

JUSTIFICACIÓ DEL LLIBRE

Amb aquest llibre d'òptica fisiològica hem pretés accomplir dos objectius, per una banda cobrir el buit existent en la llengua catalana en llibres d'aquesta matèria i per una altra millorar i ampliar la versió del llibre en castellà que fins ara estava publicat. El primer objectiu clarament es veu satisfet, ja que el llibre ha estat revisat profundament al llarg de sis anys en l'aspecte lingüístic amb la publicació d'apunts i material didàctic en valencià i utilitzant un llenguatge rigorós i al mateix temps adient per a l'estudiant. El segon objectiu es veu complit després de sis anys de revisió dels textos docents emprats. Aquestes revisions han consistit en l'adequació de la nomenclatura utilitzada, la millora i ampliació de les figures i gràfics existents, correcció d'errors, ampliació i revisió de les qüestions i problemes, aparició de noves explicacions dels conceptes amb un enfocament més didàctic i dirigit a la pràctica clínica i per últim s'ha efectuat una profunda revisió d'alguns temes, l'enfocament didàctic i els conceptes dels quals no estaven clars en els llibres existents sobre la matèria.

En definitiva, amb aquest llibre hem pogut plasmar totes les millores que hem afegit a llarg d'aquest anys i que els mateixos alumnes de la titulació han validat a través de les enquestes efectuades i sobretot amb la millora de les qualificacions obtingudes. Tots aquest fets esperem que faran d'aquest un llibre de referència en l'ensenyament de l'òptica fisiològica.

PRÒLEG

Les matèries de l'òptica visual ens ajuden a comprendre el funcionament del sistema visual a partir de models teòrics basats en l'òptica geomètrica. En aquests es considera l'ull com un sistema òptic formador d'imatges, compost per dues superfícies diòptriques (còrnia i cristal·lí) amb diferents índexs de refracció i gruix, sent la retina el plànol final on es forma la imatge que posteriorment serà processada pel sistema visual. Aquest model ens permet, aleshores, estudiar la mesura de l'agudesia visual, els canvis que es produeixen en l'ull en acomodar o les ametropies i la seua compensació òptica.

El llibre tracta tots aquests aspectes de la visió de forma didàctica, és a dir, adaptant els continguts per als alumnes que s'inicien en l'estudi d'aquesta matèria. Aquest és, fins al moment, l'únic llibre en valencià i, en ell s'emptra en la major part dels temes una nomenclatura pròpia en la qual s'ha intentat facilitar a l'estudiant l'assimilació de les equacions, evitant la confusió d'alguns paràmetres que en altres textos apareixen amb nomenclatures similars.

A partir de la nostra experiència docent, hem desenvolupat els diferents apartats dels temes continguts, en el llibre, incidint de manera més precisa en aquells punts que solen presentar més dificultat per als estudiants. Per a això, hem introduït explicacions detallades amb els desenvolupaments complets en la majoria de les equacions utilitzades, amb l'objectiu que es puga comprendre la base matemàtica d'aquestes expressions. El raonament dels diferents aspectes de la visió tractats, així com la relació entre ells, és el que finalment portarà a la correcta assimilació d'aquesta matèria.

Un altre objectiu plantejat amb aquest llibre és aportar una base a l'estudiant amb què podrà endinsar-se en l'aprenentatge d'altres matèries que estudien la visió des d'un punt de vista clínic. Per això, en alguns apartats s'han establert relacions entre els conceptes tractats i la seua aplicació en la pràctica clínic. Els problemes proposats en cada tema s'han enfocat tenint en compte aquest aspecte.

Com a autors d'aquest llibre hem volgut aportar la nostra experiència docent en realitzar aquesta obra, intentat transmetre en aquestes pàgines una base sòlida a les diferents matèries de l'òptica visual així com de l'optometria. Amb això esperem que l'estudiant comence a adquirir la capacitat de raonar sobre el funcionament del nostre sistema visual despertant-se així el seu interès per l'estudi de les ciències de la visió.

Els autors

INTRODUCCIÓ

1. EL SISTEMA VISUAL I EL PROCÉS VISUAL

El sistema visual humà està constituït per un conjunt d'estructures biològiques que serveixen com a suport per a realitzar una sèrie d'operacions. El sistema és anàleg a una càmera digital de vigilància connectada a un ordinador. Així, pot entendre's com un sistema que rep una entrada –la llum procedent del medi extern– i genera una eixida d'informació (la percepció visual). No obstant això, hi ha un processament intermedi, de manera que la percepció visual no és més que una interpretació del medi exterior i no recull la totalitat de la informació rebuda.

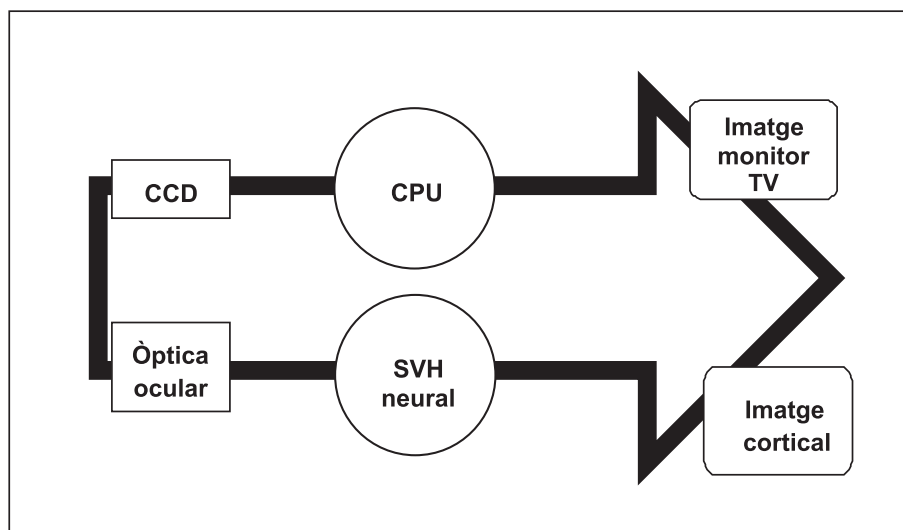


Figura 1: Analogia entre un sistema de videovigilància CCD i el sistema visual.

En el sistema de l'ordinador hi ha una càmera digital que capta intensitats de llum, una unitat de processament central (CPU) i un monitor de televisió. Aquest és el suport físic, l'anomenat *maquinari*, que permet mostrar una imatge en la pantalla gràcies a una sèrie de programes informàtics o programari. De la mateixa manera, en el sistema visual hi ha una estructura òptica ocular, una "unitat de processament" i una imatge final. Evidentment, el sistema visual també realitza una sèrie d'operacions internes que constitueixen el "programari" del procés visual. Així, és possible establir una analogia entre aquests dos sistemes: el maquinari equival al sistema visual, mentre que el programari correspondria al processament visual.

Percebre una escena és el resultat final d'un procés que es denominem *visió*. Aquest procés resulta complex i s'hi poden distingir diverses fases o etapes. En una primera fase (fase òptica), la llum provinent de l'escena és focalitzada per la còrnia i el cristal·lí i forma una imatge sobre la retina. A continuació es produeix una fase fotoquímica, de manera que els fotoreceptors de la retina converteixen la llum recollida en una sèrie de respostes elèctriques que es combinen entre si al llarg del camí visual fins a obtenir una interpretació en l'última fase. En cada etapa es perd una part de la informació, fet que permet millorar la velocitat de processament en canvi de perdre precisió.

2. VIES D'ESTUDI DEL SISTEMA VISUAL HUMÀ: ANATÒMICA, NEUROFISIOLÒGICA I PSICOFÍSICA

Quan s'estudia el procés visual s'intenta establir la relació que hi ha entre estímul i resposta, en què l'estímul representa la distribució de llum en l'escena (intensitat, cromaticitat...) i la resposta la percepció visual. Aquesta relació entre una variable física (la llum) i la corresponent variable sensorial (la percepció), a pesar de ser un fet evident, no sempre resulta senzilla d'establir. Generalment la major o menor intensitat en la percepció d'un estímul depèn de les condicions de contorn, és a dir, de les condicions en què té lloc l'acte perceptiu. Per exemple, el so dels nostres passos ens resulta generalment imperceptible; no obstant això, de nit en un carrer desert percebem perfectament aquest so. Un mateix estímul físic produeix sensacions de diferent nivell. La relació entre la magnitud de l'estímul i la corresponent sensació resulta variable.

L'estudi del sistema visual es pot tractar per tres vies distintes, que corresponen a tres disciplines conegudes com anatomia, neurofisiologia i psicofísica.

En *anatomia*, a partir de talls histològics al llarg del camí visual, s'estudia la caracterització del suport físic pel qual viatja la informació. L'anatomia permet conèixer, de manera directa, l'estructura del sistema. L'anatomia desvela l'estructura d'un òrgan, però aporta poc al coneixement del seu funcionament.

La *neurofisiologia* és una disciplina biològica que estudia directament el funcionament de les diferents cèl·lules implicades en la visió. Els mètodes

neurofisiològics poden ser intrusius o no intrusius. Els intrusius són aquells en què es destrueixen teixits biològics i molt sovint implica el sacrifici d'un animal. Entre aquests mètodes cal citar les tècniques d'electrofisiologia, amb aplicació directa d'un microelèctrode a una cèl·lula –operació que necessàriament comporta la trepanació del crani de l'animal– o el marcatge radioactiu, tècnica que consisteix a injectar en la sang una molècula marcada amb un àtom radioactiu per a, posteriorment, detectar en quina zona del còrtex visual s'acumula. Entre els mètodes no intrusius destaquen els mètodes d'escanejat, com la tomografia per emissió de positrons (TEP), tècnica utilitzada per a determinar quines àrees de l'escorça visual responen davant d'un estímul determinat. En aquesta tècnica es registra l'augment de flux sanguini en d'una determinada zona del còrtex cerebral com a resultat de l'exposició de l'individu davant d'una determinada escena. Per exemple, davant d'una escena en què predomina el color es produeix un augment d'activitat en determinades àrees del sistema visual, fenomen que no ocorre per a una escena en blanc i negre.

L'altra manera d'estudiar el sistema visual és mitjançant la *psicofísica*. Definim la psicofísica com l'estudi de la relació entre la magnitud física de l'estímul i la intensitat de les sensacions subjectives que suscita. En la psicofísica s'utilitzen sempre tècniques indirectes. Es planteja un experiment de manera que davant d'un determinat estímul s'obté una resposta. El sistema visual s'estudia com si fóra una caixa negra: sabem el que hi entra i sabem el que n'ix, i a partir d'aquesta entrada i aquesta eixida s'interpreta què ha ocorregut i s'elabora un model de funcionament. Posteriorment, aquest model teòric podrà ser corroborat o rebutat mitjançant nous experiments psicofísics.

El terme *psicofísica* va ser proposat per Fechner en el seu lliure *Elemente der Psychophysik* (1850) que diu així: “Per psicofísica entenc una teoria exacta de la relació entre cos i ment”. Així Fechner intenta quantificar la relació entre l'increment d'un estímul (variable física) i l'increment de la sensació (variable no física). La idea bàsica es redueix a definir la sensibilitat de qualsevol detector sensorial en unitats físiques (per exemple: so, llum, força...).

3. L'ULL HUMÀ I ALTRES ESTRUCTURES DEL SISTEMA VISUAL

L'ull humà com a instrument òptic és molt compacte (24 mm), té un enorme camp visual (seixanta graus en direcció nasal, cent en direcció temporal, setanta-cinc cap avall i seixanta cap amunt), opera dins d'un rang molt gran de luminància (des de 10^{-6} cd/m² fins a 10^8 cd/m²) i té una resolució propera al seu límit teòric. Paradoxalment, l'ull presenta unes aberracions òptiques i uns errors de centrament que en un sistema òptic convencional es considerarien inacceptables.

L'ull humà és un òrgan format per diverses estructures, tal com s'aprecia en la figura 2.

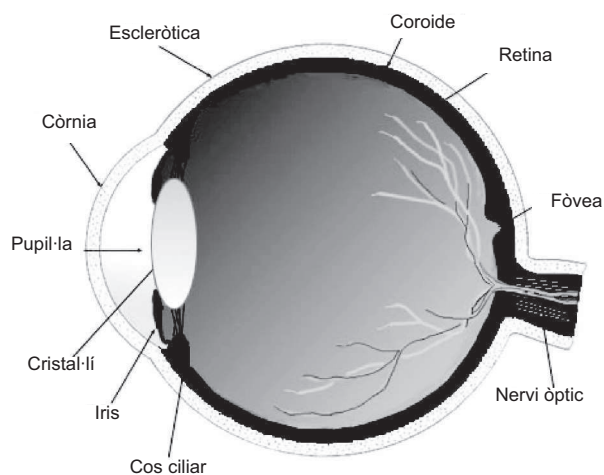


Figura 2: L'ull humà.

En el seu camí fins a la retina la llum ha de travessar diversos medis: la còrnia, la cambra anterior, el cristal·lí i el cos vitri. La primera d'aquestes estructures, la còrnia, té forma de lent menisc amb un diàmetre d'uns dotze mil·límetres, és molt transparent i a pesar de la seua resistència és molt prima, amb un gruix de mig mil·límetre. La seua potència òptica és aproximadament de 43 diòptries, és a dir, dues terceres parts del total de l'ull. A continuació se situa la cambra anterior, cavitat que conté un líquid anomenat *humor aquós*; aquest líquid també és molt transparent a causa del seu alt contingut en aigua. Té un gruix d'uns tres a quatre mil·límetres. Té importància en l'acoblament del sistema total de l'ull.

Al final de la cambra anterior es troba l'iris, que és el diafragma d'obertura de l'ull i, per tant, determina les pupil·les d'eixida i entrada. Es tracta d'un diafragma de diàmetre variable que permet regular la quantitat de llum que arriba a la retina. A més juga un important paper en l'enfocament de la imatge.

Per darrere de l'iris es troba el cristal·lí, una lent de potència variable que permet focalitzar a diferents distàncies per variació dels seus radis de curvatura, mecanisme que es coneix com a *acomodació*. Està disposat en capes a manera de ceba (això fa que tinga una potència molt més gran a causa de les diferències d'índex) amb un diàmetre d'uns 9-10 mil·límetres i un gruix sense acomodar de 4 mil·límetres. La potència sense acomodar és d'unes 20 D.

A continuació es troba el cos vitri, ple d'una massa gelatinosa transparent i incolora amb un índex de refracció semblant al de l'humor aquós.

Finalment, en el pol posterior de l'ull es troba la retina. Es tracta de la superfície on s'arplega la imatge que serà processada pel sistema visual. En

la retina es troben els fotoreceptors, cons i bastons, encarregats de captar la llum. En la figura 3 es representa esquemàticament el mapa retinià:

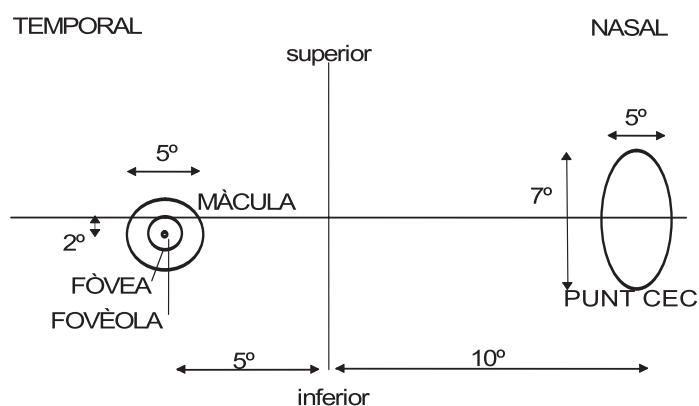


Figura 3: Mapa del fons de la retina.

La retina no és pròpiament un teixit ocular, sinó que es tracta en realitat de teixit nerviós, és per tant una extensió cerebral i, atès que l'ull es mou, es diu que "constitueix una porció mòbil del cervell". La retina és la capa sensible de l'ull, equivalent a la pel·lícula fotogràfica. Des del fons de la retina sorgeix l'anomenat nervi òptic, el qual constitueix la via de comunicació de la retina amb el còrtex visual.

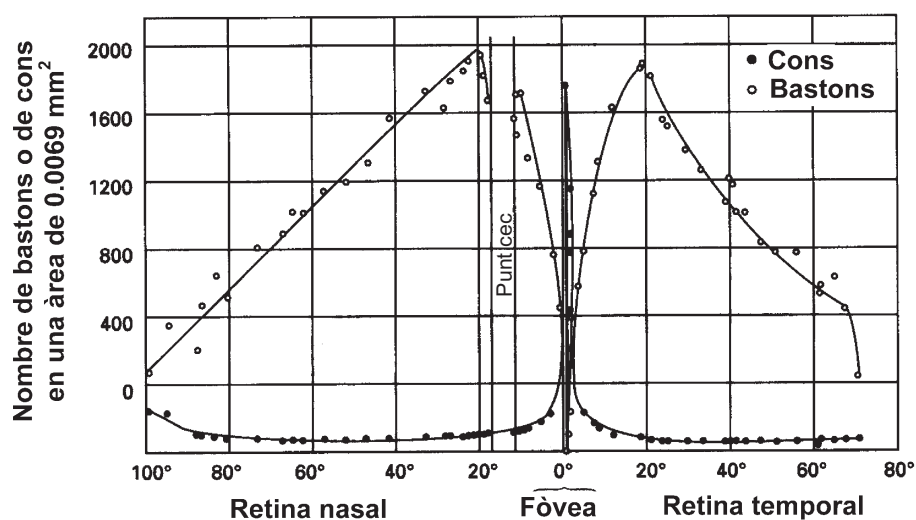


Figura 4: Taxa de fotoreceptors en funció de l'excentricitat.

a) La retina

La retina està formada per una sèrie de capes superposades, en les quals es pot distingir gran varietat de tipus cel·lulars:

- L'epiteli pigmentari
- La capa de fotoreceptors
- La capa de cèl·lules bipolars
- La capa de cèl·lules ganglionars
- La capa de cèl·lules horitzontals
- La capa de cèl·lules amacrines

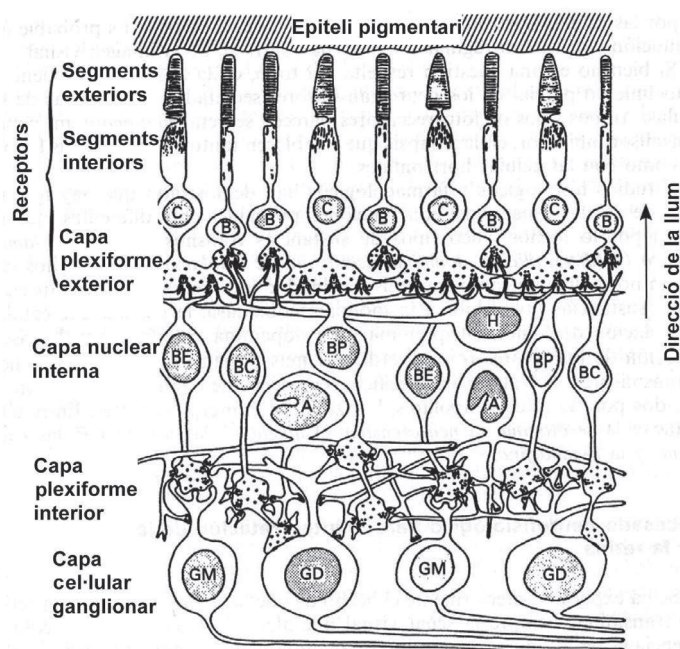


Figura 5: Esquema de l'estructura retiniana.

La capa de fotoreceptors és un mosaic format per dos tipus de cèl·lules o fotoreceptors: els cons i els bastons. Els uns i els altres no es distribueixen uniformement al llarg de la retina, i es poden diferenciar diverses regions en el fons retinià. En la perifèria abunden els bastons, mentre que la densitat de cons és molt baixa (4.000 o 5.000 cons/mm²). Per contra, en la zona central de la retina es troba una regió anomenada *fòvea*, on hi ha la màxima densitat de cons (150.000 cons/mm²). La fòvea se situa just en el centre de la anomenada *màcula lútea*, zona central de la retina caracteritzada per la presència d'un