

## Modelos psicofísicos de discriminación de texturas visuales: evolución y aspectos críticos

Diana Pérez Martínez  
Universidad Complutense de Madrid

*Este artículo pretende ofrecer una visión histórica de los trabajos psicofísicos que más han contribuido al conocimiento de la discriminación de texturas por el sistema visual humano. Se presentan las diferentes aproximaciones psicofísicas al estudio de la discriminación preatentiva de texturas: los modelos estadísticos, los basados en la extracción de características y los enmarcados en la teoría multicanal. Aproximaciones que se han ido sucediendo temporalmente de acuerdo con el modelo imperante sobre el procesamiento de la información por sistemas biológicos. Se realiza un análisis de cada modelo a través de los resultados experimentales más relevantes a los que han dado lugar, presentando tanto los puntos fuertes como los débiles, a la vez que analizamos cómo han ido modificando sus planteamientos iniciales hasta la actualidad.*

*Palabras clave: Modelos, psicofísica, texturas, textón, espectro de Fourier.*

*This paper presents a historical overview of the psychophysical studies which have contributed most to the understanding of the human visual system's discrimination of texture. It examines the various psychophysical approaches which have been applied in the study of preattentive texture discrimination: the  $n$ th order statistics model, the feature extraction model and the spatial frequency channels model. These approaches have evolved over time in line with the models proposed to assess the information processing systems used by biological systems. All models are analyzed on the basis of their most salient experimental results, and both their strong points and their weak points are evaluated. Their development from their initial positions until the present day is also examined.*

*Key words: models, psychophysics, texture, texton, Fourier spectra.*

La representación de la información contenida en las imágenes retinianas permite al sujeto obtener una descripción con significado de la escena observada. Es decir, le va a permitir describir *lo que está* presente en el entorno y *dónde* está localizado. Pero antes de poder identificar un objeto, debemos establecer los límites que lo definen y separan del resto. El sistema visual humano (SVH) segmenta el input óptico en regiones basándose en las diferencias de las propiedades que poseen áreas adyacentes de la superficie. Una importante fuente de información para este proceso son las texturas, ya que diferentes objetos suelen tener distintas propiedades de textura.

Entre psicólogos, fisiólogos e informáticos está ampliamente aceptada la existencia de dos sistemas funcionalmente distintos en el procesamiento de la información visual. Así ciertos aspectos del tratamiento visual parecen realizarse en paralelo, sin escudriñamiento, y a un nivel preconscious, sin requerir la ayuda de procesos cognoscitivos. Sin embargo, otros implican búsqueda serial, escudriñamiento y procesamiento cognitivo. Estos dos tipos de procesamiento, señalados originalmente por Neisser (1967) como preatentivo y atento, tendrían características funcionales muy diferentes. El primero se encargaría de segregar o separar las regiones de la escena en figura y fondo, actuando de este modo como guía para el segundo que se encargaría de identificar los objetos. La revisión abordada aquí se enmarca en la primera etapa, por consiguiente cuando se hable de discriminación de texturas nos estaremos refiriendo a discriminación preatentiva.

Existe también un amplio acuerdo entre la mayoría de los teóricos de la visión, sobre la idea de que en las etapas primarias del procesamiento visual se extraen propiedades elementales o primitivas a lo largo del campo visual. Primitivas que permiten dividir la escena en regiones separadas por diferencias en ellas y así establecer los objetos candidatos para una posterior identificación. Sin embargo, hay bastante menos acuerdo sobre cómo el sistema visual humano (SVH) codifica la estructura espacial de la imagen, es decir, sobre cuáles son exactamente las propiedades de la imagen visual que funcionan como primitivas de la visión temprana. La concepción predominante, tanto en los estudios fisiológicos como en los psicofísicos, ha consistido en describir un conjunto finito de analizadores consistentes con un conjunto de señales restringido. De ello se han derivado dos modos extremos de representar la información contenida en la imagen por parte del SVH: 1) Codificación de la imagen en términos de *rasgos locales*, desde esta aproximación características como bordes, barras, intersecciones, líneas, etc... funcionarían como primitivas (Hubel y Wiesel, 1962, 1968; Barlow, 1972, 1983) y 2) Codificación de la imagen mediante *patrones globales*. Aquí se engloban dos aproximaciones, según se consideren como primitivas las funciones de autocorrelación y estadísticas de orden  $n$  (Julesz, 1962, 1981; Caelli, Julesz y Gilbert, 1978; Uttal, 1975) o las frecuencias espaciales contenidas en la imagen estimular (Enroth-Cugell y Robson, 1966; Campbell y Robson, 1968). La definición de esas primitivas es fundamental en la explicación de cómo el SVH discrimina texturas, pues esto ocurrirá cuando las diferencias en esas primitivas excedan un determinado valor crítico.

Esta falta de consenso ha dado lugar durante los últimos 30 años a la aparición de distintos modelos o aproximaciones al estudio de la discriminación de texturas. A continuación se pretende ofrecer una visión histórica, todo lo completa que estas páginas nos permitan, de los trabajos psicofísicos que más han contribuido al conocimiento de la discriminación de texturas por el SVH. Se presentarán tanto los puntos fuertes como los débiles de ellos y se verá cómo han ido desarrollando y modificando sus planteamientos iniciales hasta la actualidad. Se agruparán en tres bloques, continuando con la división establecida anteriormente sobre los diferentes modelos propuestos para la codificación de la estructura espacial de las imágenes. No obstante, conviene señalar que no podemos encuadrar rigidamente a los distintos autores, ya que algunos pertenecen a uno u otro en diferentes etapas del desarrollo de sus ideas.

## Modelos estadísticos

Una de las personas que más ha contribuido al estudio de la discriminación de texturas por el SVH ha sido Bela Julesz, un ingeniero de radares convertido en psicólogo visual que desde 1962 no ha dejado de publicar y proporcionar nuevas ideas. Su teoría, en continua evolución, puede dividirse en cuatro etapas claramente diferenciadas. En la primera, que es la que nos ocupa en esta sección, conocida como la de *formulación y confirmación de su conjetura* Julesz propone una hipótesis estadística sobre la discriminación de texturas. La idea central fue que este proceso visual estaba basado en las propiedades estadísticas de la distribución de la luz en las imágenes, por lo tanto, las texturas serían analizadas perceptivamente de igual modo que uno puede tratar matemáticamente un proceso probabilístico.

Basándose en el análisis de una gran variedad de texturas, Julesz propone la siguiente conjetura: *pares de textura con estadísticos de segundo orden iguales, o lo que es lo mismo, pares de texturas isodipolos no pueden discriminarse sin esfuerzo*. De acuerdo con esta conjetura, son las diferencias en las distribuciones de probabilidad de primer y segundo orden las que daban lugar a la discriminación preatentiva de texturas, mientras que las diferencias en las distribuciones de orden mayor serían insuficientes o irrelevantes para el SVH. Su conjetura se vio confirmada, en un primer momento, por las observaciones realizadas sobre una gran variedad de texturas generadas mediante procesos estocásticos de Markov (Julesz, 1962). Indudablemente este tipo de texturas son un caso atípico en visión por ser inherentemente unidimensionales, por ello se cuestionó la validez de los resultados obtenidos. Se diseñaron entonces varios métodos para generar texturas bidimensionales isodipolos con estadísticos de tercer orden y mayores diferentes. Los resultados obtenidos sobre ellas confirmaron y reforzaron la hipótesis inicial (Julesz, Gilbert, Shepp y Frisch, 1973). Puesto que texturas isodipolos tienen el mismo espectro de

amplitud, Julesz propuso la siguiente versión de su conjetura en términos del análisis de Fourier: *la discriminación de texturas está basada en las diferencias en el espectro de amplitud e ignora el espectro de fase*. Conjetura que será retomada más adelante en este artículo.

Esta hipótesis estadística sobre la discriminación preatentiva de texturas estimuló el interés de muchos investigadores, debido a la inherente simplicidad del modelo y a que era plausible biológicamente. El hecho de que analizadores de características en gatos y monos estuviesen sintonizados selectivamente, según los datos neurológicos, a orientaciones y muchos de ellos a longitudes específicas hizo conceptualmente posible mirar a un subconjunto de tales analizadores como detectores del dipolo estadístico. Sin embargo pronto aparecieron contraejemplos a esta teoría, algunos de ellos encontrados incluso por los propios autores, que pusieron de manifiesto las limitaciones de esta aproximación (Pollack, 1973; Purks y Richards, 1977; Caelli y Julesz, 1978; Caelli, Julesz y Gilbert, 1978; Julesz, Gilbert y Victor, 1978; Gagalowicz, 1979; Julesz, 1980; Diaconis y Freedman, 1981).

### Modelos basados en la extracción de características

Bajo esta aproximación se engloban los estudios que consideran que el proceso de discriminación de texturas está basado en las diferencias entre los elementos geométricos simples contenidos en ellas. Ello supone el admitir como estímulos elementales o primitivas de la visión a un conjunto de características, o rasgos locales, que actuarían como disparadores para determinadas clases de células del sistema visual.

En las primeras aproximaciones al estudio de la discriminación de texturas basándose en las descripciones geométricas de los elementos de las imágenes, se circunscribe la segunda etapa de los trabajos de Julesz y sus colaboradores. Durante esta etapa la conjetura probabilística tuvo que ser modificada al descubrirse pares de texturas isodipolos discriminables por unas cuantas propiedades geométricas locales, a las que se llama *los quarks perceptivos*, como colinealidad, *corner*, *closure*, *blobs* y conectividad (Caelli y Julesz, 1978; Caelli, Julesz y Gilbert, 1978; Julesz, Gilbert y Victor, 1978). Esta lista de características primitivas fue posteriormente modificada por la famosa *teoría del texton* (Julesz, 1980, 1981, 1986). En ella los *quarks perceptivos* son desplazados por los *textones*, definidos como segmentos de línea (con determinada longitud, orientación, anchura, velocidad, disparidad binocular y tasa de *flicker*), terminaciones, cruces y *blobs*. La discriminación de texturas se explica, desde esta teoría, como resultado de las diferencias en los *textones* o de la diferencia en los estadísticos de primer orden de esos *textones* (véase Figura 1) y no por las diferencias globales de segundo orden entre puntos de la imagen, como se sugirió en 1962 (véanse las excelentes revisiones de Julesz y Bergen, 1983; Julesz, 1984a, 1985). El hecho neurofisiológico de que

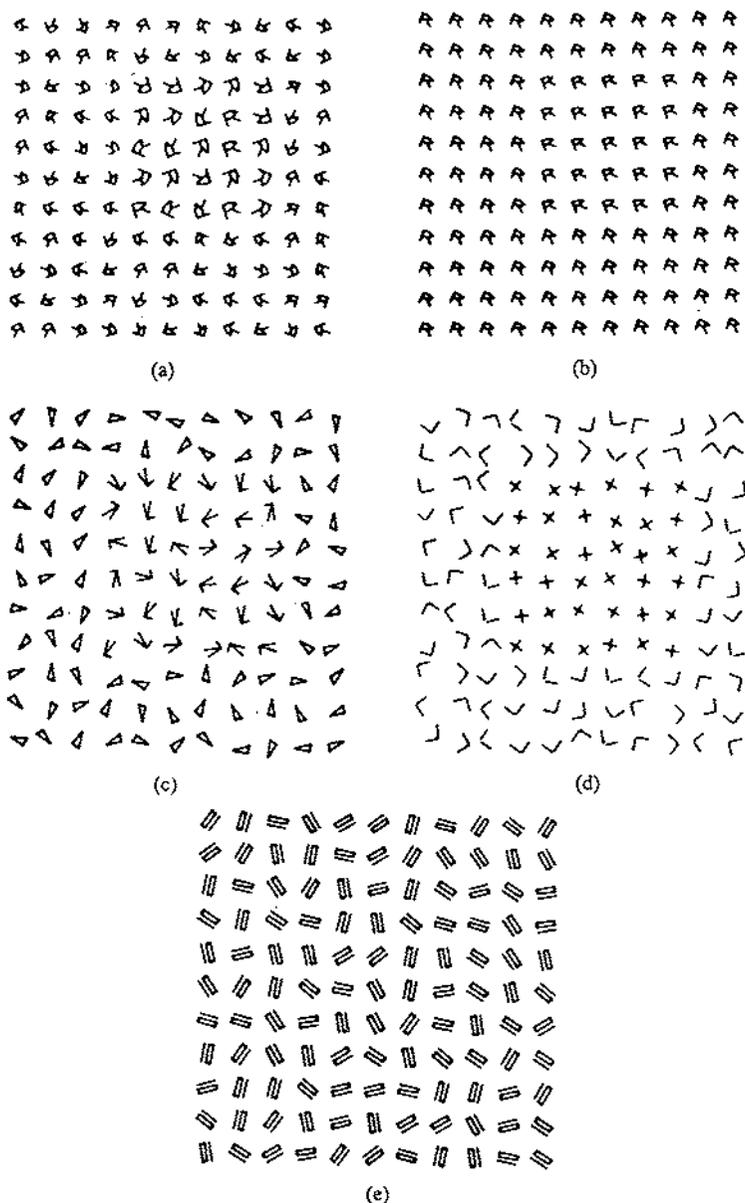


Figura 1. Pares de texturas que confirmaron la teoría del *texon*. (a), (b), (c) y (d) Ejemplos de discriminación preatentiva basada en: (a) las diferencias de longitud de los segmentos de líneas, (b) las diferencias en orientación angular de los segmentos de líneas, (c) la diferencia en el número de terminaciones (0-3) y (d) diferencia en el número de cruces (0-1). (e) Ejemplo de discriminación no preatentiva, las dos texturas contienen el mismo número de segmentos de líneas y de terminaciones. (Tomada de Julesz y Bergen, 1983; Figs. 2, 4, 6 y 7.)

algunos textones, concretamente segmentos de borde y terminaciones, fuesen detectados en etapas tempranas por el sistema visual (Hubel y Wiesel, 1977; Kato, Bishop y Orban, 1978) reforzó este modelo.

Resulta sorprendente la similitud entre la lista de primitivas ofrecida por la teoría del *texton* y la propuesta por David Marr (1976) como elementos del esbozo primitivo en bruto (*raw primal sketch*). Esta segunda incluye también bordes, barras, *blobs* y terminaciones con determinados atributos de orientación, contraste, longitud, anchura y posición. La única diferencia entre las dos aproximaciones, respecto a la discriminación de texturas, se basa en los diferentes caminos recorridos por los autores para llegar a esas primitivas. Mientras que Julesz necesitó 18 años de investigación psicofísica, Marr las tomó directamente de los datos neurológicos del momento, con el objeto de ofrecer un modelo computacional de la visión humana.

Pero el papel de algunas de estas características en la discriminación de texturas ha sido cuestionado recientemente. El hecho de que la discriminación de texturas por diferencias en cruces esté afectada por variaciones de factores como el tamaño del elemento (Gurnsey y Browse, 1987; Bergen y Adelson, 1988), la anchura de líneas (Nothdurft, 1990), la posición del punto de intersección (Kröse, 1987; Nothdurft, 1990) y la disposición de los elementos de la textura (Nothdurft, 1990), han arrojado considerables dudas sobre la idea de que es la intersección la que hace discriminar texturas como la de la Figura 1(d). Estas dudas se ven reforzadas por la observación de que muchas texturas se discriminan cuando se reducen en escala, de tal modo que no se pueden identificar las características de los *textones*. Por otro lado, se ha encontrado que la discriminación por diferencias en el número de terminaciones se ve influida por variaciones en el tamaño de los elementos (Enns, 1986; Gurnsey y Browse, 1987) y la debida a diferencias en el tamaño de los *blobs*, otro supuesto *texton*, está mediada por variaciones en la luminancia asociada a las bajas frecuencias espaciales (Beck, Sutter e Irvy, 1987; Nothdurft, 1990). Estas observaciones plantean serias dudas sobre la validez de la teoría del *texton*, por sugerir que la discriminación de texturas no está basada en el análisis preatentivo de los *textones*.

Un modelo parecido a los anteriores, aunque menos elaborado, es el propuesto por Jacob Beck (Beck, 1972, 1974, 1982, 1983; Beck, Prazdny y Rosenfeld, 1983). Quien comenzó en 1966 a investigar de forma sistemática cómo la similitud controla el *grouping* perceptivo, encontrando que el juicio de similitud basado en figuras individuales no predice el agrupamiento perceptivo, contrariamente a lo que podía esperarse según las leyes de la *gestalt* (Beck, 1966a, b). Según este modelo la discriminación de texturas está basada en la información sobre pendientes, tamaños, colores y contraste de los elementos físicos de la textura y sus estructuras emergentes. Son también las diferencias de los estadísticos de primer orden de esas características locales las que darían lugar a discriminación preatentiva de textura.

Como en el caso de B. Julesz y J. Beck, los resultados empíricos obtenidos por Anne Treisman y sus colaboradores determinaron la lista de características reconocidas como primitivas en la segmentación de texturas. La

idea central de la teoría desarrollada por ellos, conocida como la teoría de integración de características (*Feature-integration Theory of attention*), es que la escena visual se codifica a lo largo de un número de dimensiones separables tales como color, orientación, frecuencia espacial, brillo y dirección del movimiento. El sistema visual almacenaría la información sobre cada una de esas dimensiones separadamente y requeriría concentración de la atención para integrarla (Treisman, Sykes y Gelade, 1977; Treisman y Gelade, 1980).

Refiriéndose al término *dimensión* como al rango completo de variación que es analizado por algún subsistema perceptivo y con el término *características* a un valor particular de esa dimensión (color y forma son dimensiones, rojo y cuadrado características). La predicción de esta teoría para la discriminación de texturas es que los sujetos podrán discriminar preatentivamente dos texturas sólo cuando difieran en una o varias características procesadas por separado por el SVH, pero no cuando difieran en su conjunción. Los datos psicofísicos obtenidos durante los últimos 15 años en distintos paradigmas experimentales, entre ellos la discriminación de texturas, apoyan esta teoría (Treisman, 1982, 1988; Treisman y Schmidt, 1982; Treisman y Paterson, 1984; Treisman y Souther, 1985).

La evidencia fisiológica de la existencia de unidades simples que responden selectivamente a más de una dimensión física en la mayoría de las áreas visuales, plantea serias dudas a esta teoría. La mayoría de las células en el área V1, por ejemplo, están sintonizadas a frecuencia espacial y orientación (De Valois, Yund y Hepler, 1982); muchas células aquí y en las áreas preestriadas están sintonizadas a determinada dirección del movimiento y a orientaciones particulares o a color y a orientación (Maunsell y Van Essen, 1983; Thorell, De Valois y Albrecht, 1984; Desimone, Schein, Moran y Ungerleider, 1985). En los últimos años han aparecido, además, resultados experimentales inconsistentes con esta teoría, así algunos estudios demuestran que color y forma (Houck y Hoffman, 1986; Mordkoff, Yantis y Egeth, 1990), dirección del movimiento y forma (McLeod, Driver y Crisp, 1988), disparidad binocular y movimiento (Nakayama y Silverman, 1986; Steinman, 1987), tamaños y orientaciones (Wolfe, Cave y Franzel, 1989) así como frecuencia espacial y orientación (Sagi, 1988) son procesados a nivel preatentivo. Otros han demostrado la existencia de interferencias entre dimensiones codificadas, según esta teoría, separadamente como color y forma (Pashler, 1988) y color y orientación (Callagan, Lasaga y Garner, 1986). Antes de concluir esta sección, conviene señalar que aunque los modelos de discriminación de texturas presentados en ella se han construido típicamente para patrones de líneas y puntos no directamente aplicables a las texturas encontradas en ambientes naturales, han contribuido notablemente a motivar la investigación en este campo.

Sin embargo, una de las mayores dificultades de esta aproximación es que al estar basada en descripciones verbales de la imagen es muy difícil su formalización, sin hablar de la dificultad que supone el encontrar una lista de características lo suficientemente amplia como para poder explicar todos los posibles casos de segmentación de texturas. Los contraejemplos citados anteriormente confirman plenamente estas observaciones.

## Modelos basados en la teoría multicanal

Los estudios presentados en esta sección se han desarrollado desde la teoría multicanal, según la cual el SVH puede caracterizarse, desde el punto de vista psicofísico, por un conjunto de mecanismos cuasi-lineales (canales) sintonizados a un rango limitado de frecuencias y orientaciones espaciales. Considerado así el SVH aparece no como un analizador de características, sino como un analizador de las frecuencias y orientaciones espaciales contenidas en las imágenes, por lo que éstas serán las primitivas en el proceso de discriminación de texturas.

Este enfoque, si bien supone que los procesos tienen lugar a nivel espacial acude al dominio de la frecuencia, es decir utiliza el espectro de Fourier, para entender las transformaciones de la imagen en el procesamiento temprano. Por ello los distintos trabajos sobre discriminación de texturas, revisados en esta sección, pueden clasificarse según intenten predecir la discriminación a partir de las características espectrales o espaciales de los outputs de los canales. Comenzaremos con la exposición de los que trabajan en el dominio de la frecuencia y se presentarán a continuación los que lo hacen en el dominio del espacio.

### *Análisis de la textura en el dominio de la frecuencia*

La razón por la que resultó atractivo trabajar con el análisis de Fourier en discriminación de texturas, es la relativa facilidad con la que es posible relacionar las propiedades de la transformada de la textura con aquellas en el dominio espacial. Así, estudiando detenidamente el espectro de amplitud es posible inferir algunas características espaciales globales de la textura como uniformidad, densidad, finura o tosquedad, rugosidad, regularidad, direccionalidad, etc...

La primera persona que caracterizó una textura en términos del espectro de amplitud del análisis de Fourier fue Kaizer (1955). Aunque los pioneros en esta aproximación del estudio de la textura desde el punto de vista psicofísico fueron Richards y Polit (1974) y Harvey y Gervais (1978). Estos autores demostraron la existencia de una relación sistemática entre las frecuencias espaciales contenidas en los estímulos y la similitud que entre ellas percibían los sujetos. Por lo que concluyeron que la discriminación de texturas puede ser explicada por modelos lineales, como el análisis de Fourier, más que por modelos de extracción de características. Continuando en esta línea, Julesz (1978) propuso una versión de su conjetura en términos del análisis de Fourier para explicar la no discriminación de texturas isodipolos: *la discriminación de texturas se basa fundamentalmente en las diferencias en sus espectros de amplitud e ignora los de fase*. Ello explicaría porqué texturas

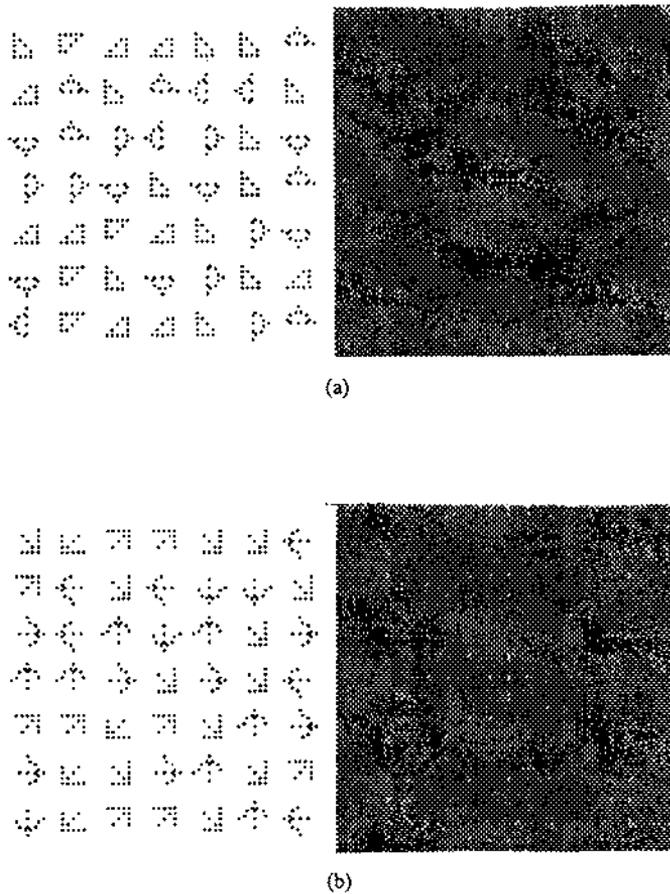


Figura 2. Texturas isodipolos y sus espectros de amplitud. (a) Región externa de la Figura 1(c). (b) Región interna de la Figura 1(c). Obsérvese que los espectros de amplitud de las dos texturas son iguales y por tanto no pueden explicar la diferencia percibida entre ellas (Pérez Martínez, 1992).

isodipolos, que tienen la misma función de autocorrelación y por tanto el mismo espectro de amplitud, son indiscriminables. Sin embargo, pronto aparecieron las primeras limitaciones a esta idea al encontrarse texturas con igual espectro de amplitud altamente discriminables, véase la Figura 2 (Caelli y Julesz, 1978; Caelli, Julesz y Gilbert, 1978; Julesz y Caelli, 1979) y viceversa, texturas con diferente espectro de amplitud no discriminables (Mayhew y Frisby, 1978). Estos datos eran incompatibles con la idea de que el SVH discriminase texturas basándose exclusivamente en la información contenida en los espectros de amplitud.

Es evidente que si decidimos centrarnos en el análisis del espectro de Fourier para predecir discriminación de texturas, el estudio del espectro de fase se impone como necesario. Posiblemente, el que inicialmente se asumiese que el espectro de fase podía ser ignorado por el sistema preatentivo de discriminación de texturas y la comprensible dificultad que su estudio conlleva, explica que haya escasos estudios sobre la sensibilidad a la fase en discriminación de texturas. Estudios que, si bien demuestran su importancia en esta tarea, no son concluyentes respecto a si el SVH utiliza esta información para llevarla a cabo. Algunos trabajos han demostrado que el SVH no codifica todas las relaciones de fase en discriminación de texturas, 16 son las relaciones que parecen necesarias (lo que implica diferencias mínimas de  $22.5^\circ$ ) para que sea posible la discriminación de texturas con iguales espectros de amplitud (Hübner, Caelli y Rentschler, 1988). Pero no hay que olvidar que algunas diferencias de fase se reflejan a nivel espacial con cambios en el perfil de luminancia, por lo que resulta imposible decidir si los observadores basan sus discriminaciones en ese perfil o en la información contenida en el espectro de fase. Al respecto, algunos estudios han concluido que el SVH solamente puede discriminar texturas con igual espectro de amplitud y diferente fase, cuando ésta implica cambios en el contraste local (Rentschler, Hübner y Caelli, 1988).

Como se habrá intuido a lo largo de la lectura de estas líneas, el estudio de las salidas de los canales a través de los espectros del análisis de Fourier global es incapaz de ofrecer una explicación satisfactoria de cómo el SVH discrimina texturas. Ello es debido a que en esta aproximación, inherentemente global, se pierden las características locales de la textura, características a las que el sistema preatentivo es altamente sensible. Por esto, quizá, la aproximación correcta desde este enfoque sería el considerar modelos que realizasen un análisis espectral local de las imágenes (para una aproximación a ellos, véase Sierra, 1992).

### *Análisis de la textura en el dominio del espacio*

La mayoría de los estudios, eludiendo el análisis en el dominio espectral, se decantan por trabajar en el dominio del espacio. Desde esta aproximación, se considera que son las diferencias en el output de los canales en el dominio espacial las que determinan la discriminación de texturas. Alternativa que ha demostrado ser más fructífera que la anterior en la explicación de ese proceso visual. Así, algunos intentos de simulación han demostrado cómo texturas iso-dipolos, con el mismo espectro de amplitud y altamente discriminables, exhiben valores de intensidad diferentes en el output de los canales (Ginsburg, 1978; Voorhees, 1987). Como ejemplo de ello véase la Figura 3.

Bajo esta aproximación, han aparecido diversos estudios que intentan encontrar cuáles son las diferencias mínimas en frecuencia y orientación que permiten discriminar entre dos zonas de texturas idénticas en todas las características excepto en ellas. Pero la heterogeneidad de los estímulos estu-

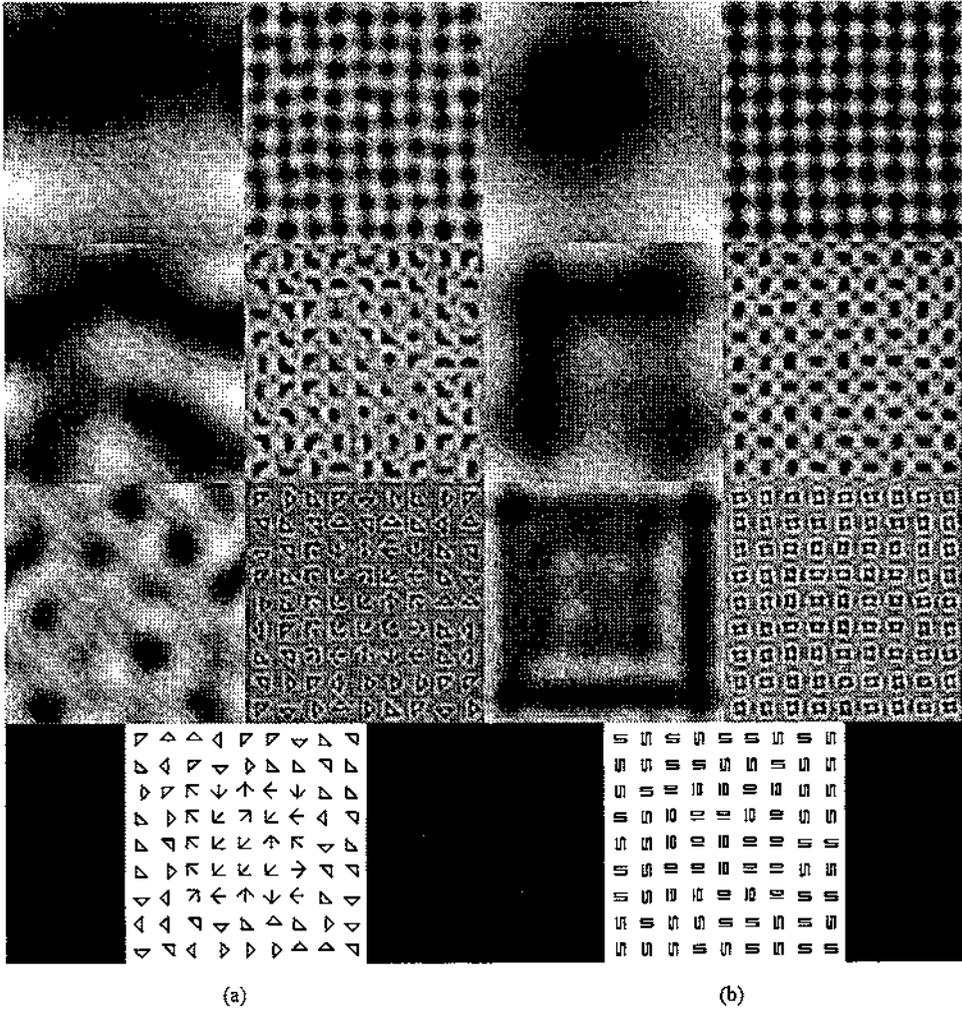


Figura 3. Pares de texturas presentadas en las Figuras 1(c) y 1(e) filtradas por distintos canales de Gabor. (a) Par de texturas isodipolos discriminables preatentivamente, nótese las diferencias que aparecen entre las dos en las imágenes de la segunda columna, segunda y tercera fila. (b) Par de texturas isodipolos no discriminables preatentivamente, obsérvese cómo no aparecen diferencias en ninguna de las salidas de los canales (Pérez Martínez, 1992).

diados, añadida a la utilización de estímulos de banda ancha en muchos casos, obliga a considerar algunos de los resultados que a continuación se exponen con la debida precaución. Las conclusiones a las que llegaron Caelli y sus

colaboradores con texturas probabilísticas de niveles de grises filtradas a distintas frecuencias y orientaciones (Caelli, 1983; Caelli y Bevan, 1983), imágenes naturales filtradas (Caelli, 1983) y texturas en blanco y negro compuestas por rectángulos o líneas (Caelli, 1982, 1983) fueron que los observadores no pueden discriminar entre texturas cuyas diferencias en frecuencia y orientación eran menores de  $\pm 1/8$  octava y  $\pm 5^\circ$ , respectivamente. Datos que no coinciden con los obtenidos por Voorhees (1987), quien encuentra que son  $15^\circ$  la diferencia mínima en orientación para discriminar dos texturas por esta característica. Se ha demostrado que esta sensibilidad a las diferencias de orientación aumenta al aumentar las frecuencias espaciales contenidas en la textura (Caelli, 1982; Nothdurft, 1985a) y depende del contraste entre las orientaciones (Van Essen, Yoe, Olavarria, Knierim, Fox, Sagi y Julesz, 1989; Nothdurft, 1991b). Por otro lado, los trabajos que examinan la relación entre diferencias en orientación ( $\Delta\theta$ ), distancia de los micropatrones ( $\Delta x$ ) y frecuencia espacial ( $F$ ) concluyen que la discriminación empeora al: *a*) disminuir las diferencias en orientación entre regiones, *b*) aumentar el espaciamiento entre los micropatrones y *c*) a frecuencias espaciales muy bajas (menores de 1,5 c/grado) (Nothdurft 1985b, Landy y Bergen, 1991).

Finalmente hay que señalar que, en experimentos psicofísicos de enmascaramiento con ruido bidimensional de distintas bandas de frecuencia, se ha encontrado que la discriminación de texturas debida a diferencias en características como cruces y terminaciones se asocia a diferencias en la composición de frecuencia espacial, mientras que la debida a diferencias en el tamaño de los *blobs* se asocia a diferencias en luminancia (Nothdurft, 1991a). Resultados que coinciden con las observaciones obtenidas en varios intentos de *modelling* visual que permitieron concluir que son las diferencias en el output de los canales a nivel espacial las que determinan la discriminación de la textura, (Ginsburg, 1978; Bergen y Adelson, 1988; Voorhees y Poggio 1988). Al respecto es interesante destacar que Julesz, uno de los principales defensores del análisis de características en la discriminación de texturas, ha excluido los cruces y las terminaciones de su lista de *textones* (Nothdurft, 1991b; comunicación personal).

Puesto que el concepto de *texton* fue formulado originalmente para explicar la discriminación de texturas con idéntica distribución de energía, quizá debiéramos preguntarnos si los *textones* no podrían jugar un papel más importante en la discriminación de texturas y si las ideas de canal psicofísico y detector de características son incompatibles. Ciertamente no lo son si en el procesamiento realizado por los canales se tienen en cuenta análisis *locales*, tanto si nos movemos en el dominio de la frecuencia como en el del espacio.

Suponiendo que la discriminación de texturas por el SVH esté basada en los outputs de los canales de frecuencia espacial, la pregunta sería qué mecanismos posteriores son utilizados para evaluar, e incluso cuantificar, esas diferencias. No hay estudios psicofísicos al respecto, pero sí diversos intentos de *modelling* computacional que basándose en datos psicofísicos y biológicos nos ofrecen posibles respuestas sobre cómo este proceso podría ser realizado por el SVH, intentos revisados por Pérez (1992).

## Conclusiones

En este artículo se han presentado las diferentes aproximaciones psicofísicas al estudio de la discriminación preatentiva de texturas: los modelos estadísticos, los basados en la extracción de características y los enmarcados en la teoría multicanal. Aproximaciones que se han ido sucediendo temporalmente de acuerdo con el modelo imperante sobre el procesamiento de la información por sistemas biológicos. Aunque no existe un modelo lo suficientemente general, es la aproximación basada en la teoría multicanal la que está resultando más fructífera. En ella se basan los procedimientos computacionales que recientemente implementados son consistentes, en algún sentido, con las propiedades del SV de los vertebrados y las conductas de discriminación observadas en humanos.

Tanto los estudios psicofísicos como los computacionales tienen en común las siguientes limitaciones: 1) trabajan con texturas bidimensionales, casi siempre monocromáticas y estáticas, 2) suponen que las primitivas del proceso de discriminación de texturas son de bajo nivel, características geométricas o frecuencia espacial y 3) confusión sobre los mecanismos neurológicos subyacentes al proceso de discriminación de texturas.

Obviamente es necesaria más investigación empírica dirigida específicamente hacia esos tres puntos. El estudio de texturas multivariables, con color, movimiento y tridimensionalidad, podría contribuir a eliminar la primera limitación. Respecto a la segunda, actualmente está en discusión si es posible la inclusión de primitivas que impliquen niveles de procesamiento más sofisticados que los hasta ahora supuestos en visión temprana. El estudio de texturas cuyos elementos contienen claves monoculares de tridimensionalidad ha arrojado resultados contradictorios (Enns y Rensink, 1990; Pérez, 1992, 1994). En cuanto a la tercera limitación, son muchos los interrogantes respecto a los mecanismos neurológicos subyacentes a este proceso. Uno de ellos es si se encuentran localizados en las vías monoculares o en las más centrales que conducen información binocular, problema que ha sido abordado mediante experimentación psicofísica por Pérez (1993, en prensa) y cuyos resultados indican que es posible discriminar texturas *después* de la fusión estereoscópica, lo que supone la implicación de áreas visuales cuyas neuronas conducen información binocular.

## REFERENCIAS

- Barlow, H.B. (1972). Single units and sensation: A neuron doctrine for perceptual psychology. *Perception*, 1, 371-394.
- Barlow, H.B. (1983). Understanding natural vision. In O.J. Braddick & A.C. Sleight (Eds.), *Physical and Biological Processing of Images* (pp. 2-14). N.Y.: Springer-Verlag.
- Beck, J. (1966). Perceptual grouping produced by changes in orientation and shape. *Science*, 1, 154. (a).
- Beck, J. (1966). Effect of orientation and shape similarity on perceptual grouping. *Perception and Psychophysics*, 1, 300-302. (b).

- Beck, J. (1972). Similarity grouping and peripheral discriminability under uncertainty. *American Journal of Psychology*, 85, 1-19.
- Beck, J. (1974). Relation between similarity grouping and peripheral discriminability. *Journal of Experimental Psychology*, 102, 1145-1147.
- Beck, J. (1982). Textural segmentation. In J. Beck (Ed.) *Organization and Representation in Perception* (pp. 285-317). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Beck, J. (1983). Textural segmentation, second order statistics and textural elements. *Biological Cybernetics*, 48, 125-130.
- Beck, J., Prazdny, K. & Rosenfeld, A. (1983). A theory of textural segmentation. In J. Beck, B. Hope & A. Rosenfeld (Eds.) *Human and Machine Vision* (pp. 1-38). New York: Academic.
- Beck, J., Sutter, A. & Ivry A. (1987). Spatial frequency channels and perceptual grouping in texture segregation. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 37, 299-325.
- Bergen, J.R. & Adelson, E.H. (1988). Early vision and texture perception. *Nature*, 333, 363-364.
- Caelli, T.M. (1982). On discriminating visual textures and images. *Perception and Psychophysics*, 31, 149-159.
- Caelli, T.M. (1983). Energy processing and coding factors in texture discrimination and image processing. *Perception and Psychophysics*, 34, 349-355.
- Caelli, T.M. & Bevan, P. (1983). Probing the spatial frequency spectrum for orientation sensitivity in stochastic textures. *Vision Research*, 23, 39-45.
- Caelli, T.M. & Julesz, B. (1978). On perceptual analyzers underlying visual texture discrimination: Part I. *Biological Cybernetics*, 28, 167-175.
- Caelli, T.M., Julesz, B. & Gilbert, E.N. (1978). On perceptual analyzers underlying visual texture discrimination: Part II. *Biological Cybernetics*, 29, 201-214.
- Callaghan, T.C., Lasaga, M.I. & Garner, W.R. (1986). Visual texture segregation based on orientation and hue. *Perception and Psychophysics*, 39, 32-38.
- Campbell, F.W. & Robson, J.G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197, 551-556.
- Desimone, R., Schein, S.J., Moran, J. & Ungerleider, L.G. (1985). Contour, color and shape analysis beyond the striate cortex. *Vision Research*, 25, 441-452.
- De Valois, R.L., Yund, E.W. & Hepler, N. (1982). The orientation and direction selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, 22, 531-544.
- Diaconis, P. & Freedman, D. (1981). On the statistical of vision: The Julesz conjecture. *Journal of Mathematical Psychology*, 24, 112-138.
- Enns, J.T. (1986). Seeing textures in context. *Perception and Psychophysics*, 39, 143-147.
- Enns, J.T. & Rensink, R.A. (1990). Influence of scene-based properties on visual search. *Science*, 247, 721-723.
- Enroth-Cugell, C. & Robson, G.J. (1966). The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat. *Journal of Physiology, London*, 187, 517-522.
- Gagalowicz, A. (1979). Stochastic texture fields synthesis from a priori given second order statistics. *Proceeding of the IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing* (pp. 796-804). Chicago.
- Ginsburg, A.P. (1978). *Visual Information Processing Based on Spatial Filters Constrained by Biological Data*. Doctoral Dissertation. AMRL-TR-78-129. Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base. Ohio.
- Gurnsey, R. & Browse, R.A. (1987). Micropattern properties and presentation conditions influencing visual texture discrimination. *Perception and Psychophysics*, 41, 239-252.
- Harvey, L.O. & Gervais, M.J. (1978). Visual texture perception and Fourier analysis. *Perception and Psychophysics*, 24, 534-542.
- Houck, M.R. & Hoffman, J.E. (1986). Conjunction of color and form without attention: Evidence from an orientation-contingent color aftereffect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 186-199.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, 160, 106-154.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology*, 195, 215-243.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1977). Functional architecture of macaque monkey visual cortex. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 198, 1-59.
- Hübner, M., Caelli, T.M. & Rentschler, I. (1988). Visual phase resolution for gray-scale textures. *Perception and Psychophysics*, 43, 319-325.

- Julesz, B. (1962). Visual Pattern discrimination. *IRE Transaction of Information Theory*, 8, 84-92.
- Julesz, B. (1978). Perceptual limits of texture discrimination and their implications for figure-ground separation. In E.L.J. Leeuwenberg & H.F.J.M. Buffart (Eds.) *Formal Theories of Visual Perception* (pp. 205-216). New York, NY: Wiley. (a).
- Julesz, B. (1980). Spatial nonlinearities in the instantaneous perception of textures with identical power spectra. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, 290, 83-94.
- Julesz, B. (1981). Textons, the elements of texture perception and their interactions. *Nature*, 290, 91-97.
- Julesz, B. (1984). A brief outline of the texton theory of human vision. *Trends in NeuroSciences*, 7, 41-45.
- Julesz, B. (1985). Preconscious and conscious processes in vision. In C. Chagas, R. Gattass, C. Gross (Eds.) *Pattern Recognition Mechanisms* (pp 333-359). The Vatican: Pontifica Academia Scientiarum.
- Julesz, B. (1986). Textons gradients: The texton theory revisited. *Biological Cybernetics*, 54, 245-251.
- Julesz, B. & Bergen, J.R. (1983). Textons, the fundamental elements in preattentive vision and perception of textures. *The Bell System Technical Journal*, 62, 1619-1645.
- Julesz, B. & Caelli, T.M. (1979). On the limits of Fourier decomposition in visual texture perception. *Perception*, 8, 69-73.
- Julesz, B., Gilbert, E.N., Shepp, L.A. & Frisch, H.L. (1973). Inability of humans to discriminate between visual textures that agree in second-order statistics. *Perception*, 2, 391-405.
- Julesz, B., Gilbert, E.N. & Victor, J.D. (1978). Visual discrimination of textures with identical third-order statistics. *Biological Cybernetics*, 31, 137-140.
- Kaizer, H. (1955). *A Quantification of Textures on Aerial Photographs*. Doctoral Dissertation. Boston University.
- Kato, H., Bishop, P.O. & Orban, G.A. (1978). Hipercomplex and simple/complex cell classification in cat striate cortex. *Journal of Neurophysiology*, 41, 1071-1095.
- Kröse, B.J.A. (1987). Local structure analyzers as determinants of preattentive pattern discrimination. *Biological Cybernetics*, 55, 289-298.
- Landy, M.S. & Bergen, J.R. (1991). Texture segregation and orientation gradient. *Vision Research*, 31, 679-691.
- Marr, D. (1976). Early processing of visual information. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, 275, 483-524.
- Maunsell, J.H.R. & Van Essen, D.C. (1983). Functional properties of neurons in the middle temporal visual areas (MT) of the macaque monkey: I. Selectivity for stimulus direction, speed and orientation. *Journal of Neurophysiology*, 49, 1127-1147. (a).
- Maunsell, J.H.R. & Van Essen, D.C. (1983). Functional properties of neurons in the middle temporal visual areas (MT) of the macaque monkey: II. Binocular interactions and the sensitivity to binocular disparity. *Journal of Neurophysiology*, 49, 1148-1167. (b).
- Mayhew, J.E.W. & Frisby, J.P. (1978). Texture discrimination and Fourier analysis in human vision. *Nature*, 275, 438-439.
- McLeod, P., Driver, J. & Crisp, J. (1988). Visual search for a conjunction of movement and form in parallel. *Nature*, 332, 154-155.
- Mordkoff, J.T., Yantis, S. & Egeth, H.E. (1990). Detecting conjunctions of color and form in parallel. *Perception and Psychophysics*, 48, 157-168.
- Nakayama, K. & Silverman, G.M. (1986). Serial and parallel encoding of visual feature conjunctions. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 27, 182.
- Neisser, U. (1976). *Cognitive Psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Nothdurft, H.C. (1985). Orientation sensitivity and texture segmentation in patterns with different line orientation. *Vision Research*, 25, 551-560. (a).
- Nothdurft, H.C. (1985). Sensitivity for structure gradient in texture discrimination tasks. *Vision Research*, 25, 1057-1078. (b).
- Nothdurft, H.C. (1990). Texton segregation by associated differences in global and local luminance distribution. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 239, 295-320.
- Nothdurft, H. C. (1991). Different effects from spatial frequency masking in texture segregation and texton detection tasks. *Vision Research*, 31, 299-320. (a).
- Nothdurft, H.C. (1991). Texture segmentation and pop-out from orientation contrast. *Vision Research*, 31, 1073-1078. (b).

- Pashler, H. (1988). Cross-dimensional interaction and texture segregation. *Perception and Psychophysics*, 43, 307-318.
- Pérez Martínez, D. (1992). *Discriminación preatentiva de texturas visuales*. Tesis Doctoral no publicada, Facultad de Psicología, Universidad Complutense. Madrid.
- Pérez Martínez, D. (1993). Discriminación estereoscópica de texturas por diferencias en la forma de sus micropatrones. *Psicológica*, 14, 239-257.
- Pérez Martínez, D. (1994). Propiedades tridimensionales de la escena visual y discriminación preatentiva de texturas. *Psicothema*, 6.
- Pérez Martínez, D. (en prensa). Texture discrimination at the cyclopean retina. *Perception*.
- Pollack, I. (1973). Discrimination of third-order Markov constraints within visual display. *Perception and Psychophysics*, 13, 276-280.
- Purks, S.R. & Richards, W. (1977). Visual texture discrimination using random patterns. *Journal of the Optical Society of America*, 67, 765-771.
- Rentschler, I., Hübner, M. & Caelli, T.M. (1988). On the discrimination of compound Gabor signal and textures. *Vision Research*, 28, 279-291.
- Richards, W. & Polit, A. (1974). Texture Matching. *Kybernetik*, 16, 155-162.
- Sagi, D. (1988). The combination of spatial frequency and orientation is effortlessly perceived. *Perception and Psychophysics*, 43, 601-603.
- Sierra Vázquez, V. (1992). Procesamiento visual inicial: Aspectos biológicos, psicofísicos y computacionales del análisis espacial de las imágenes por el sistema visual humano. En J.L. Pinillos y J. Mayor (Eds.) *Tratado de Psicología General. III. Atención y Percepción*. Madrid: Alhambra Universidad.
- Steinman, S.B. (1987). Serial and parallel search in pattern vision. *Perception*, 16, 389-399.
- Thorell, L.G., De Valois, R. & Albrecht, D.G. (1984). Spatial mapping of monkey V1 cells with pure color and luminance stimuli. *Vision Research*, 24, 751-769.
- Treisman, A. (1982). Perceptual grouping and attention in visual search for features and for objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 194-214.
- Treisman, A. (1988). Features analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95, 15-48.
- Treisman, A. & Gelade, G. (1980). A feature integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Treisman, A. & Paterson, R. (1984). Emergent features, attention and object perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 12-31.
- Treisman, A. & Schmidt, H. (1982). Illusory conjunction in the perception for object. *Cognitive Psychology*, 14, 107-141.
- Treisman, A. & Souther, J. (1985). Search asymmetry: A diagnostic for preatentive processing of separable features. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114, 285-310.
- Treisman, A., Sykes, M. & Gelade, G. (1977). Selective attention and stimulus integration. In S. Dornic (Ed.) *Attention and Performance VI* (pp. 331-361). Hillsdale, NJ: LEA.
- Uttal, W. (1975). *An Autocorrelation Theory of Form Detection*. Hillsdale, NJ: LEA.
- Van Essen, D.C., De Yoe, E.A., Olavarria, J., Knierim, J., Fox, J., Sagi, D. & Julesz, B. (1989). Neural responses to static and moving texture patterns in visual cortex of the macaque monkey. In D.M.K. Lam & C.D. Gilbert (Eds.) *Neural Mechanisms of Visual Perception* (pp. 137-154). Woodlands, TX: Portfolio.
- Voorhees, H. (1987). *Finding Texture Boundaries in Images*. Doctoral Dissertation. AI-TR-968. Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge. MA.
- Voorhees, H. & Poggio, T. (1988). Computing texture boundaries from images. *Nature*, 333, 364-367.
- Wolfe, J.M., Cave, K.R. & Franzel, S.L. (1989). Guided search: An alternative to the modified feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 419-433.

## GLOSARIO

**Parámetros que caracterizan cualquier enrejado cosenoidal:**

—*Luminancia media*. Nivel en torno al cual sucede la variación sinusoidal. En una imagen de TV, la luminancia media corresponde a lo que se denomina *brillo*.

—*Amplitud*. Se define como la semidiferencia entre la luminancia máxima y la luminancia mínima. Un parámetro que se relaciona con la luminancia media y con la amplitud es el *contraste* del enrejado, el cual es un índice de la diferencia de intensidad luminosa entre las zonas claras y oscuras en relación con la luminancia media.

—*Frecuencia espacial*. Es el número de oscilaciones completas (ciclos) por unidad de longitud en la dirección de la modulación sinusoidal.

—*Orientación*. Es el ángulo que forma la perpendicular a las bandas con el eje X.

—*Fase*. Es la distancia al origen, medida en radianes, del primer máximo de la oscilación tomada en la dirección de la modulación sinusoidal. Se supone que la función coseno tiene fase cero y que la función seno, que es la función coseno desplazada a la derecha  $\pi/2$  radianes, tiene una fase igual a  $-\pi/2$  radianes.

**Análisis de Fourier.** Según el *teorema de Fourier*, cualquier función de  $R^2$  en  $R$  con energía finita, que es el caso de cualquier imagen, puede sintetizarse sumando infinitos enrejados cosenoidales de diferentes frecuencias espaciales, amplitud y fase. El *análisis de Fourier* de una imagen tiene como objetivo determinar las frecuencias espaciales, amplitudes y fases que tienen los enrejados cosenoidales de dicha imagen.

**Espectro de Fourier.** Función bidimensional que expresa el resultado del análisis de Fourier. Esta función hace corresponder a cada par de frecuencias espaciales la amplitud y fase del enrejado cosenoidal correspondiente que compone la imagen.

**Espectro de amplitud.** El espectro de amplitud de una función indica qué frecuencias espaciales están presentes en esa señal y en qué proporción relativa, es decir, cuál es la amplitud de cada una de ellas.

**Espectro de fase.** El espectro de fase de una función indica la posición relativa de los enrejados cosenoidales que componen la imagen.

**Estadísticos de orden  $n$ .** Los estadísticos de primer orden hacen referencia a la luminancia de la imagen, y es la probabilidad de que un punto dado de la textura tenga una cierta luminancia. Los estadísticos de segundo orden o dipolos se refieren a la granularidad y es la probabilidad conjunta de que los dos vértices de un dipolo de longitud  $r$  tengan la misma luminancia. Los estadísticos de orden  $n$  de una imagen se refieren a la probabilidad conjunta de que los  $n$  vértices tengan una cierta luminancia (Julesz, 1962).

**Esbozo primitivo en bruto.** Según David Marr, es la descripción obtenida por el SVH en el procesamiento temprano de la información visual. Contiene información sobre los cambios de los niveles de gris presentes en una imagen, así como de la distribución geométrica y organización de esos cambios.

