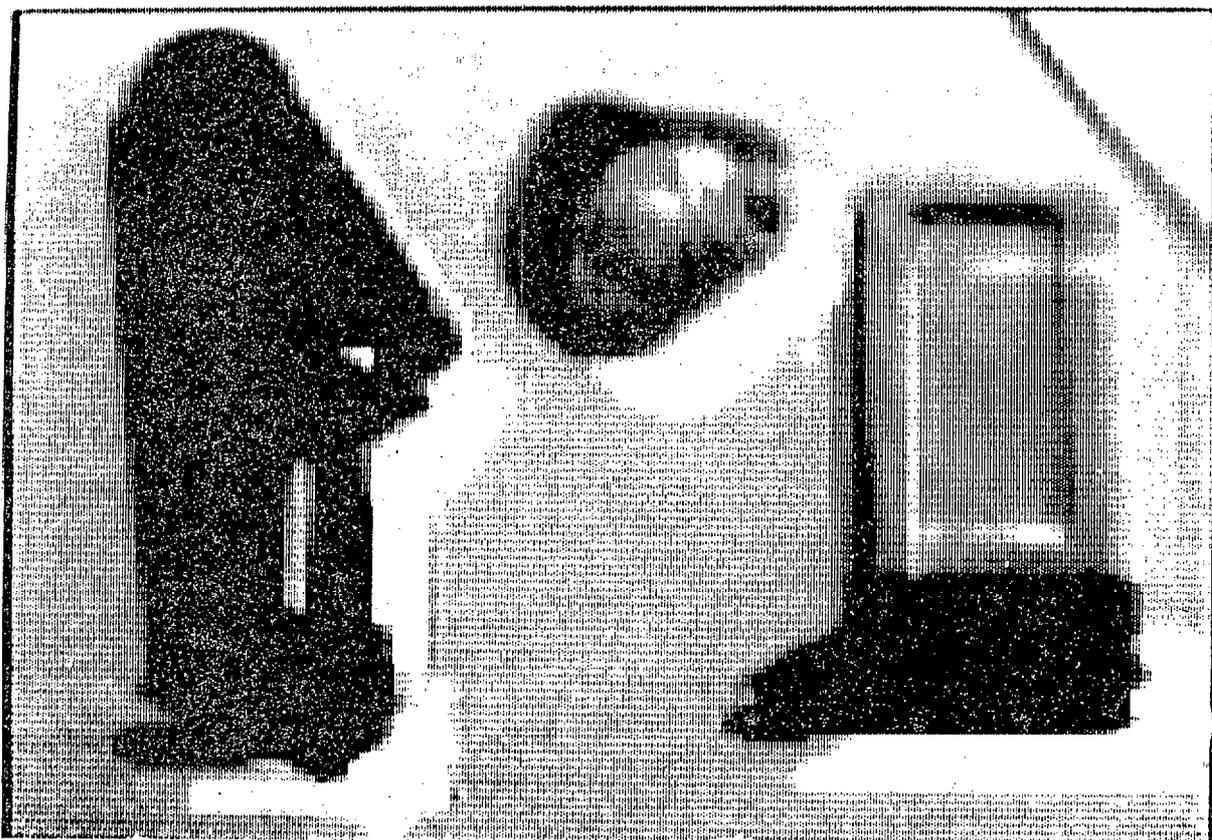


Fig. 4.20 Resultado de CR1-PY3 en el Proceso Lineal

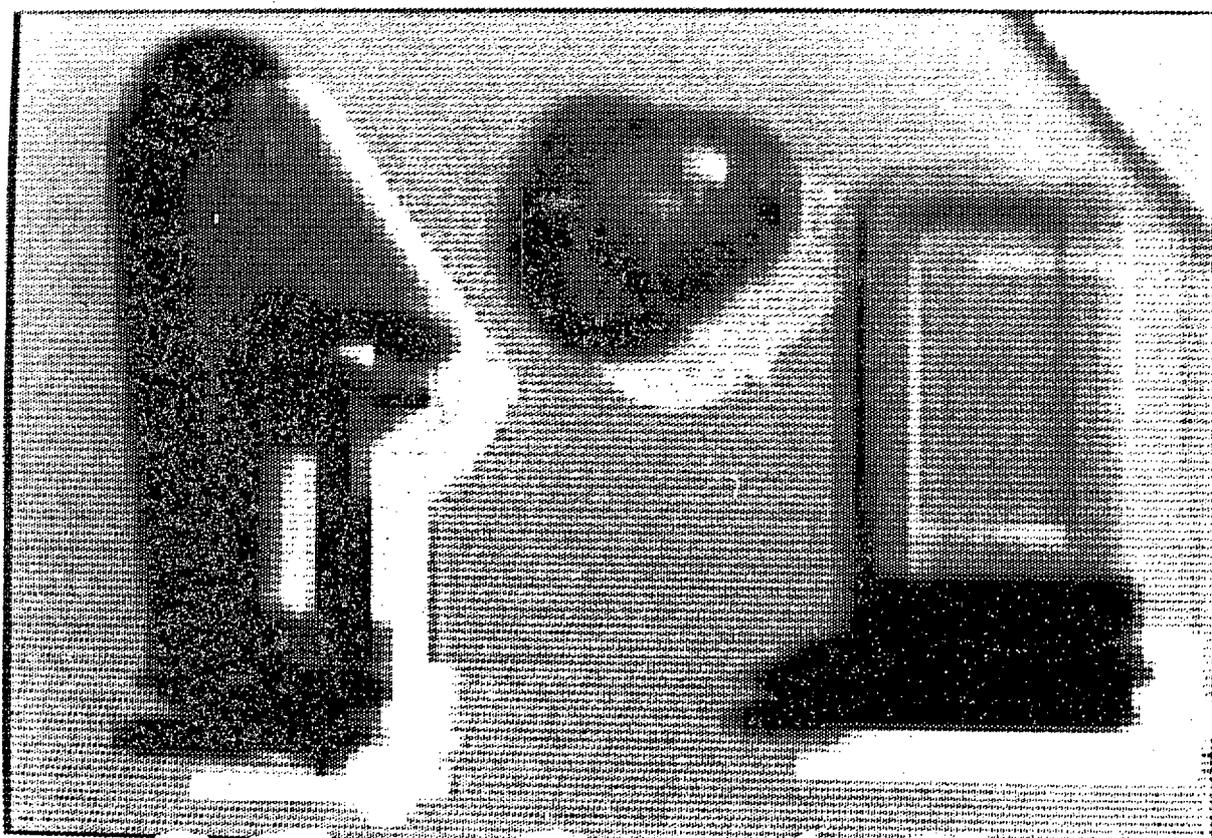


Fig. 4.21 Resultado de CG1-PY3 en el Proceso Lineal

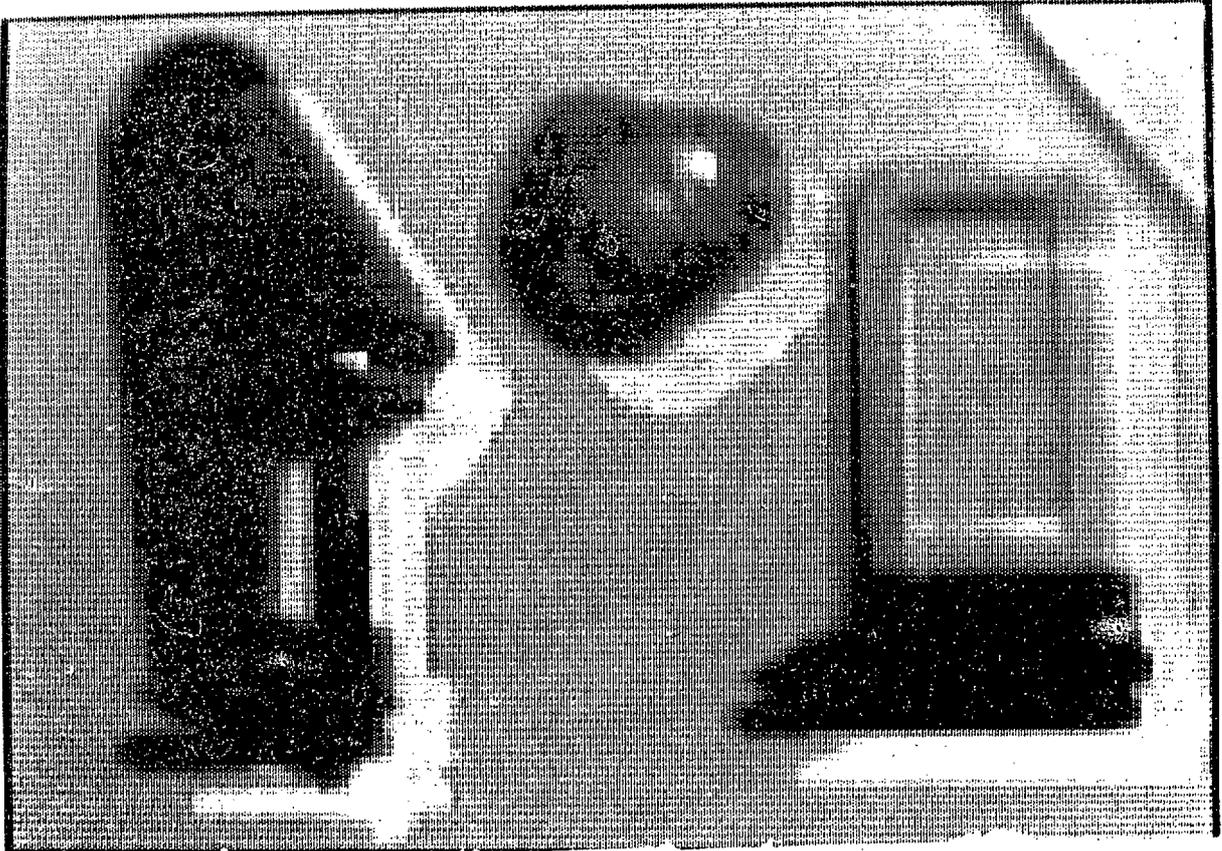


Fig. 4.22 Resultado de CB1-PY1 en el Proceso Lineal

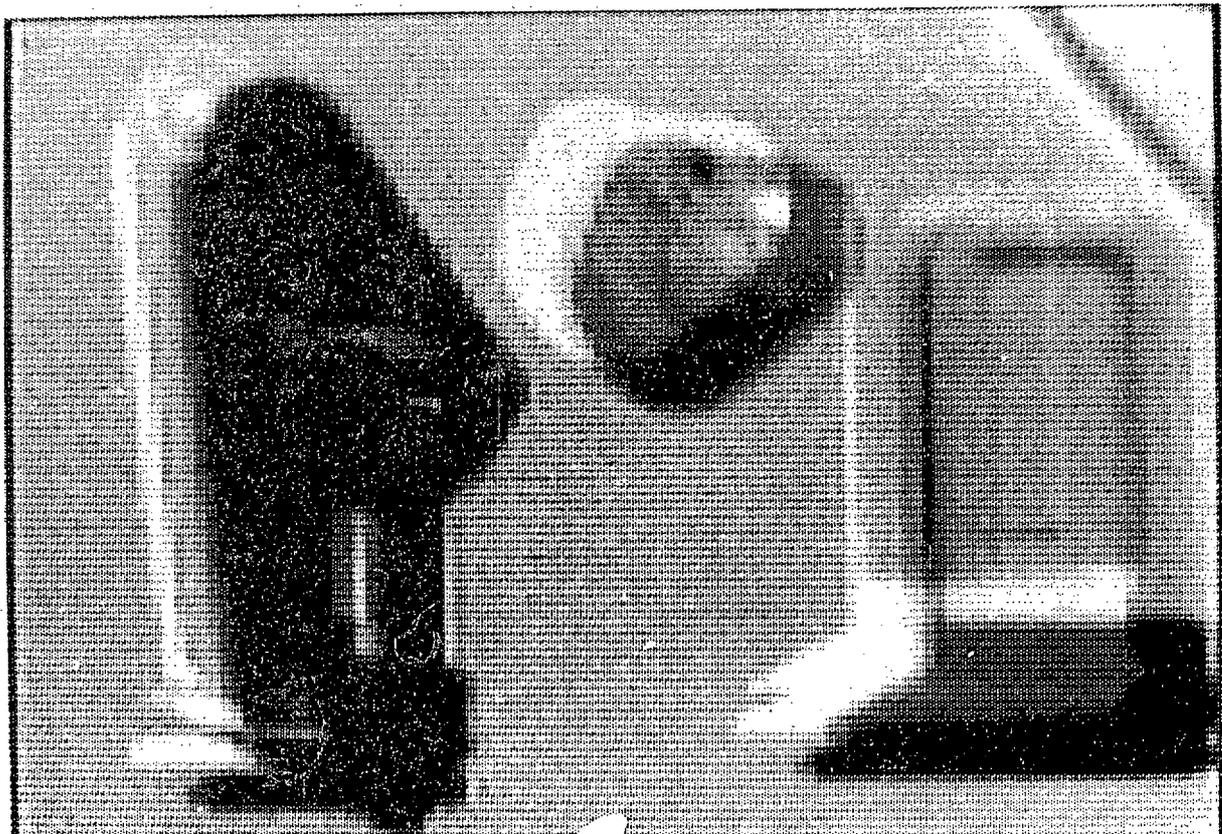


Fig. 4.23 Resultado de CR3-PY1 en el Proceso Lineal

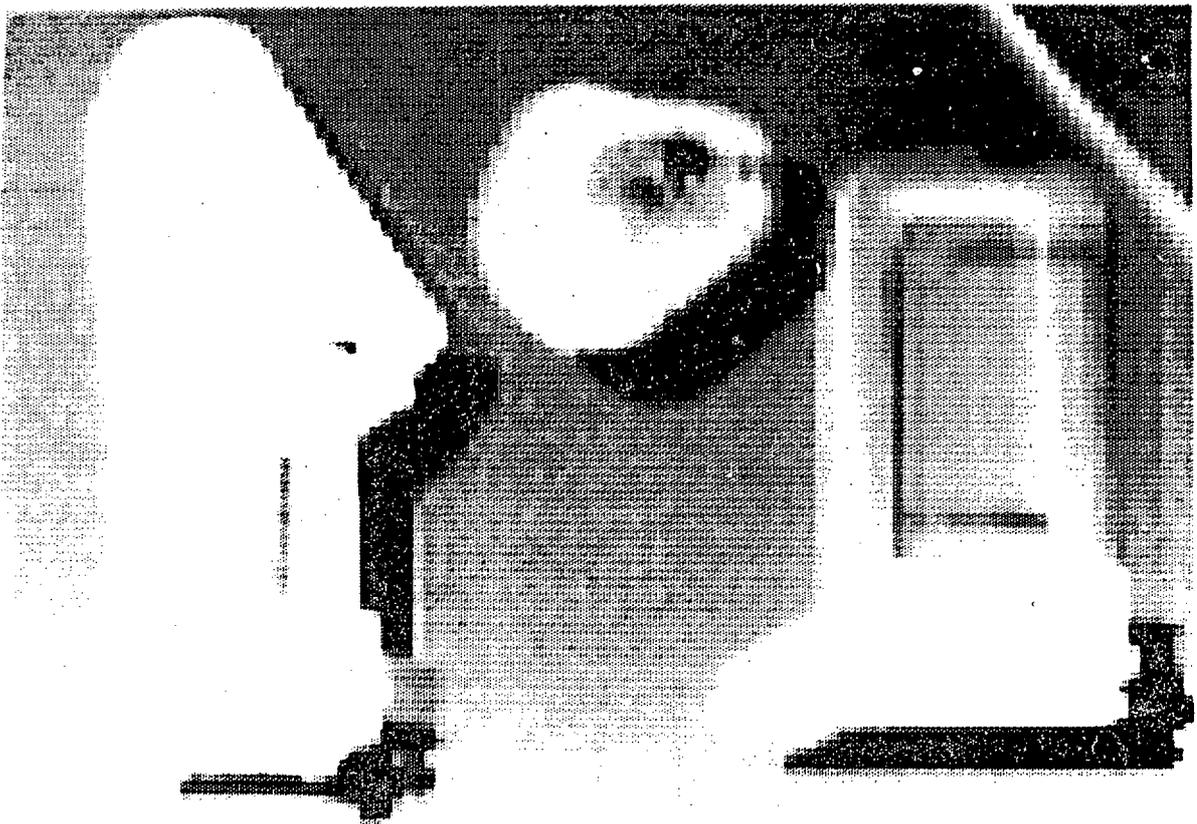


Fig. 4.24 Resultado de CRI-PY3 en el Proceso No-Lineal



Fig. 4.25 Resultado de CGI-PY3 en el Proceso No-Lineal

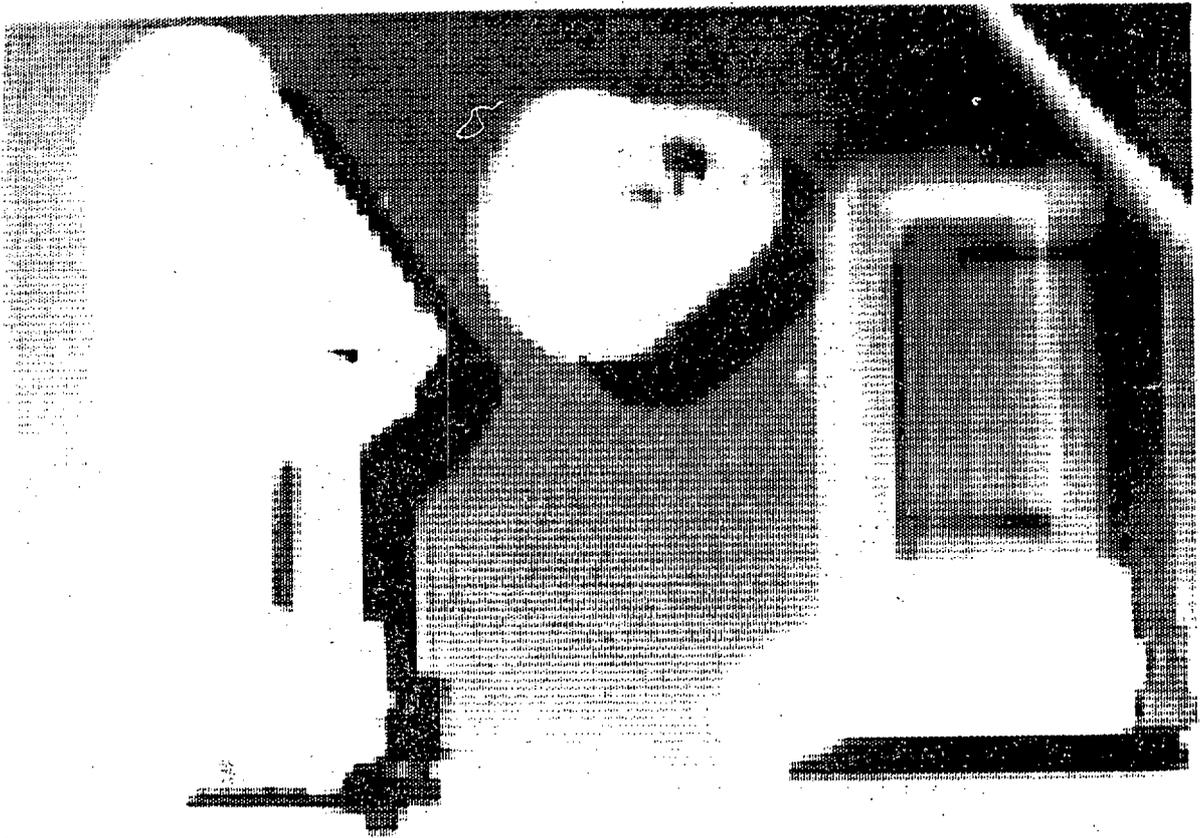


Fig. 4.26 Resultado de CBI-PY3 en el Proceso No-Lineal



Fig. 4.27 Resultado de CR3-PY1 en el Proceso No-Lineal

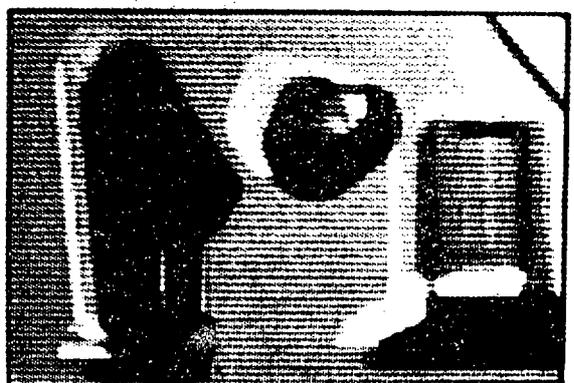
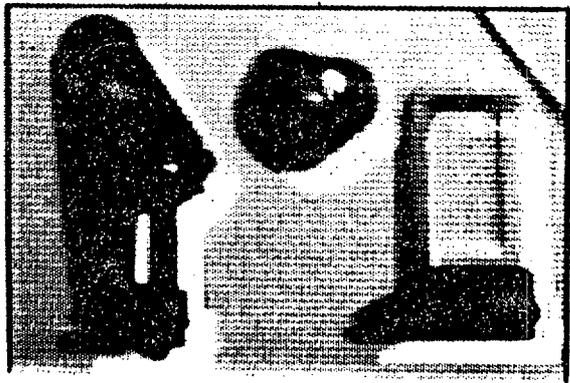
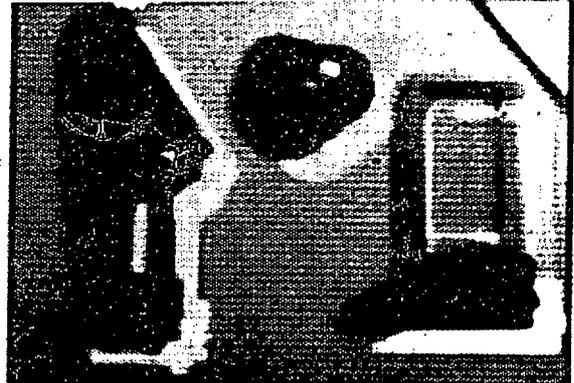
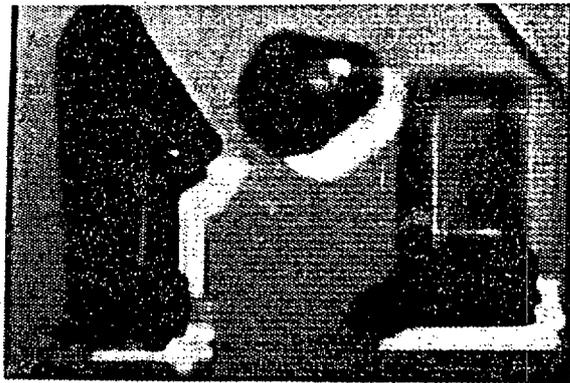


Fig. 4.28 Resultado de PY3-CR1, PY3-CG1 y PY3-CB1 y PY1-CR3 para Procesos No-Lineales

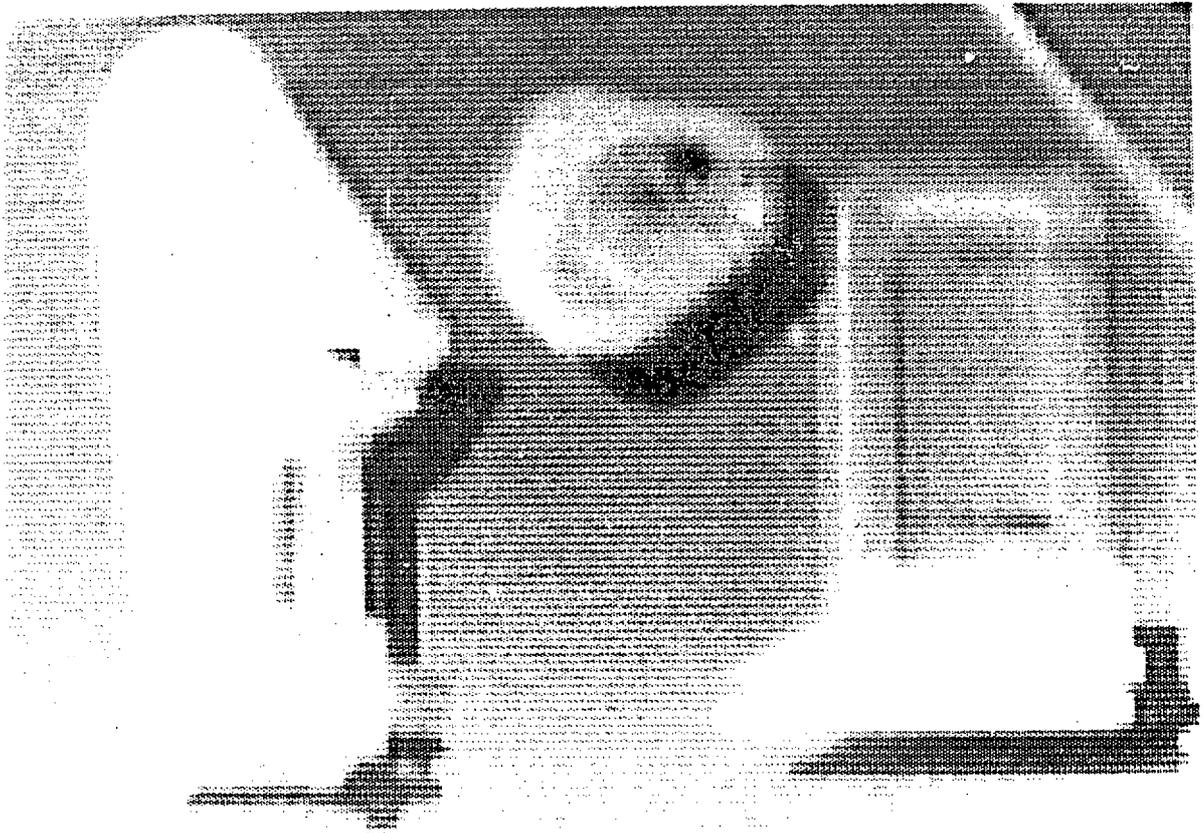


Fig. 4.29 Resultado de PY3-CR1 para el proceso Lineal



Fig. 4.30 Resultado de PY1-CR3 para el Proceso Lineal.

CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES

Las aportaciones más importantes de este trabajo las dividimos en tres categorías, que corresponden a:

1) Contribuciones de tipo general básico, relacionadas con la revisión actualizada del campo y aportaciones metodológicas.

2) Aportaciones a la teoría retinal, que consideramos las más interesantes conceptualmente.

3) Aportaciones con incidencia en la visión artificial.

1. -Aportaciones de tipo básico

En este trabajo hemos realizado:

1.1. - La revisión de las teorías de percepción del color, con una exposición basada en conceptos esenciales, procurando la eliminación de cuestiones que estimamos secundarias, con el fin de simplificar el futuro estudio de este campo.

1.2. - El análisis histórico actualizado de los modelos de visión en color a nivel neurofisiológico, con énfasis en las ideas subyacentes a los mismos, que ha servido para establecer nuestras propias propuestas de modelos retinales y servirá, en el futuro, para la mejora de las propuestas teóricas de cómo se procesa y

codifica el color, desde los niveles físicos a los niveles lógicos y simbólicos en la retina y corteza.

1.3. - La explicación detallada de las vías cromáticas en la retina de los vertebrados, usando la terminología propia de la Teoría de Sistemas que, pensamos, es de crucial importancia para cubrir el hueco existente entre la experimentación neurofisiológica y la actividad en Teoría de Sistemas e Inteligencia Artificial. Estimamos que esto es de gran importancia para entender cómo y con qué finalidad se usan las pistas cromáticas a distintos niveles en el sistema nervioso, indicando lo que debería ser sintetizado en los sistemas de percepción artificial.

2. - Aportaciones en Teoría Retinal

Las aportaciones que consideramos más relevantes, en el plano conceptual y teórico, se han realizado en teoría retinal cromática, según lo siguiente:

2.1. - Partiendo de los modelos anteriores realizados en el grupo, en los que se integraron todos los distintos tipos de células ganglionares especializadas acromáticas de los vertebrados, se han generalizado los mismos bajo la hipótesis de que las estructuras y funciones deberán ser las mismas, añadiendo la dimensión cromática. Se trataba así de contrastar, para el caso cromático, las propuestas

anteriores acerca del papel de la capa plexiforme interna en lo que respecta a especializaciones y situación de las no-linealidades dominantes.

2.2. - Se ha concluido, después de formular y verificar modelos a dos niveles (espacio-cromáticos y espacio-temporal-cromáticos) que las propuestas anteriores son aplicables a los vertebrados superiores, pero no a los inferiores, en los que, en consonancia con los registros neurofisiológicos, la complejidad correspondiente a interacciones laterales no lineales cromáticas ha de suponerse en parte trasladada a la capa plexiforme externa.

2.3. - Ello permite la conclusión funcional-teórica de que, a medida que se avanza en la escala evolutiva, los mecanismos codificadores cromáticos, que implican una fuerte no linealidad, se trasladan a estructuras más altas en el Sistema Nervioso Central, al igual que ocurre en las especializaciones acromáticas, pero que el traslado de los procesos cromáticos ocurre evolutivamente después de los acromáticos especializados.

2.4. - En todo caso, el mecanismo igualmente propuesto de interacción centro-periferia para los procesos acromáticos especializados es esencialmente válido cuando se tratan procesos cromáticos, pero ampliando el espacio de entrada de la computación

ganglionar, para permitir la dimensión cromática introducida para una retina con fotorreceptores de diferente sensibilidad espectral.

2.5.- Como consecuencia de este trabajo, se propone que la computación cromática retinal ocurre, a nivel de ganglionares, por procesos de carácter analítico e incluso algorítmico, en un dominio de entradas espacio-temporal-cromático con las típicas estructuras de campos receptivos centro-periferia, que fueron detectadas con simples puntos luminosos de banda ancha, que en este caso se transforma en volúmenes centro-periferia de cinco dimensiones. A tal fin hemos propuesto el correspondiente modelo teórico.

3.- Aportaciones a la Visión Artificial

3.1.- Hemos experimentado la clusterización en espacios cromáticos y se concluye que para realizar segmentaciones cooperativas, tal clusterización tiene un peso específico muy fuerte para proporcionar pistas a distintos niveles en la interpretación de imágenes complejas, mayor que lo normalmente utilizado.

3.2.- Planteamos un nuevo procedimiento para el logro de invariantes espacio-cromáticos, inspirado por el efecto de interacción lateral entre centro-periferia en campos receptivos, que permite con un esquema muy sencillo, la invarianza de contrastes cromáticos frente

a cambios de contenido espectral total de la luz sobre la escena.

3.3. - Hemos formulado y aplicado los procesos ALI (Algoritmos de Interacción Lateral), por primera vez en espacios cromáticos, y los resultados refuerzan la conclusión anterior.

3.4. - Finalmente , proponemos una estructura para el uso de la información cromática en percepción artificial orientada a la acción; que tiene incidencia en robótica avanzada, basada en las ideas de clusterización e invarianza cromática ya indicadas.

VI REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA

Arden, G. B.; Tansley, P. (1955): "The Spectral Sensitivity of the Pure-Cone Retina of the Grey Squirrel". *J. Physiol.*, 127 .pp. 592-602

Backstrom, A. C.; Reuter, T. (1959): "Receptive Field Organization of Ganglion Cells in the Frog Retina: Contributions from Cones, Green Rods and Red Rods". *J. Physiol.*, 246, pp. 79-107.

Beauchamp, R. D.; Daw, N. W. (1972): "Rod and Cone Input to Single Goldfish Optic Nerve Fibres". *Vision Res.*, 12, pp. 1201-1212.

Bouman, M. A.; Walraven, P. L. (1972): "On Threshold Mechanisms for Achromatic and Chromatic Vision". *Acta Psychol.*, 36, pp. 178-189

Boycott, B. B.; Dowling, J. E. (1969): "Organization of the Primate Retina. Light Microscopy". *Philos Trans R. Soc.*, (London), 255, pp. 109-184.

Boycott, B. B. (1974): "Aspects of the Comparative Anatomy and Physiology of the Vertebrate Retina". *Enssay on the Nervous- System*. Clarendom Press. Oxford.

Boycott, B. B.; Kolb, H. (193): "The Horizontal Cells of the Rhesus Monkey Retina". *The Journal of Comparative Neurology*, 148, pp. 115-140.

Boynton, R. M. (1979): "Human Color Vision". Holt, Rinehart and Wiston. New York.

Byzov, A. L. (1967): "Horizontal Cells of the Retina as Regulators of Synaptic Transmission". Neurosci. Transl., 3, pp. 268-276.

Cooper, L. (1973): "M-dimensional Location Models: Application to Cluster Analysis". J. Regional Sci., 13, pp. 41-54.

Dartnall, H. (1952): "Visual Pigment, a Photosensitive Pigment Present in Tench Retinae". J. Physiol., 116., pp. 257-298.

Davis, L. S. (1975): "A Survey of Edge Detection Techniques". Computer Graphics and Image Processing, 4, pp. 248-270.

Daw, N. W. (1968): "Colour-Coded Ganglion Cells in the Goldfish Retina: Extension of their Receptive Fields by Means of New Stimuli". J. Physiol., 197, pp. 567-592.

Daw, N. W. (1971): "Neurophysiology of Color Vision". J. Neurophysiol., pp. 571-611.

Daw, N. W. (1972): "Color-Coded Cells in Goldfish, Cat and Rhesus Monkey". Invest. Ophthalmol. II., pp. 411-416.

Daw, N. W.; Pearlman, A. L. (1970): "Cat Colour

Vision: Evidence for More than One Cone Process". J. Physiol. (London), 211, pp. 125-137.

DeMonasterio, F. M.; Gouras, P. (1975): "Functional Properties of Ganglion Cells of the Rhesus Monkey Retina". J. Physiol. (London), 252, pp. 167-195.

DeMonasterio, F. M. ; Gouras, P. ; Tolhurst, D. J. (1975): "Trichromatic Colour Opponency in Ganglion Cells of Rhesus Monkey Retina". J. Physiol. (London), 251, pp. 197-216.

DeValois, R.; Jacobs, H.; Jones, A. (1963): "Responses of Single Cells in Primate Red-Green Color Vision System". Optik., 20, pp. 87-98.

DeValois, R. L.; Snodderly, D. M.; Yund, E. W.; Hepler, N. K. (1977). "Responses of Macaque Lateral Geniculate Cells to Luminance and Color Figures". Sens Processes, 1, pp. 244-259.

Dijk, B. W.; Spekreijse, H. (1983): "Non Linear Versus Linear Opponency in Vertebrate Retina". Colour Vision. Physiology and Psychophysics. Academic Press, Inc. pp. 173-182. London.

Dow, B. M. (1974): "Functional Classes of Cells and their Laminar Distribution in Monkey Visual Cortex". J. Neurophysiol., 36, pp. 927-946.

Dow, B. M.; Gouras, P. (1973): "Color and Spatial Specificity of Single Units in Rhesus Monkey Foveal Striate Cortex". J. Neurophysiol., 36, pp. 79-10.

Dreher, B.; Fukada, Y.; Rodieck, R. (1976): "Identification, Classification and Anatomical Segregation of Cells with X-Like and Y-Like Properties in the Lateral Geniculate Nucleus of Old-World Primates". J. Physiol. (London), 258, pp. 433-452.

Duda, R.; Hart, P.E. (1973): "Pattern Classification and Scene Analysis". John Wiley and Sons.

Eisner, A.; MacLeod, D.I.A. (1980): "Blue Sensitive Cones do not Contribute to Luminance". J. opt. Soc. Am., 70, pp. 121-123.

Enoch, J.M.; Stiles, W.S. (1961): "The Colour Change of Monochromatic Light with Retinal Angle of Incidence". Optica Acta, 8, pp. 329-358.

Falcón-Martel, A. (1983): "Proceso y Extracción de Propiedades Cromáticas en Formas Visuales". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Las Palmas.

Famiglietti, E. V.; Kolb, H. (1975): "A Bistratified Amacrine Cell and Synaptic Circuitry in the Inner Plexiform Layer of the Retina". Brain Research 84. pp. 293-300

Famiglietti, E. V.; Kaneko, A.; Tachibana, M. (1977):

"Neuronal Architecture of ON and OFF Pathways to Ganglion Cells in Carp Retina". Science, 198, pp.1267-1271.

Fernández Escartín, V. (1976): "Modelos de Procesos de Datos en la Retina". Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.

Fourtes, M.; Simon, E. J. (1974): "Interactions Leading to Horizontal Cell Responses in the Turtle Retina". J. Physiol. (London), 240, pp. 177-198.

Gallego, A. (1971): "Horizontal and Amacrine Cells in the Mammal's Retina". Visión Research., 3, pp. 33-50.

González Rodríguez, M. ; Moreno-Díaz; R. (1983): "Modelo de Procesos Retinales de Color a Nivel Analítico". Actas del II Symposium de Ingeniería Biomédica. pp. 239-244. Madrid.

Gouras, P. (1968): "Identification of Cone Mechanisms in Monkey Ganglion Cells". J. Physiol., 199, pp. 533-548.

Gouras, P. (1969): "Antidromic Responses of Orthodromically Identified Ganglion Cells in Monkey Retina". J. Physiol., 204, pp. 407-419.

Gouras, P. (1970): "Trichromatic Mechanisms in Single Cortical Neurons". Science, 168, pp. 489-492.

Gouras, P. ; Zrenner, E. (1979): "Enhancement of Luminance Flicker by Color-Opponent Mechanisms".

Science, 205, pp. 587-589.

Gouras, P.; Zrenner, E. (1981): "Progress in Sensory Physiology 1". Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. pp. 138-179.

Gouras, P.; Zrenner, P. (1981): "Color Vision: A Review from a Neurophysiological Perspective". Edt. Autrum H. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.

Gouras, P. Zrenner, E. (1983): "Transient and Steady State Responses of Ganglion Cells Mediating the Signals of Short Wave Sensitive Cones". Color Vision. Physiology and Psychophysics (J.D. Mollon and L.T. Sharpe), pp. 515-526. Academic Press, London.

Gout, S.L. (1972): "A New Color Model". Color Metrics. Edited by J.J. Vos, L.F.C. Friel, and P.L. Walraven, Soesterberg, Holland, AIC

Granit, R. (1942): "Colour Receptors of the Frog's Retina". Acta Physiol. Scand., 3, pp. 137-151.

Granit, R. (1947): "Sensory Mechanism of the Retina". London and New York: Oxford University Press.

Hall, E. L.; Wong, R. Y.; Rouge, L. J. (1976): "Hierarchical Search for Image Matching". Procc. IEEE Conf. on Decision Control. pp. 791-796. Clearwater, F.L.

Hall, E. L. (1979): "Computer Image Processing and Recognition". Academic Press, New York.

Hochstein, S. ; Shapley, R. M. (1976): "Quantitative Analysis of Retinal Ganglion Cell Classification". J. Physiol. (London), 262, pp. 237-264.

Hodd, D. C.; Finkelstein, M. A. ; Buckingham, E. (1979): "Psychophysical Test of Models of the Response Function". Vis. Res., 19, pp. 401-406.

Hubel, D. W.; Wiesel, T.N. (1960): "Receptive Fields of Optic Nerve Fibres in the Spider Monkey". J. Physiol. (London), 154, pp. 572-580.

Hubel, D.; Wiesel, T. (1968): "Receptive Fields and Functional Architecture of Monkey Striate Cortex". J. Physiol., 207, pp. 215-243.

Hubel, D. H.; Wiesel, T.N. (1972): "Laminar and Columnar Distribution of Geniculo-Cortical Fibers in the Macaque Monkey". J. Comp. Neurol., 146, pp. 421-450.

Ingling, C. R.; Drum, B. A. (1973): "Retinal Receptive Fields: Correlations Between Psychophysics and Electrophysiology". Vis. Res., 13, pp. 1151-1163.

Jameson, D.; Hurvich, L. M. (1982): "Gunnar Svaetichin: Man of Vision. The S-Potential". Eds. B. D. Drujan and M. Laufer. pp. 307-310. Liss, New York.

Kals, H. (1970): "Organization of the Outer Plexiform Layer of the Primate Retina: Electron Microscopy of Golgi Impregnated Cells". Phil. Transc. Soc. London B., 258, pp. 261-238.

Kaneko, A. (1970): "Physiological and Morphological Identification of Horizontal, Bipolar and Amacrine Cells in Goldfish Retina". J. Physiol. (London), 207, pp. 623-633.

Kaneko, A. (1973): "Receptive Field Organization of Bipolar and Amacrine Cells in the Goldfish Retina". J. Physiol., 235, pp. 133-153.

Kaneko, A.; Yamada, M. (1973): "S-Potentials in the Dark-Adapted Retina of the Carp". J. Physiol. (London), 227, pp. 261-274.

Kennedy, D. (1957): "A Comparative Study of Spectral Sensitivity in Tadpoles and Adult Frogs". J. Cellular Comp. Physiol., 50, pp. 155-165.

Liebman, P.; Entine, G. (1968): "Visual Pigments of Frog and Tadpole". Vision Res., 8, pp. 761-755.

Liebman, P.; Entine, G. (1964): "Sensitive Low-Light-Level Microspectrophotometer: Detection of Photosensitive Pigments of Retinal Cones". J. Opt. Soc. Am., 54, pp. 1451-1459.

Lipetz, L. E. (1963): "Glial Control of Neuronal Activity". IEEE Trans. Military Electronics 7. pp. 144-155.

MacNichol, E. F. Jr. (1964): "Retinal Mechanisms of Color Vision". Vision. Res., 4, pp. 119-133.

MacNichol, E. F. Jr. (1966): "Retinal Processing of Visual Data". Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 55, pp. 1331-1344.

MacNichol, E.; Svaetichin, G. (1958): "Electric Responses from the Isolated Retinas of Fishes". Am. J. Ophthalmol., 46, pp. 26-40.

Marr, D.; Hildreth. (1980): "Theory of Edge Detection". Proc. R. Soc. lond., B 207, pp. 187-217.

Marks, W. B. (1965): "Visual Pigments of Single Goldfish Cones". J. Physiol. (London), 178, pp. 14-32.

Massof, R. W.; Bird, J. F. (1978): "A General Zone Theory of Color and Brightness Vision. Basic Formulation". J. Opt. Soc. Am., 6, 11, pp. 1465-1471.

Maturana, H. R. ; Lettvin, J. Y. ; MacCullough, W. S. ; Pitts, W. H. (1960): "Anatomy and Physiology of Vision in the Frog (Rana Pipiens)". J. Gen. Physiol., 43, pp. 129-175.

Maturana, H. R. (1962): "Functional Organization of the

Pigeon Retina". Symposium on Information Processing in the Nervous System. 22 Internat. Congress of Physiological-Science, II, pp. 170-180.

Maturana, H.R.; Frenk, S. (1965): "Synaptic Connections of Centrifugal Fibers in The Pigeon Retina". Science, 150, pp. 359-361.

Michael, C.R. (1968): "Receptive Fields of Single Optic Nerve Fibers in a Mammal with and All-Cone Retina. III: Opponent Color Units". J. Neurophysiol., 31, pp. 268-282.

Michael, C. R. (1978): "Color Vision Mechanisms in Monkey Striate Cortex Dual-Opponent Cells with Concentric Receptive Fields". J. Neurophysiol., 41, pp. 572-588.

Miles, F. A. (1972): "Centrifugal Control of Avian Retina .I. Receptive Field Properties of Retinal Ganglion Cells". Brain Research., 48, pp. 65-92.

Miller, F. R.; Slaughter, M. M. (1986): " Excitatory Amino Acid Receptors of the Retina: Diversity of Subtypes and Conductance Mechanisms". Trends in Neurosciences. May. Vol. 9. n. 5., pp. 211-218.

Mira, J.; Moreno-Diaz, R.; Delgado, A. (1983): "A Theoretical Proposal to Embody Cooperative Decision in the Nervous System". Proc. 1983 Conf. on General Systems Resecarch. pp. 687-690. Detroit, Mich: Inntersystems.

Moreno-Díaz, R.; Rubio Royo, E. (1980): "A Model for Non-Linear Processing in Cat's Retina". Biol. Cybernetics, 37, pp. 25-31.

Moreno-Díaz, R.; Mira, J.; Delgado, A.: "Hacia una Teoría Social de Redes Neuronales". Proc. II Simp. Nac. Ingeniería Biomedica. pp. 215-220. ETSII. Madrid.

Moreno-Díaz, R.; Rubio Royo, E.; Rubio Royo, F. (1968) "A Generalized Model for Non-Linear Retinal Processing". Proceedings of the Fourth International Congress of Cybernetics and Systems. Amsterdam.

Moreno-Díaz, R.; Rubio Royo, E. (1979): "A Model for Non-Linear Processing in Cat's Retina". Int. J. Bio-Medical Computing, 10, pp. 231-243.

Moreno-Díaz, R.; Mira, J. (1987): "Arquitectura for Integrations Percepcion and Action". Proc. Interkibernetik'87. Tarragona. Sep. 15-19.

Morris, V. B. (1970): "Symmetry in a Receptor Mosaic Demonstrated in the Chick form Frequencies, Spacing and Arrangement of the Types of Retinal Receptor". J. Comp. Neurol., 129, pp. 359-398.

Motokawa, K.; Oikawa, T.; Tasaki, K. (1957): "Receptor Potential of Vertebrate Retina". J. Neurophysiol., 20, pp. 186-199.

- Motokawa, K.; Oikawa, T.; Tasaki, K. (1976): "Receptor Potential of Vertebrate Retina". J. Neurophysiol., 20, pp. 186-199.
- Muntz, W. R. A. (1962): "Effectiveness of Different Colors of Light in Releasing Positive Phototactic Behavior of Frogs and a Possible Function of Retinal Projection to the Diencephalon". J. Neurophysiol., 25, pp. 712-720.
- Muntz, W. R. A. (1963): "The Development of Phototaxis in the Frog". J. Exptl. Biol., 40, pp. 371-373.
- Naka, K. I.; Rushton, W. A. (1966): "S-Potentials from Colour Units in the Retina of Fish". J. Physiol., 185, pp. 536-555.
- Nelson, R. ; Famiglietti, E. V. Jr.; Kolb, H. (1978): "Intracellular Staining Reveals Different Levels of Stratification for On and Off-Center Ganglion Cells in the Cat Retina". J. Neurophysiol., 41, pp. 472-483.
- Nilson, S. E. (1964): "An Electron Microscope Classification of the Retinal Receptors of the Leopard Frog". J. Ultrastruct. Res., 10, pp. 340-416.
- Paulus, W.; Koger-Paulus, A. (1983): "A New Concept of Retinal Colour Coding". Vis. Res., 23, pp. 529-540.
- Pugh, E. N. ; Mollon, J. D. (1979): "A Theory of the π_1 and π_2 Colour Mechanisms of Stiles". Vis Res., 19, pp.

293-312.

Polyack, S. (1941): "The Retina". Chicago University Press.

Raynauld, J. P. (1972): "Goldfish Retina: Sig of the Rod Input in Opponent Color Ganglion Cells". Science, 177, pp. 84-85.

Reuter, T.; Virtanen, K. (1972): "Border and Colour-Coding in the Retina of the Frog". Nature, 239, pp. 260-263.

Riseman, E. M.; Arbib, M. A. (1977): "Computational Techniques in the Visual Segmentation of Static Scenes" Comp. Graphics and Image Proccesing, 29, pp. 100-132.

Rosenfeld, A.; Kak, A. C. (1976): "Digital Picture Processing". Academic Press. new York.

Rubio Royo, E., (1979): "Modelos Retinales Generalizados". Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna. Tenerife.

Rubio Royo, F. (1969): " Modelos de Procesos Retinales: Simulación Electronica y en Calculadora". Tesis Doctoral. Universidad de Madrid.

Rushton, W. A. H. (1959): "Visual Pigments in Man and Animals and their Relation to Seeing". Progr. Biophys. Chem., 9, pp. 239-283.

Scholes, J.; Morris, J. (1972): "Receptor-Bipolar Connectivity Patterns in Fish Retina". *Nature*, 241, pp. 52-54.

Setel, W. K. (1967): "The Structure and Relationship of Horizontal Cells and Photoreceptor-Bipolar Synaptic Complexes in Goldfish Retina". *Am. J. Psychol.*, 85, pp. 401-423.

Simon, H. A. (1969): "The Sciences of the Artificial". MIT Press, Cambridge, MA.

Spekreijse, H.; Wagner, H.; Wolbarsht, M. (1972): "Spectral and Spatial Coding of Ganglion Cell Responses in Goldfish Retina". *J. Neurophysiol.*, 35, pp. 73-86.

Stiles, W. S. (1978): "Mechanisms of Color Vision". Academic Press, London.

Stiles, W. S. (1946): "A Modified Helmholtz Line Element in Brightness-Color Space". *Proc. Phys. Soc. Lond.*, 58, pp. 41-65.

Svetichin, G.; Muriel, C. "Función Retiniana y Control Automático". *Rev. Oftalm. Venezolana*, 24/1, pp. 41-70.

Svetichin, G. (1967): "Horizontal and Amacrine Cells of the Retina: Properties and Mechanisms of their Control upon Bipolar and Ganglion Cells". *Acta Cient. Venezolana*, 8, 3 pp. 254-276.

Tomita, T. (1963): "Electrical Activity the Vertebrate Retina". J. Opt. Soc. Am., 70, 8, pp. 920-930.

Tomita, T. (1965): "Electrophysiological Study of the Mechanisms Subsevering Color Coding in the Fish Retina". Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol., 30, pp. 559-566.

Trifonov, Y.A. (1968): "Study of Synaptic Transmission between the Photoreceptor and the Horizontal Cell using Electrical Stimulation of the Retina". Biophysics, 13, pp. 48-957.

Van den Gind, W. A.; Grusser, O. J.; Lunkenheimer H. U. (1973): "Temporal Transfer in the Visual System". Handbook of Sensory Physiology. Vol VII/3. Central Visual Information A. Ed. R. Jung. Springer Verlag.

Wagner, H. G.; MacNichol, E. F.; Wolbasht, M. L. (1960): "The Response Properties of Single Ganglion Cells in the Goldfish Retina. J. Gen. Physiol., 43, pp. 45-62.

Wagner, H. G.; MacNichol, E. F.; Wolbarsht, M. L. (1963): "Functional Basis for "On" Center Receptive Fields in the Retina". J. Opt. Soc. Am., 53, pp. 66-70.

Wald, G. (1967): "Blue Blindness in the Normal Fovea". Opt. Soc. Am., 57, pp. 1289-1301.

Walraven, P. L.; Bouman, M. A. (1966): "Fluctuation Theory of Colour Discrimination of Normal Trichromats".

Vis. Res., 6, pp. 567-586.

Wienrich, M.; Zrenner, M. "Colour-Opponent Mechanisms in Cat Retinal Ganglion Cells". Colour Vision. Physiology and Psychophysics. Academic Press, Inc. pp. 183-194.

Werblin, F. S.; Dowling, J. E. (1969): "Organization of the Retina of the Mudpuppy *Necturus Maculosus* II. Intracellular Recording". J. Neurophysiol., 32, pp. 339-355.

Wiesel, T. N.; Hubel, D. H. (1966): "Spatial and Chromatic Interactions in the Lateral Geniculate Body of the Rhesus Monkey". J. Neurophysiol, 29, pp. 1115-1156.

Wienrich, M.; Zrenner, E. (1983): "Colour-Opponent Mechanisms in Cat Retinal Ganglion Cells". Color Vision. Physiology and Psychophysics. Edt. Mollon J. and Sharpe L. Academic Press, Inc. London. pp. 183-194.

Wolbarsht, M. L.; Wagner, H. G.; MacNichol, E. F. Jr. (1961): "Receptive Fields of Retinal Ganglion Cells; Extent and Spectral Sensitivity". The Visual System. Neurophysiology and Psychophysics. R. Jung and H. Kornhuber. Berlin. Springer-Verlag. pp. 170-175.

Wyszecki, G. W.; Stiles, W. S. (1967): "Color Science". Wiley. New York.