

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e
Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Ottica e Optometria

Visione a colori e discromatopsie

Relatori:

Prof. Michele Gagliardi

Candidato:

Emanuele Longallo
Matricola M44/540

A.A. 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE.....	pag. 5
CAPITOLO 1: LA VISIONE DEI COLORI.....	pag. 7
1.1 Sistema ottico dell'occhio.....	pag. 7
1.2 Natura fisica: la luce.....	pag. 8
1.2.1: Lo spettro elettromagnetico.....	pag. 8
1.3 Natura chimica: dalla retina al cervello.....	pag. 9
1.4 Visione cromatica: teoria del colore.....	pag. 14
1.4.1: Discriminazione del colore.....	pag. 15
CAPITOLO 2: DEFICIT DELLA VISIONE CROMATICA.....	pag. 19
2.1 Deficit congeniti della visione dei colori.....	pag. 19
2.2 Deficit acquisiti della visione dei colori.....	pag. 21
2.3 I test diagnostici.....	pag. 22
2.3.1: Tavole pseudoisocromatiche.....	pag. 22
2.3.2: Test di Farnsworth.....	pag. 23
2.3.3: Test HRR.....	pag. 24
2.3.4: Anomaloscopia di Nagel.....	pag. 25
CAPITOLO 3: LO STUDIO.....	pag. 26
3.1 Lo scopo.....	pag. 26
3.2 Soggetti e metodo d'indagine.....	pag. 26
3.3 Risultati.....	pag. 27
CONCLUSIONE.....	pag. 32
BIBLIOGRAFIA.....	pag. 33
SITOGRAFIA.....	pag. 34
RINGRAZIAMENTI.....	pag. 35

INTRODUZIONE

L'argomento trattato riguarda la visione cromatica e le alterazioni legate alla percezione dei colori, è un tema di rilevanza, in quanto i colori sono fondamentali per l'interpretazione dello spazio che ci circonda e giocano un ruolo fondamentale nella nostra quotidianità. Non sembra, ma i colori esercitano una grossa influenza nella nostra vita da un punto di vista emozionale, psicologico, di scelte, e culturale. I colori possono stimolare la nostra mente suscitando stati d'animo ben precisi riconducendoci a situazioni passate. Ad esempio, il rosso rappresenta l'amore, la passione ed è un colore che attira molto la nostra attenzione; per questo motivo è molto utile anche nella vita di tutti i giorni, e viene utilizzato per rappresentare situazioni di pericolo. Quindi, come avviene il meccanismo di visione? La visione, ossia la capacità di percepire gli stimoli luminosi, dipende da vari fattori fisici e chimici. Quando la luce colpisce un oggetto, le radiazioni elettromagnetiche che la compongono vengono in parte riflesse ed in parte assorbite dall'oggetto stesso. La parte di luce, e più nello specifico le lunghezze d'onda che sono riflesse dall'oggetto, sono quelle che giungono ai nostri occhi e che vengono recepite e interpretate come colore. Le lunghezze d'onda che vengono assorbite dall'oggetto sono quelle che determinano il colore della materia e dipendono dalla sua natura chimica. Se la luce è totalmente assorbita, allora l'oggetto ci apparirà nero; al contrario, se è totalmente riflessa ci apparirà bianco. La visione a colori è quindi un'interpretazione soggettiva di uno stimolo oggettivo, questo perché la percezione del colore dipende dal sistema occhio-cervello che è influenzato da limitazioni fisiologiche e psicologiche. Il tutto avviene quando la luce attraversa i mezzi diottrici dell'occhio e giunge sulla retina, dove gli stimoli visivi sono convertiti in impulsi elettrici dai fotorecettori, ossia le cellule della retina. I fotorecettori si dividono in tre classi di coni e una di bastoncelli, responsabili rispettivamente della visione diurna e notturna. I fotorecettori però, possono presentare dei deficit e non essere sempre funzionanti al 100%, o in altri casi, possono essere completamente assenti; tali alterazioni vengono definite discromatopsie e si classificano a seconda della gravità e del tipo o dai tipi di coni colpiti; inoltre, si suddividono in due classi: congenite e acquisite. La manifestazione di questi deficit comporta delle limitazioni per quanto riguarda la visione dei colori.

CAPITOLO 1

LA VISIONE DEI COLORI

1.1 Sistema ottico dell'occhio

L'occhio umano è un organo dalla forma sferoidale, il quale si serve di un sistema ottico per creare un'immagine sul piano retinico (Fig.1.1). Tale sistema è caratterizzato da varie componenti: film lacrimale, cornea, umor acqueo, cristallino e umor vitreo. Ognuna delle quali ha compiti ben precisi:

- **Film Lacrimale:** Le lacrime sono prodotte dalle varie ghiandole lacrimali estendendosi sulla congiuntiva bulbare e sulla cornea sotto forma di uno strato molto sottile ($10\ \mu$) che prende il nome di film lacrimale. Si suddivide in tre strati: Mucoso (interno), acquoso (intermedio), lipidico (esterno).
- **Cornea:** È una membrana trasparente che ricopre la parte anteriore del globo, a contatto con l'ambiente esterno. Della superficie anteriore della cornea è utilizzata solo una parte centrale di circa 4mm, definita *zona ottica*, in cui la cornea ha un potere di circa 49D. La superficie posteriore della cornea, invece, ha un potere negativo di circa 6D, pertanto, il potere totale della cornea arriva ad essere di circa 43D.
- **Umor acqueo:** È un liquido trasparente, incolore, che occupa la camera anteriore e posteriore dell'occhio e ha una funzione statica e una funzione nutritiva, infatti nutre gli elementi che bagna, come cristallino e cornea.
- **Cristallino:** È una lente biconvessa, trasparente, dello spessore di circa 3,6 mm. La sua funzione è quella di far convergere la luce proveniente dall'ambiente esterno direttamente sui fotorecettori della retina, ed ottenere una visione nitida. Questo accade perché il cristallino, legato ai muscoli ciliari, è capace di modificare la sua curvatura passando da uno stato di rilassamento a uno di contrazione, relativamente al fatto che l'oggetto osservato sia a grandi o piccole distanze.
- **Umor vitreo:** È una massa gelatinosa, trasparente, che riempie la cavità vitrea, la più grande delle cavità. Essa è a contatto con la retina. La sua funzione è principalmente meccanica, mantiene la retina aderente all'epitelio pigmentato e limita i movimenti del cristallino.

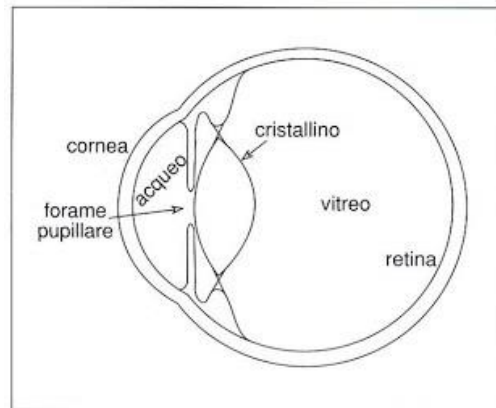


Fig.1.1: Sistema ottico dell'occhio.

Il complesso corneale equivale ad un *sistema positivo* di circa 60D (diottrie), destinato a mettere a fuoco sulla retina la luce proveniente dagli oggetti esterni. Sono in grado di creare sul piano retinico un'immagine reale, capovolta e rimpicciolita dell'oggetto osservato. La luce proveniente dall'estremità superiore dell'oggetto si forma sulla parte inferiore della retina, e la parte inferiore dell'oggetto sulla porzione superiore della retina. Il potere del sistema ottico può aumentare per via dell'accomodazione per permettere la messa fuoco di oggetti vicini; se il sistema non è in grado di formare una stimolazione dell'oggetto sul piano retinico allora la condizione è definita di ametropia e il soggetto viene definito ametrope. Le ametropie sono causa di visione ridotta e imperfetta. Altre anomalie come l'opacità dei mezzi ottici o la difficoltà nella conduzione dei segnali dalla retina al cervello possono danneggiare la retina.

NATURA FISICA: la luce

La luce rappresenta l'elemento naturale che permette di vedere, di percepire e di distinguere le forme. Il dibattito sulla natura della luce scosse il mondo della fisica per lunghi periodi: Isaac Newton (1643-1727) propose un modello che materializzava la luce in piccoli corpuscoli che si propagavano in linea retta (teoria corpuscolare); Christiaan Huygens (1629-1695) propose di trattare la luce come un'onda (teoria ondulatoria). In seguito, James Clerk Maxwell (1831-1879) si convinse del fatto che la luce era un'onda di natura elettromagnetica, di tipo trasversale, ossia con oscillazioni perpendicolari alla direzione di propagazione. La luce, dunque, è un fenomeno ondulatorio, di natura elettromagnetica, attraverso la quale l'energia elettromagnetica può trasferirsi da luogo a luogo per propagazione, ed è composta da un campo elettrico e da un campo magnetico oscillante (variabili nel tempo) che si propagano nel vuoto ad una velocità di $3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tale velocità la indichiamo con c e viene definita "velocità della luce". Quando si parla di luce, in realtà, ci si riferisce alla luce visibile, ossia una piccola porzione dello spettro della radiazione elettromagnetica. Tale radiazione è un fenomeno ondulatorio, dovuto a delle perturbazioni periodiche di un campo elettrico $\mathbf{E}$ ed un campo magnetico $\mathbf{B}$, oscillanti in piani tra loro ortogonali.

1.2.1 Spettro elettromagnetico

È l'insieme delle radiazioni elettromagnetiche e comprende l'intera gamma delle lunghezze d'onda presenti in natura (Fig.1.2). Le radiazioni, essendo onde, sono caratterizzate da una *lunghezza d'onda* λ (lambda) che è la distanza percorsa dall'onda durante un tempo di oscillazione e corrisponde alla distanza tra due massimi o due

minimi dell'onda, e da una *frequenza* f (effe) che rappresenta le oscillazioni effettuate dall'onda in un secondo (unità di tempo). La frequenza si misura in Hertz (Hz); poiché queste sono inversamente proporzionali tra loro, minore sarà la lunghezza d'onda, maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia trasportata dall'onda. L'energia associata alla radiazione elettromagnetica è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda stessa.

La frequenza e la lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica sono legate dalla relazione $f \cdot \lambda = v$. Dove v rappresenta la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica che nel vuoto è uguale alla velocità della luce c . Da questa formula è possibile ricavare più di una relazione: $\lambda = v/f$, $f = v/\lambda$.

Lo spettro si suddivide in: onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X e raggi γ . Lo spettro delle onde elettromagnetiche che formano la luce visibile rappresenta l'insieme delle lunghezze d'onda cui l'occhio umano è sensibile e che sono alla base della percezione dei colori; corrispondono a lunghezze d'onda comprese tra 400 e 760 nm (nanometri) e questa porzione di radiazioni elettromagnetiche può essere rilevata dai fotorecettori retinici e rappresenta lo stimolo adeguato all'occhio umano. Vi sono delle differenze individuali che possono far variare l'ampiezza dello spettro visibile dai 380 ai 780 nm. La radiazione elettromagnetica è usata nella scienza dei materiali per vari motivi: per individuare la presenza di determinati elementi chimici in una struttura, il grado di cristallinità o anche per individuare la presenza di difetti. L'insieme di queste tecniche d'indagine tramite radiazione prende il nome di spettroscopia.

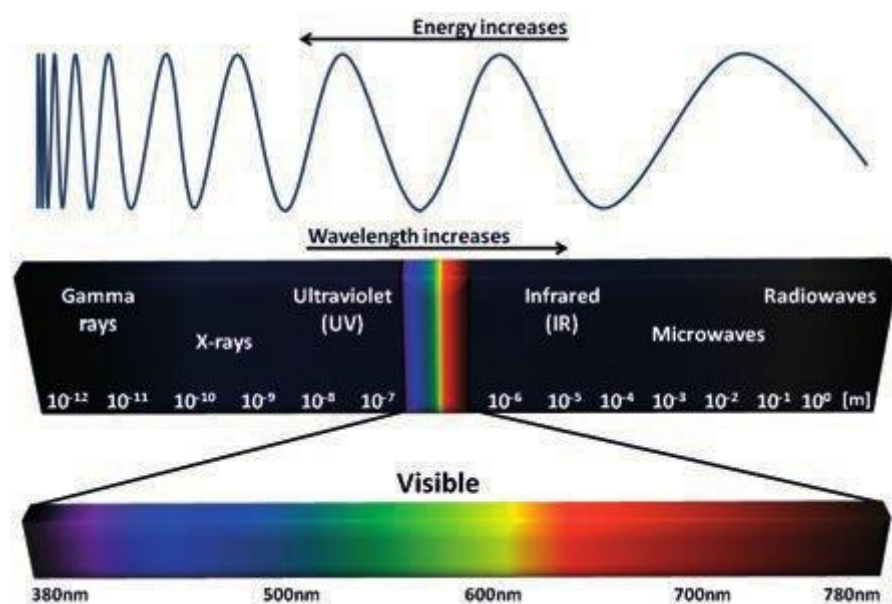


Fig.1.2: Spettro elettromagnetico.

“Il sistema visivo è l’insieme delle strutture coinvolte nella *conversione della luce nella sensazione e nelle percezioni della visione*.” ¹ (Mecacci et al. 1986). Esso ha un processo molto simile a quello di una macchina fotografica, perché è atto a far convergere la luce su di uno schermo sensibile, ossia la retina. La visione è necessaria per raccogliere informazioni alle varie distanze e fornire così gli spunti per la creazione di una “simulazione mentale” dello spazio visivo che ci permette di agire in riferimento a uno spazio tridimensionale. Quasi tutte le specie animali hanno sviluppato simili sistemi per utilizzare la luce visibile nel corso dell’evoluzione. L’essere umano usa costantemente gli occhi per valutare l’ambiente circostante, d'altronde, vedere è un processo importante, fondamentale per l’uomo e per la maggior parte della specie animale. Quando si parla di visione, ci si riferisce al “sistema” composto da occhio e cervello; è questo “sistema” che guida un ampio spettro di capacità umane, come camminare lungo le strade, salire e scendere dai marciapiedi, muoversi intorno a cose e persone, monitorando visivamente la propria posizione.

NATURA CHIMICA: dalla retina al cervello

Il fatto che la visione sembra così semplice smentisce la complessità del processo visivo. Il processo di visione avviene solo grazie ad uno scambio d'informazioni tra l'ambiente esterno e il nostro sistema visivo; grazie a queste informazioni, i fotorecettori, coni e bastoncelli, assorbono i fotoni (quantità di luce visibile) e generano segnali elettrici che permettono di codificare l'immagine ottica in immagine neurale. “Si può avere un’idea di tale complessità se si guarda, da una parte, al milione di fibre che compongono il nervo ottico rispetto alle circa trecentomila fibre presenti nel nervo acustico, dall'altra al fatto che più di metà della neocorteccia ha a che fare con l’elaborazione dell’informazione visiva.” ² (Kandel e Schwartz, 1988). Il meccanismo che porta alla visione si fonda su funzioni complesse che coinvolgono diversi livelli sensoriali ed inizia a livello retinico. Quando la luce giunge sulla retina, provoca una serie di reazioni chimiche, producendo un eccesso di carica elettrica; il tutto, si traduce in un segnale trasmesso al cervello attraverso il nervo ottico. In questo modo avviene il fenomeno della visione. La retina assume un ruolo fondamentale nel processo visivo e pertanto un suo danneggiamento può recare disturbi al sistema. Condizioni come l’opacità corneale, il glaucoma e il distacco della retina, in cui quest’ultima è disgiunta in modo anomalo dalla sua posizione abituale, possono impedire alla retina di ricevere la luce. Tali deterioramenti impediscono al cervello di ricevere e di elaborare informazioni, portando nei casi più gravi, anche alla cecità.

¹ Rossetti Anto, Gheller Pietro, “*Manuale di Optometria e contattologia*.” Zanichelli, pag.2.

² Zeri F., Rossetti A., Fossetti A., Calossi A., “*Ottica Visuale*.” SEU, pag.1.

La retina è una membrana sensoriale che riveste la superficie interna della parte posteriore del bulbo oculare, estendendosi dal nervo ottico al margine pupillare dell'iride. Essa si presenta come una struttura sottile, trasparente e leggermente rosea perché vascolarizzata; è formata da una serie di strati sovrapposti, ognuno con delle funzioni specifiche (Fig.1.3).

Strutturalmente la retina è suddivisa in dieci strati:

1. Epitelio pigmentato retinico (EPR): lo strato pigmentato va ad assorbire la luce dopo che questa ha attraversato la retina e fornisce supporto metabolico e funzionale al segmento esterno dei fotorecettori.
2. Strato dei fotorecettori (coni e bastoncelli): cellule nervose altamente specializzate, a contatto con l'epitelio pigmentato retinico e deputate alla trasformazione dello stimolo luminoso in stimolo elettrico.
3. Membrana limitante esterna: strato sottile, che separa i segmenti esterni dei recettori da quelli interni.
4. Strato nucleare esterno (ONL): formato dai corpi cellulari dei fotorecettori.
5. Strato plessiforme esterno: formato dalle sinapsi tra i fotorecettori, le cellule bipolari e le cellule orizzontali.
6. Strato nucleare interno (INL): contiene i corpi cellulari delle cellule bipolari, orizzontali, di Muller e amacrine.
7. Strato plessiforme interno: formato dalle sinapsi tra le cellule bipolari, amacrine e gangliari.
8. Strato delle cellule gangliari (CGL): è costituito dal corpo delle cellule gangliari e dal corpo delle cellule amacrine.
9. Strato delle fibre nervose (NFL): contiene gli assoni delle cellule gangliari e si presenta come uno strato sottile di fibre che s'ispessisce verso la papilla per formare il nervo ottico.
10. Membrana limitante interna (MLI): rappresenta lo strato più interno della retina ed è formata dalle terminazioni delle cellule di Muller; inoltre, delimita il confine tra la retina e l'umor vitreo. Nella porzione posteriore della retina ha uno spessore di circa 0,5-2µm che tende ad aumentare con gli anni.

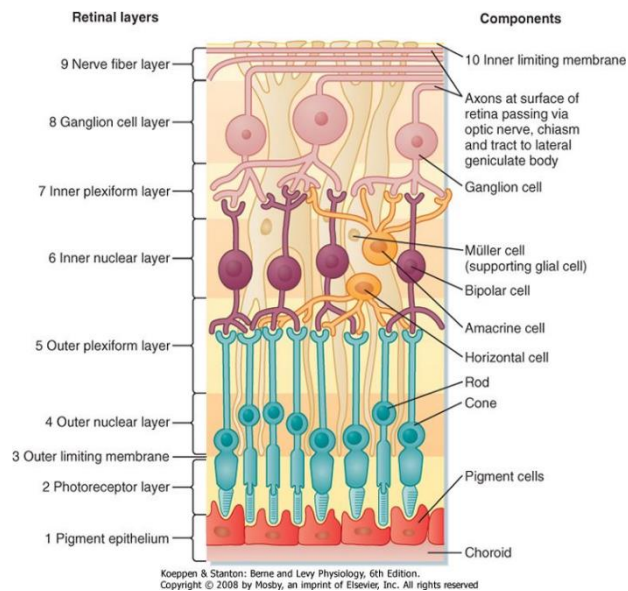


Fig.1.3: Struttura della retina.

La retina contiene due tipi di fotorecettori: coni e bastoncelli (Fig.1.4). I coni sono deputati alla visione fotopica e la loro presenza è predominante nella *fovea*, ossia la porzione centrale della retina in cui l'acuità visiva è massima. I bastoncelli si concentrano nella zona periferica della retina e sono deputati alla visione scotopica. Gli esseri umani sono creature diurne. Tendono ad essere più attivi durante il giorno o ricreano questi alti livelli di luce con sorgenti artificiali quando sono attivi di notte; quindi, la maggior parte dell'esperienza visiva umana è mediata dai coni. “Questa dominanza dei coni si verifica nonostante un importante ‘pregiudizio’ anatomico: la retina umana è 95% bastoncelli e solo 5% coni.”³ (Curcio, et al.,1987,1990). Entrambi i fotorecettori sono costituiti: da un *segmento esterno*, filamento contenente decine di dischi membranosi su cui sono presenti le molecole fotorecetrici e quelle che partecipano ai primi eventi molecolari della visione, e da un *segmento interno*, in cui si trovano il nucleo e vari elementi cellulari.

I coni, circa sei milioni, sono responsabili della visione diurna. Grazie a loro, il mondo appare colorato e ben messo a fuoco permettendo di rilevare differenze cromatiche; sono di tre tipi ed ognuno di essi contiene un pigmento che li rende sensibili a tre lunghezze d'onda differenti nello spettro della luce visibile, una nel rosso (565nm), una nel verde (535nm) ed una nel blu (440nm). I bastoncelli sono circa centoventi milioni, responsabili della visione notturna che non permette di differenziare la cromaticità, e possiedono un solo fotopigmento. “Queste cellule sono rispettivamente in rapporto di 1:20.”⁴ (Lamb et al.,

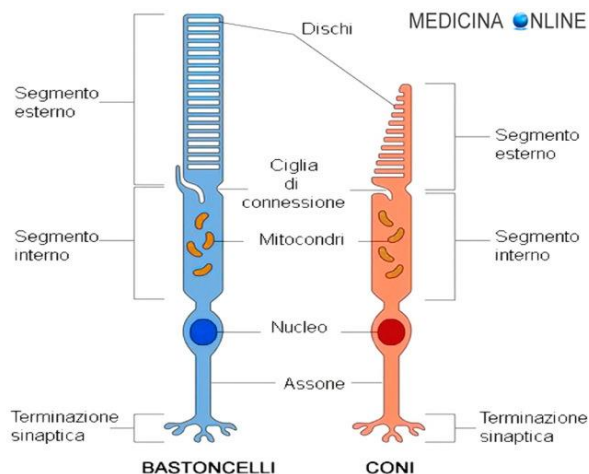


Fig.1.4: Fotorecettori della retina.

2006). Quando la radiazione elettromagnetica arriva sulla retina, ognuno di questi tre coni invia un segnale al cervello. Il pigmento fotosensibile, attivo nella ricezione della luce di diverse lunghezze d'onda è presente solo nei bastoncelli, ed è la rodopsina, una proteina coniugata costituita da una parte proteica, l'opsina, e da un gruppo prostetico, l'11-cis-retinale, che deriva dalla vitamina A. La luce assorbita provoca una serie di reazioni chimiche che modifica la struttura delle due proteine. Il risultato finale è la chiusura dei canali normalmente usati dagli ioni sodio Na^+ e gli ioni calcio Ca^{2+} per entrare all'interno dei coni o dei bastoncelli, con un conseguente accumulo di ioni all'esterno del recettore ed una produzione in eccesso di carica elettrica; il tutto, si traduce in un segnale trasmesso al cervello attraverso il nervo ottico.

³ Tootell Roger B.H., Nouchine Hadjikhani, “*Projection of Rods and Cones Within Human Visual Cortex*”, Wiley-Liss, Inc., pag.55

⁴ Nicola Pescosolido, “*L'invecchiamento dell'apparato della visione*”, Fabiano, pag.5.

La moltitudine d'informazioni sensoriali provenienti dal mondo esterno viene ricevuta da diversi organi di senso e deve essere elaborata dal cervello per produrre la percezione della luce e del colore (Fig.1.5). La luce stimola i recettori, essi a loro volta inviano informazioni alle cellule gangliari.

Le cellule gangliari possono essere distinte in:

1. Cellule Parvo o piccole: forniscono dettagli su forme e colore di un oggetto; i campi recettivi di queste cellule, sono piccoli.
2. Cellule Magno o grandi: rispondono bene a stimoli di grosse dimensioni e forniscono informazioni su luminanza e movimento degli oggetti; inoltre, hanno campi recettivi più ampi.

Il campo recettivo è quell'area della retina che se viene stimolata dalla luce produce nella cellula una variazione della frequenza di scarica. Gli assoni delle cellule gangliari retiniche decussano al chiasma ottico. Le fibre della parte nasale della retina di ciascun occhio si incrociano, mentre quelle delle regioni temporali non si incrociano; quindi, tutte le informazioni provenienti dal campo visivo destro e sinistro vengono elaborate rispettivamente dal lato sinistro e destro del cervello. Dopo la decussazione, le cellule gangliari della retina proiettano a tre principali regioni subcorticali: il pretetto, il collicolo superiore e il nucleo genicolato laterale

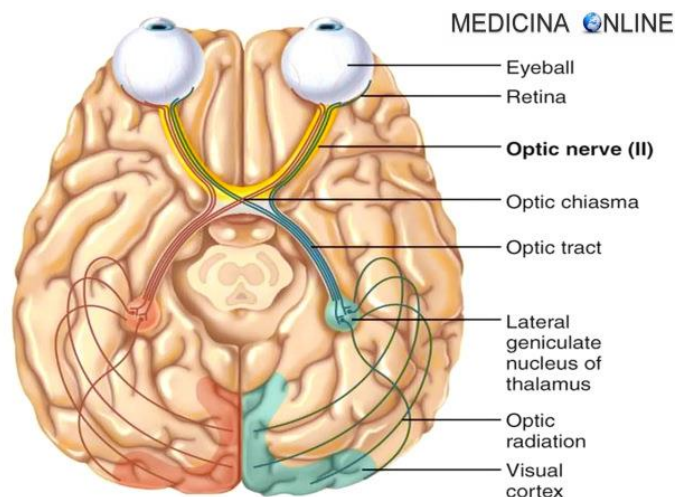


Fig.1.5: Organizzazione del sistema visivo.

(LGN). Il nucleo genicolato laterale (LGN) è la principale stazione di ritrasmissione, esso invia il 90% delle informazioni in entrata alla corteccia visiva. È organizzato in modo tale che le regioni adiacenti nello spazio visivo stimolino i neuroni vicini. Le informazioni dal LGN vengono trasportate attraverso radiazioni ottiche alla corteccia visiva primaria (V1). Le informazioni da V1 trascendono gli strati più profondi (aree corticali visive superiori V2, V3, V4, V5, V6). L'elaborazione delle informazioni fino alla corteccia visiva primaria è convenzionalmente definita *elaborazione di livello inferiore*, mentre oltre V1 l'elaborazione è in generale definita *elaborazione di livello superiore* (principalmente perché coinvolge meccanismi cognitivi più complessi). Per capire come uno stimolo fisico viene elaborato dal sistema visivo è fondamentale combinare le capacità fisiologiche prendendo in considerazione la densità di fotorecettori, la sensibilità spettrale dei recettori, l'organizzazione del campo recettivo ed i percorsi che portano informazioni al cervello.

Il colore rappresenta un aspetto soggettivo di uno stimolo oggettivo, ossia un fenomeno psicologico, individuale, che varia da persona a persona, quindi tutt'altro che reale. L'importanza dell'utilizzo del colore non sta solo nel godimento estetico, ma risulta anche dall'individuare velocemente e da lontano la qualità degli oggetti e dell'ambiente stesso. Può essere sinteticamente definito “un aspetto dell'esperienza visiva, caratterizzato da tre attributi, e normalmente, originato dalla stimolazione con radiazioni di lunghezza d'onda compresa fra 380nm e 760 nm.”⁵ (da Cline et al.: Dictionary of Visual Science). In merito alla visione dei colori furono formulate svariate tesi dai fisici dal tempo, ma le teorie che ebbero maggiore successo furono due: la teoria tricromatica proposta da Thomas Young e Hermann von Helmholtz e la teoria dell'opponenza cromatica proposta da Ewald Hering.

1.4 VISIONE CROMATICA: teoria del colore

All'inizio del 1800 il fisico Thomas Young propose una teoria del colore definita **teoria tricromatica**, in cui sosteneva la presenza di tre tipi di recettori, ognuno dei quali era in grado di percepire una determinata lunghezza d'onda. Secondo la sua teoria, era possibile ottenere tutti gli altri colori tramite la sovrapposizione degli stimoli provenienti da questi tre recettori.

Young indicò come colori primari le tre lunghezze d'onda a cui erano sensibili i recettori, ossia il rosso, il verde e il blu, capaci di generare tramite la loro combinazione la percezione di tutto lo spettro visibile. La teoria si basa sulla combinazione di questi tre tipi di coni e non esistono al di fuori di questi, recettori specifici per ogni singola lunghezza d'onda.

I tre tipi di coni sono definiti: L, M, e S (Fig.1.6).

I coni L o lunghi rispondono alle lunghezze d'onda maggiori, il rosso, con un picco massimo di 560 nm. I coni M o medi rispondono alle lunghezze d'onda medie, sul verde, con un picco massimo di 530 nm. I coni S o corti rispondono alle lunghezze d'onda minori, sul blu, con un picco massimo di 430 nm. I coni, composti da tre tipi di recettori sono distribuiti in proporzioni differenti: il rosso 64%, il verde 32% e il blu 2%. Inoltre, i coni S sono situati all'esterno della porzione centrale della retina, al contrario dei coni M e L, e la loro sensibilità è maggiore rispetto al rosso e al verde. Per questo motivo possono esserci percezioni differenti di blu, sia perché sono posti fuori dalla zona di massima acuità visiva, la fovea, sia perché l'indice di

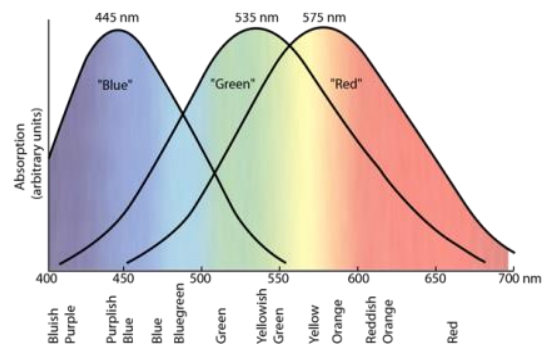


Fig.1.6: Spettro d'assorbimento dei tre tipi di coni.

⁵ Rossetti Anto, Gheller Pietro, “Manuale di optometria e contattologia.” Zanichelli, pag.113.

rifrazione del blu è differente dal rosso e dal verde e possono crearsi sfocature durante la messa a fuoco, dovute all'aberrazione cromatica.

Verso la fine del 1800, Ewald Hering propose una nuova teoria definita **opponenza cromatica**, attraverso la quale sostiene che la retina comprende tre tipi di fotorecettori opposti tra loro, che rispondono a rosso-verde, giallo-blu e bianco-nero e che tutti i colori dipendano dalla risposta di questi tre fotorecettori. Questa teoria si basa su fattori empirici, che mostrano che può esserci un rosso giallastro, un rosso bluastrò, ma non può esserci un rosso verdastro, in quanto sono opposti tra loro. Poiché i colori considerati sono quattro, la teoria prende il nome di teoria dei quattro colori. Hering spiega perché l'essere umano percepisce il blu e il verde come turchese, il rosso e il giallo come arancione, e così via; e perché non percepisce il rosso con il verde o il blu con il giallo nello stesso posto e nello stesso istante. Col tempo si è arrivati alla conclusione che le teorie proposte da Young ed Hering siano giuste, ma che avvengano in momenti diversi. Il primo stadio può essere considerato come lo stadio recettore, che consiste nei tre fotopigmenti (coni blu, verde e rosso). Il secondo stadio è la fase di elaborazione neurale, in cui avviene l'opposizione del colore. Il secondo stadio è a livello post-recettoriale. La nostra capacità di percepire i colori è dovuta a questa proprietà della visione, il tricromatismo, che non è presente soltanto negli esseri umani, ma è anche comune nei primati. Non è universale in tutto il regno animale poiché la maggior parte dei mammiferi possiede solo due pigmenti visivi su cui si basa la loro visione dei colori e vengono definiti dicromatici. Ci sono animali notturni che possiedono un solo pigmento visivo, ma anche rettili e pesci che possiedono quattro pigmenti e sono sensibili alla luce UV, invisibile per l'essere umano.

1.4.1 Discriminazione del colore

Le tre variabili nella visione dei colori: tonalità, saturazione e luminosità, hanno origini fisiche e dipendono tutte dalla lunghezza d'onda. Gli esperimenti di discriminazione del colore ci consentono di sapere quanto deve essere la variazione di lunghezza d'onda ($\Delta\lambda$) necessaria per rilevare una differenza di tonalità, saturazione e luminosità.

- Tonalità: si riferisce al colore effettivo. Ad esempio, per luce blu e rossa è necessario un grande cambiamento di lunghezza d'onda per rilevare un cambiamento di tonalità.
- Saturazione: descrive il grado di pallore del colore. La saturazione è legata alla purezza colorimetrica e non contiene parti di nero o bianco.
- Luminosità: descrive la quantità di nero o bianco presente nel colore percepito.

Diagramma C.I.E. di cromaticità

Il modello C.I.E. (Commissione Internazionale per l'illuminazione) del 1931 è un diagramma colorimetrico attraverso il quale è possibile identificare in modo estremamente preciso un colore (Fig.1.7). A differenza dei metodi RGB e CMYK, utilizzati rispettivamente nella sintesi additiva e sottrattiva, il diagramma si basa su di un principio di osservazione standard e sull'utilizzo dei tre colori primari immaginari che vengono opportunamente descritti da tre parametri: X, Y, Z, posti su un piano di coordinate x, y; dove X corrisponde ad un rosso violaceo ipersaturo, Y corrisponde ad un verde ipersaturo e Z ad un blu ipersaturo. Il diagramma contiene tutte le lunghezze d'onda visibili dall'occhio umano ed i colori si trovano all'interno di un triangolo avente vertici in $(x=0, y=0)$, $(x=1, y=0)$, $(x=0, y=1)$. I colori spettrali puri che corrispondono ad una precisa lunghezza d'onda si trovano sulla curva esterna a forma di

campana; alla base del diagramma, la chiusura è caratterizzata dal "porpora puro" che non rappresenta un colore spettrale. Tutti i punti interni al diagramma sono colori non spettrali, ottenuti combinando tra loro i tre colori spettrali. Il punto indicato con W (Fig.1.8) al centro del diagramma rappresenta il colore bianco, definito anche punto acromatico, il quale rappresenta il punto più insaturo ed ha coordinate $(x=1/3, y=1/3, z=1/3)$. Preso un qualsiasi colore spettrale sulla curva del diagramma, tracciando una linea retta da questo punto a W (colore bianco) si trovano su questa

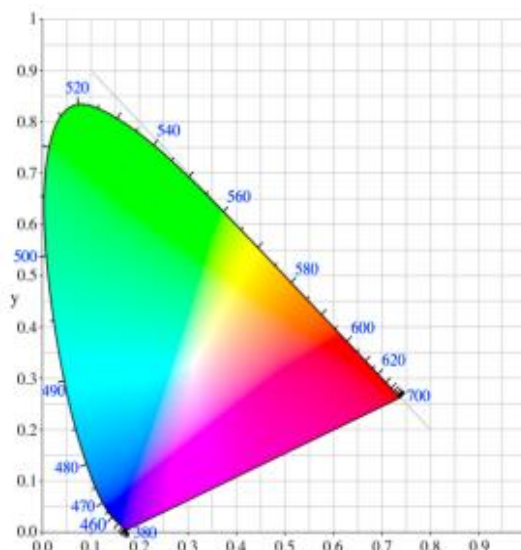


Fig.1.7: Diagramma di cromaticità.

retta tutte le tinte di questo colore, dal punto di massima saturazione (il punto sulla curva) a quello a saturazione nulla (il punto di colore bianco W). Prolungando questa retta fino a intersecare la curva dal lato opposto, si individua il suo **colore complementare** cioè quello ottenuto sottraendo dal bianco il colore di partenza. Per non ricorrere a un diagramma tridimensionale è possibile normalizzare le tinte facendo in modo che la loro somma sia sempre pari ad uno. Se X, Y, e Z sono i tre valori che identificano un colore e $X+Y+Z$ la loro somma, ponendo: $x = X/(X+Y+Z)$ $y = Y/(X+Y+Z)$ $z = Z/(X+Y+Z)$ risulta che $x+y+z$ è sempre uguale ad 1 per qualsiasi valore originario di X, Y e Z. Da questo si ricava che: $z = 1-x-y$. È dunque possibile utilizzare due sole coordinate cromatiche (x e y, ad esempio) per identificare un colore, essendo la terza (z, in questo caso) ricavabile sottraendo all'unità le altre due. Il vantaggio è evidente: normalizzando i colori col meccanismo della somma costante è possibile utilizzare un grafico bidimensionale per catalogare qualitativamente (e non quantitativamente) tutte le tinte reali.

Prese due tinte A e B, sul segmento che li unisce, è possibile trovare tutte le mescolanze additive di questi due colori e preso un generico punto P lungo il segmento, è possibile ricavare le percentuali di saturazione delle due tinte (Fig.1.8). Nel baricentro del segmento si trovano percentuali del 50% dovute al primo colore e percentuali del 50% dovute al secondo colore. Se il segmento passa per il punto W allora le due tinte, possiamo definirle “complementari”, e se W cade nel baricentro del segmento le due tinte hanno anche la stessa saturazione quindi la loro somma forma perfettamente il bianco.

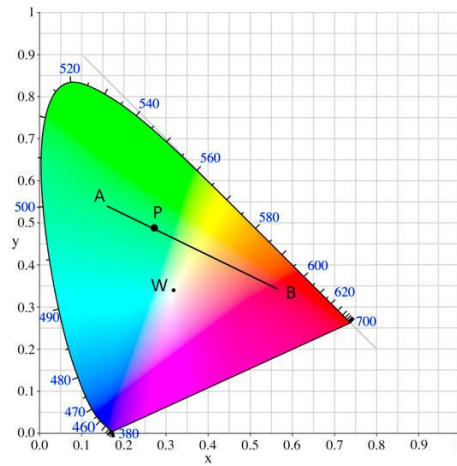


Fig.1.8: Mischelazione additiva di due tinte.

Inoltre, una caratteristica fondamentale di questo diagramma è che presi tre colori all'interno della campana (A, B, C), tutti i possibili colori risultanti dalla mescolanza di queste tre tinte, si trovano all'interno di un triangolo che ha per vertici proprio i tre punti considerati. Questi tre punti saranno i colori primari per tutte le tinte interne al triangolo. I punti all'interno del diagramma ma esterni a questo triangolo, avranno bisogno di altri primari per essere creati.

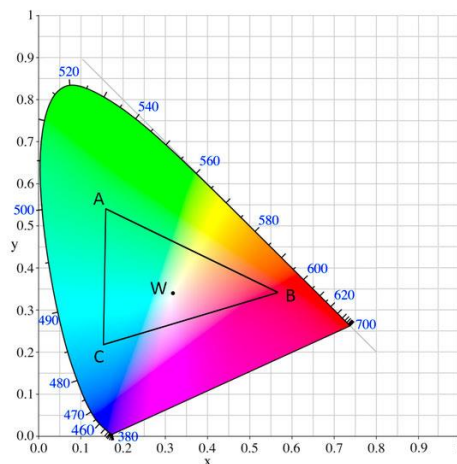


Fig. 1.9: Triangolo dei tre colori primari.

Esistono due metodi fondamentali per produrre stimoli cromatici: La sintesi additiva e sottrattiva. Nella sintesi additiva (Fig.1.10), la possibilità di creare diverse sensazioni cromatiche partendo da tre stimoli principali è ampiamente sfruttata dalla tecnologia, come nei display TV a colori, dove la sensazione di colore negli occhi è prodotta dalla miscela additiva di minuscole luci rosse, verdi e blu, in cui i singoli punti sono così vicini l'uno all'altro che l'occhio non è in grado di distinguerli spazialmente e verrà vista la mescolanza delle luci. La somma di tutte le radiazioni dello spettro visibile dona il bianco. Modificando l'intensità dei singoli punti, è possibile produrre diversi colori. La triade più comune è formata da: rosso, verde e blu (RGB) e sommando additivamente i colori a coppie, si ricava la triade sottrattiva:

- $R+V = \text{giallo}$
- $R+B = \text{magenta}$
- $V+B = \text{ciano}$

La sintesi sottrattiva dei colori comporta l'assorbimento selettivo delle lunghezze d'onda (Fig.1.11). Ciano, magenta e giallo sono primari sottrattivi. La sovrapposizione di più coloranti di diversa concentrazione l'uno sull'altro cambierà il colore della luce trasmessa.

Dalla sintesi sottrattiva a coppie, di tali colori, si ricava la sintesi additiva:

- $G+C = \text{verde}$
- $G+M = \text{rosso}$
- $C+M = \text{blu}$

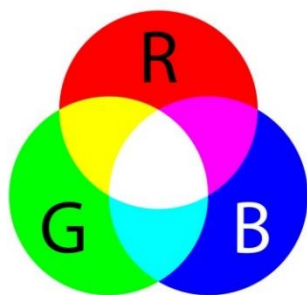


Fig.1.10: Sintesi additiva.

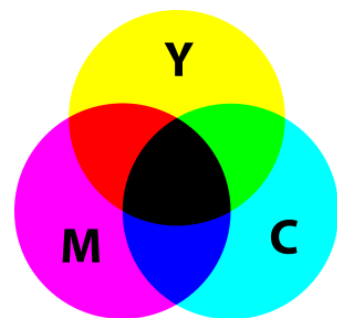


Fig.1.11: Sintesi sottrattiva.

Grazie agli studi portati avanti nel corso degli anni sul senso cromatico circa la capacità dell'occhio di distinguere i colori, è possibile risalire ai deficit del sistema visivo nella visione cromatica.

CAPITOLO 2

DEFICIT DELLA VISIONE CROMATICA

La visione dei colori avviene grazie ai fotorecettori presenti sulla retina, sensibili alle lunghezze d'onda della luce visibile. Le risposte prodotte da questi fotorecettori sono quindi inviate al sistema nervoso centrale e interpretate come sensazioni di colore. Un uomo su dodici vede il colore in modo diverso rispetto al resto della popolazione. Tali soggetti si ritrovano in una situazione descritta come discromatopsia, ossia un'alterazione nella percezione dei colori; questi individui confondono certi colori che la maggior parte delle persone è in grado di distinguere, variando la loro percezione di tonalità, saturazione e luminosità. Il termine daltonismo deriva dal ricercatore John Dalton che nel 1794 tramite un articolo fu il primo a parlarne; egli vedeva correttamente solo le parti blu, viola e gialle dello spettro e scoprì che anche suo fratello aveva il suo stesso problema. Da qui, Dalton, suppose che il suo umor vitreo fosse colorato di blu, assorbendo selettivamente lunghezze d'onda più lunghe. Prima di morire ordinò che in seguito alla sua morte i suoi occhi fossero esaminati per smentire o affermare la sua tesi. L'esame rivelò che il vitreo era perfettamente chiaro e negli esperimenti avvenuti nei secoli successivi, il DNA estratto dal tessuto oculare conservato, ha mostrato che Dalton era un deuteranopo, privo del fotopigmento a onde medie della retina. Il deficit della visione dei colori è un disturbo abbastanza comune della vista e può dipendere da fattori: congeniti o acquisiti.

2.1 Deficit congeniti della visione dei colori

I deficit congeniti sono la causa più frequente e rappresentano un'alterazione ereditaria dei fotorecettori. I soggetti aventi tali deficit si trovano in una situazione di svantaggio quando svolgono determinati compiti visivi; per questo motivo sono stati tradizionalmente esclusi da particolari occupazioni come, ad esempio, il trasporto o le forze armate, in cui è richiesto il riconoscimento del colore. In molti paesi, le persone con discromatopsie non possono guidare poiché alcune potrebbero non distinguere i diversi colori dei semafori e dei segnali stradali. La presenza di discromatopsia vieta anche alle persone di svolgere alcune professioni come pilota o vigile del fuoco a causa di problemi di sicurezza dati dal loro svantaggio visivo. Tale deficit è solitamente il risultato di mutazioni genetiche che influenzano l'espressione del fotorecettore a cono di lunghezza d'onda lunga (L) o di lunghezza d'onda media (M). Entrambi i fotopigmenti rossi e verdi sono codificati sul cromosoma X. La prevalenza del deficit della visione dei colori rosso-verde si manifesta sia per sesso che per etnia. In media è dell'8% nei maschi e dello 0,5% nelle femmine, poiché i maschi possiedono solo un cromosoma X e le femmine ne hanno due. Geograficamente, il deficit rosso-verde risulta essere molto più frequente in Europa, piuttosto che in Africa o in Asia. Uno dei modelli di base

dell'ereditarietà dei geni è chiamato ereditarietà recessiva legata all'X; con ciò si intende che il gene origine del disturbo è situato sul cromosoma X.

I maschi hanno un solo cromosoma X donato dalla madre ed un cromosoma Y. Affinché un maschio sia discromatope, il gene per tale difficoltà deve apparire solo sul proprio cromosoma X. Le femmine hanno due cromosomi X, provenienti da entrambi i genitori. Affinché una femmina presenti discromatopsia, entrambi i cromosomi X devono avere il gene per tale disturbo. Se una donna ha un solo gene discromatope essa sarà riconosciuta come *portatrice*, ma non manifesterà il problema visivo. Per tali motivi, la percentuale di soggetti di sesso maschile affetti da deficit della visione cromatica risulta essere maggiore rispetto a quella di sesso femminile.

I deficit della visione dei colori sono generalmente classificati in base alla gravità e possono essere ulteriormente classificati in base al tipo o ai tipi di coni interessati:

Tricromatismo anomalo

Il tricromatismo anomalo si manifesta quando uno dei tre tipi di coni presenti nella retina manifesta un'alterazione nella sua sensibilità spettrale; può essere classificato in relazione al cono che presenta l'anomalia:

- Protanomalia: è un'anomalia dei coni lunghi (L) e si ha una ridotta sensibilità nel percepire il rosso. Qualsiasi colore tendente al rosso viene visto più debolmente in termini di saturazione e tonalità, rispetto ad un soggetto normale.
- Deuteranomalia: è un'anomalia dei coni medi (M) e si ha una ridotta sensibilità nel percepire il verde. Rappresenta il disturbo più comune tra i tre tipi di deficit.
- Tritanomalia: è un'anomalia dei coni corti (S) e si ha una ridotta sensibilità nel percepire il blu. È una forma rara che colpisce circa lo 0,01% delle persone e si manifesta generalmente con una difficoltà nel distinguere tra giallo e blu.

Dicromatismo

Il dicromatismo è causato dall'assenza di uno dei fotopigmenti, ossia che solo due dei tre tipi di coni sono in grado di percepire la luce; può essere classificato in base al tipo di cono affetto dalla patologia: protanopia, deuteranopia o tritanopia. Ciò è causa di un'assoluta cecità verso la lunghezza d'onda in oggetto.

- Protanopia: mediante i coni lunghi (L) non si ha sensibilità e quindi si ha mancata percezione della lunghezza d'onda del rosso.
- Deuteranopia: mediante i coni medi (M) non si ha sensibilità e quindi si ha mancata percezione del colore verde e si confondono rosso, giallo e verde.

- Tritanopia: mediante i coni corti (S) non si ha sensibilità e quindi si ha mancata percezione della lunghezza d'onda del blu.

Acromatopsia

Le forme più gravi di deficit congenito della visione dei colori danno luogo all'acromatopsia, in cui la discriminazione dei colori è assente. È un difetto genetico della vista molto raro ma non degenerativo e consiste in una totale cecità ai colori, ossia una visione monocromatica (in bianco e nero). Può essere suddivisa in:

- Acromatopsia completa: in cui vi è una disfunzione totale o quasi dei coni e la funzione visiva è dominata dai bastoncelli, responsabili della visione scotopica in una retina normale.
- Acromatopsia incompleta: dovuta ad una funzione residua dei coni. Una minima parte dei coni è presente.
- Monocromatismo dei coni blu: deriva da un'assenza dei coni rossi e verdi e la visione dipende dai coni blu e dai bastoncelli. I soggetti affetti da tale monocromatismo presentano una scarsa acuità visiva, fotofobia e una sensibilità ridotta per lunghezze d'onda lunghe. I soggetti affetti dalle diverse discromatopsie presentano percezione dei colori, o nei casi limite mancanza totale di percezione così come illustrato nella figura 2.1.

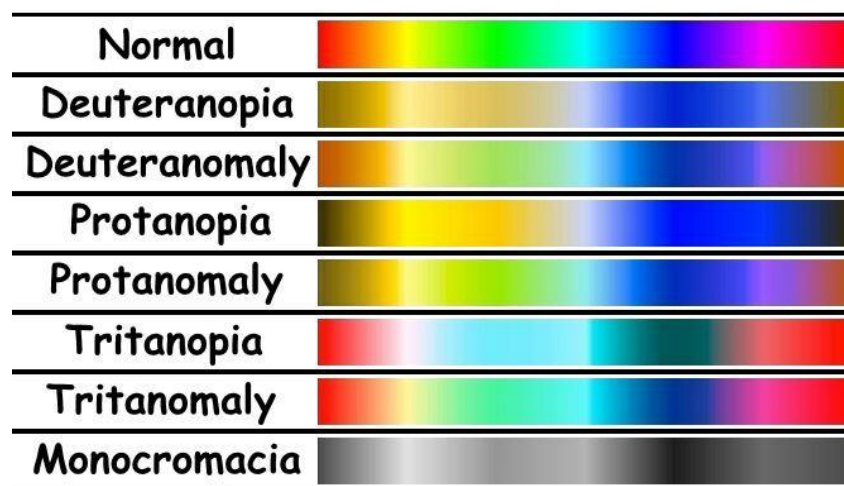


Fig.2.1: Come vedono i colori soggetti affetti da discromatopsie.

2.2 Deficit acquisiti della visione dei colori

Le discromatopsie acquisite generalmente colpiscono tutte e tre le classi di coni, anche se non necessariamente in parti uguali. Esse tendono a degenerare nel tempo ma risultano essere meno frequenti rispetto ai deficit congeniti. Possono essere causate da

diversi fattori come malattie vascolari, metaboliche, traumi o per effetti tossici dei farmaci. Una causa di tossicità può essere dovuta all'esposizione ad etambutolo (principio attivo usato per trattare la tubercolosi), ai farmaci per trattamento dell'ipertensione e ai solventi utilizzati nell'industria delle materie plastiche. La perdita della visione dei colori è associata a malattie sistemiche come: sclerosi multipla, diabete, morbo di Alzheimer, morbo di Parkinson e a malattie oculari dovute a danni alla retina e al nervo ottico come il glaucoma e la neuropatia ottica.

2.3 I test diagnostici

Esistono vari tipi di test per la diagnosi di problemi legati alla visione dei colori e vengono effettuati principalmente in bambini, in soggetti che si avvicinano per la prima volta ad un esame visivo e soprattutto in soggetti che presentano chiare difficoltà nella percezione cromatica. Tali test sono effettuati al termine dell'esame visivo.

2.3.1 Tavole pseudoisocromatiche

Le tavole pseudoisocromatiche, meglio conosciute come test di Ishihara (Fig.2.2), sono il tipo di test più utilizzato per lo screening dei deficit della visione dei colori. Il termine tavole pseudoisocromatiche deriva dal fatto che vi sono 38 tavole colorate composte da un mosaico di cerchi di colore, luminosità e dimensione diversa, disposti in modo da formare un numero che tende a confondersi e mescolarsi con i colori dello sfondo. Le tavole devono essere poste ad una distanza di circa 40 cm dall'osservatore, inclinate di 45° rispetto al piano d'appoggio; il soggetto effettua il test con la sua correzione abituale ed è importante avere una buona illuminazione della stanza. Si esegue in visione binoculare nel caso di difetti congeniti ed in visione monoculare nel caso di difetti acquisiti.

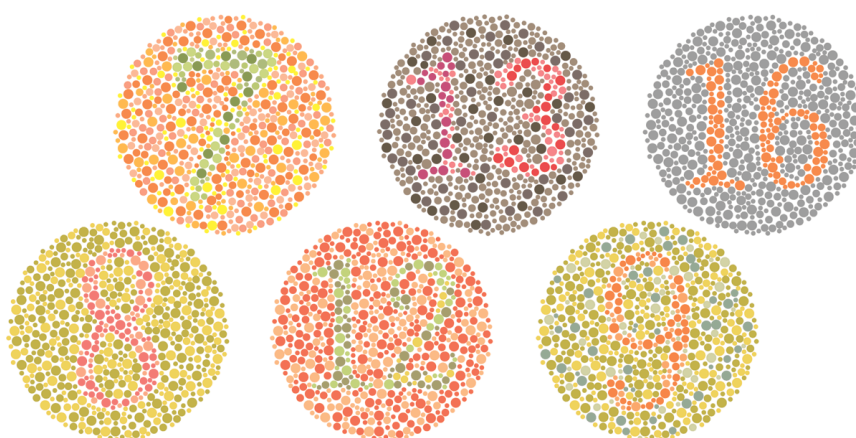


Fig.2.2: Tavole del test di Ishihara.

La tavola numero uno che contiene il numero **12** è dimostrativa e non è pseudoisocromatica, ossia viene letta anche da soggetti che presentano problemi nella visione dei colori. I numeri contenuti nelle tavole dalla **2** alla **17** non vengono letti o vengono letti male da coloro che presentano deficit nell'asse rosso-verde.

Le tavole **18-21** non contengono numeri, ma vengono riconosciute da soggetti che presentano un deficit rosso-verde.

Le tavole **22-25** sono di fondamentale importanza, perché grazie ad esse si è in grado di distinguere la vera cecità per un colore (protanopia o deuteranopia) dalla cecità parziale (protanomalia o deuteranomalia).

Le tavole successive fino ad arrivare alla **38** non contengono numeri, ma percorsi per gli analfabeti.

2.3.2 Test di Farnsworth

Lo scopo di questo test è quello di approfondire maggiormente le anomalie nella percezione del colore. È un test meno utilizzato rispetto a quello di Ishihara per via della sua complessità. Esistono due versioni del test di Farnsworth: il D-15 e il test di Farnsworth-Munsell dei 100 toni. Il D-15 si effettua facendo osservare al soggetto 15 capsule di diverso colore con l'obiettivo di posizionare le capsule in base alla loro tonalità, rispettando la sequenza cromatica. Soggetti con difficoltà nella visione del colore riordinano le capsule in maniera errata. Sul retro di ogni capsula vi sono dei numeri per tener conto della sequenza corretta e segnalare l'eventuale errore da parte dell'esaminato.



Fig.2.3: Test di Farnsworth.

Gli errori sono segnati su un grafico e tracciando la successione descritta dal soggetto rispetto alla successione

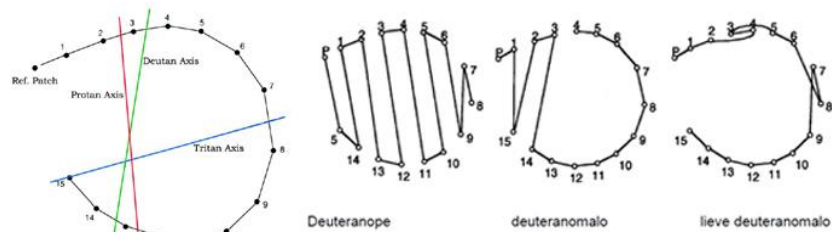


Fig. 2.4: I grafici mostrano i possibili risultati dopo l'esecuzione del test.

standard, si deduce, tramite confronto, lo stato cromatico

dell'esaminato (Fig.2.4). Sul grafico la sequenza corretta delle capsule forma un cerchio che va da 1 a 15. In base all'inversione di ordine si determina la gravità dell'errore. Ad esempio, un'inversione tra 5 e 6 è da considerarsi come un errore minore mentre è un errore grave quando capsule distanti sono posizionate vicine come nel caso di 3 e 12. Così facendo la linea che collega questi punti attraversa il cerchio. Le parallele che attraversano il cerchio sono caratteristiche del tipo di difetto e gli assi corrispondenti ai difetti protan, deutan e tritan sono indicati sul grafico. Il test di Fransworth-Munsell dei 100 toni ha lo stesso procedimento del precedente, con la differenza che vengono utilizzate 85 capsule e la durata del test è di circa 30 minuti.

2.3.3 Test HRR

Negli ultimi anni si è diffuso l'utilizzo del test HRR (Fig.2.5), test che prende il nome dalle iniziali dei cognomi dei suoi ideatori Hardy, Rand e Rittler che offre il vantaggio di diagnosticare non solo le anomalie relative all'asse rosso-verde, ma anche relative all'asse blu-giallo. Va eseguito in un ambiente adeguatamente illuminato ed il soggetto deve mantenere la schiena e il capo dritti durante l'esame. Il test ha gli stessi principi delle tavole pseudoisocromatiche con la differenza che dalla matrice di punti fuoriescono figure geometriche e non numeri, che un soggetto con normale visione cromatica riconosce facilmente.



Fig.2.5: Test HRR.

2.3.4 Anomaloscopio di Nagel

Lo strumento è stato sviluppato ad inizio del 1900 (Fig.2.6), e si presenta formato da un tubo con tre fessure attraverso le quali passano tre luci: gialla, verde e rossa. Quest'ultime si proiettano su di una figura circolare, divisa in due parti avente colorazione differente. L'anomaloscopio, viene utilizzato per una valutazione clinica di soggetti con una visione dei colori alterata; l'esecuzione avviene dopo aver presentato al soggetto le tavole isocromatiche. Il test ci permette di esaminare la sensibilità ai colori, infatti, il soggetto deve unire il rosso ed il verde tentando di accoppiarne tonalità e luminosità al giallo.

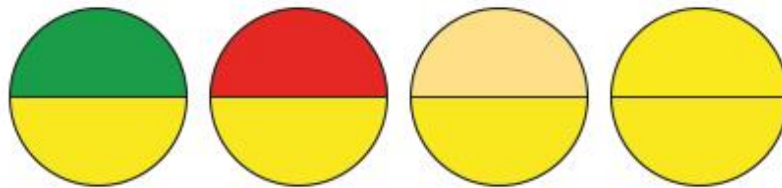


Fig.2.6: Anomaloscopio di Nagel.

Lo scopo del test è quello di eguagliare il colore dei due semi campi variando l'intensità della luce gialla oppure variando il rapporto di miscelazione della luce rossa e verde. Il risultato ci permette di determinare i difetti cromatici riguardo la visione del rosso e del verde.

CAPITOLO 3

LO STUDIO

3.1 Lo scopo

In questo terzo capitolo vi è l'analisi su cui si basa la tesi. Il lavoro consiste nel verificare la presenza o meno di deficit cromatici all'interno di un campione di persone scelte in maniera casuale nel genere e nel numero. L'obiettivo è quello di constatare che il tasso di discromatopsia presente sia in piccole percentuali; ed inoltre, che i rapporti tra maschi e femmine colpiti, rispettino le statistiche riscontrate in numerosi studi.

3.2 Soggetti e metodo d'indagine

I soggetti sottoposti allo studio sono stati 50, di cui 25 maschi (50%) e 25 femmine (50%), di età compresa tra i 18 e i 26 anni. Non è stata fatta nessuna distinzione in merito alla scelta dei candidati, infatti, oltre ai portatori di occhiali, vi è la partecipazione anche di soggetti privi di difetti visivi. L'indagine si è svolta presso il laboratorio optometrico dell'università, ed è stata eseguita in pieno giorno, con una buona illuminazione della stanza. È stato utilizzato come strumento d'indagine il Test di Ishihara, sottoponendo ogni soggetto ad osservare le tavole isocromatiche in visione monoculare, alternando ripetutamente i due occhi durante l'esecuzione del test. I candidati si sono sottoposti all'indagine utilizzando la loro correzione abituale per evitare che errori refrattivi più marcati potessero alterare l'osservazione delle tavole.

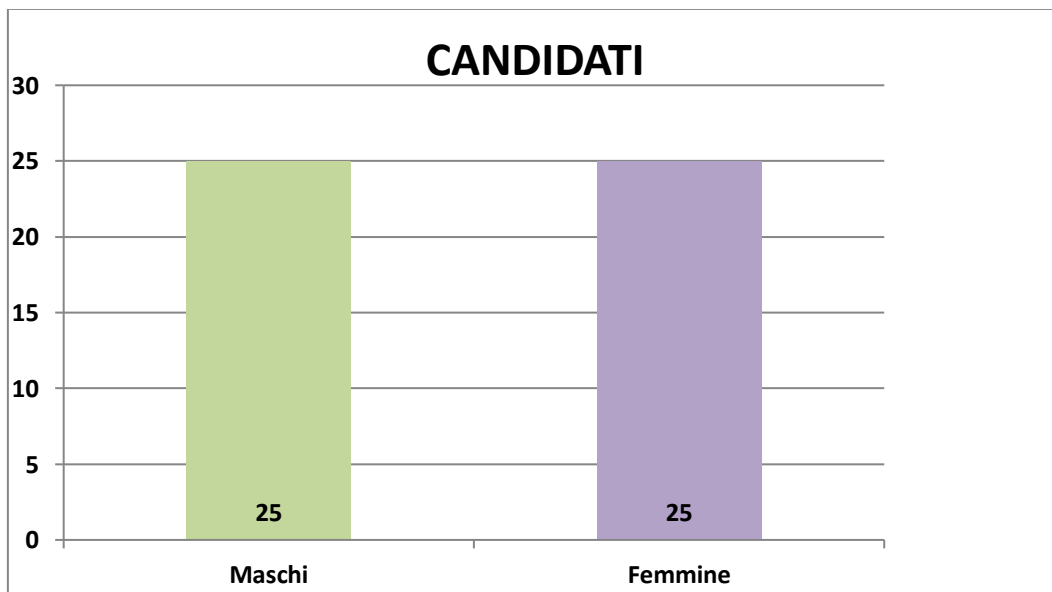


Grafico 1: Soggetti sottoposti al test: 50.

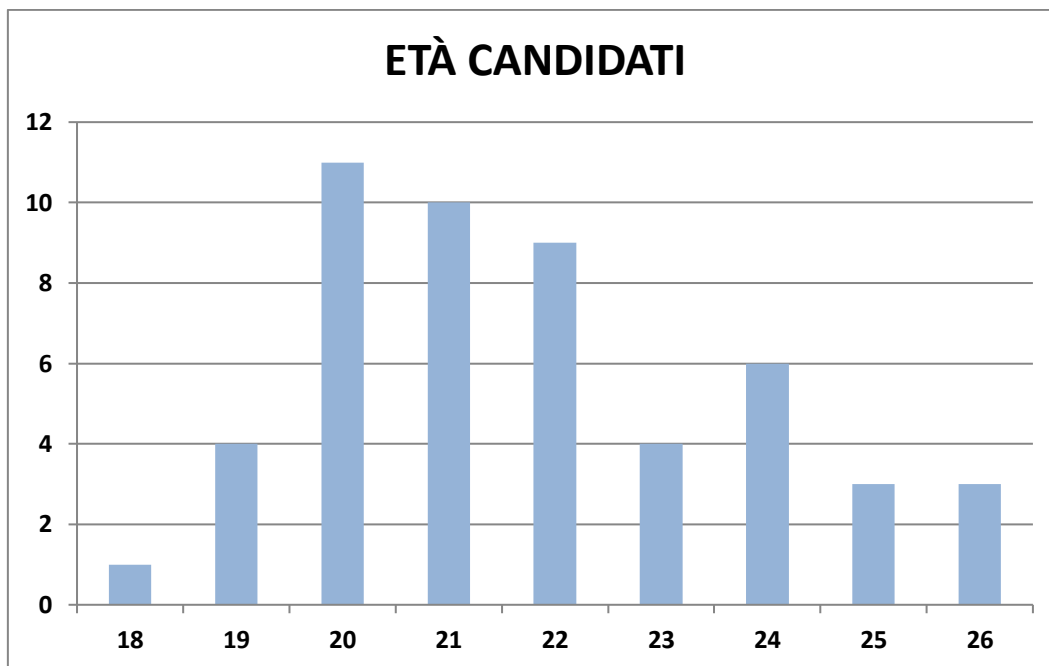


Grafico 2: Età dei soggetti sottoposti al test. L'età media dei candidati è di 22,2.

3.3 Risultati

Soggetti	Correzione in uso OD sf cyl ax	OS sf cyl ax
1	-2,00	-2,50
2	0,00	0,00
3	+1,50	+1,75
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	-3,75	-3,50
7	0,00	0,00
8	-1,25 -0,50 180°	-1,00 -0,75 180°
9	-2,50	-1,50
10	0,00	0,00
11	-4,00 -0,50 130°	-2,50 -2,00 65°
12	-2,75 -0,50 170°	-3,75 -0,50 180°
13	0,00	0,00
14	-4,00 -0,75 125°	-4,50 -0,75 50°
15	-0,75	-0,75
16	0,00	0,00
17	-1,25 -1,25 180	-1,75 -1,25 170°
18	-2,00	-2,00
19	0,00	0,00
20	-4,50 -0,75 180°	-4,50 -0,50 170°
21	-1,75	-1,75

22	-1,25 -1,00 180°	-1,25 -1,00 180°
23	-2,25	-1,75
24	0,00	0,00
25	-3,25	-3,50
26	-1,00	-1,50
27	-2,50 -0,50 180°	-2,75 -0,50 180°
28	-1,50	-1,75
29	-2,00	-1,50
30	-1,75 -1,25 170°	-2,25 -1,50 180°
31	-0,50 -1,75 10°	+0,75 180°
32	-0,75	-0,50
33	-1,25	-1,50
34	0,00	0,00
35	-1,25	-1,50
36	00,00	00,00
37	00,00	00,00
38	-0,50	-0,50
39	00,00	00,00
40	-5,75	-5,50
41	00,00	00,00
42	00,00	00,00
43	0,00	0,00
44	-0,75	-0,75
45	-8,50	-8,00
46	-1,50	-1,25
47	0,00	00,00
48	-2,75	-2,50
49	-0,75	-1,25
50	00,00	00,00

Tabella 1: Correzione abituale dei soggetti sottoposti al test.

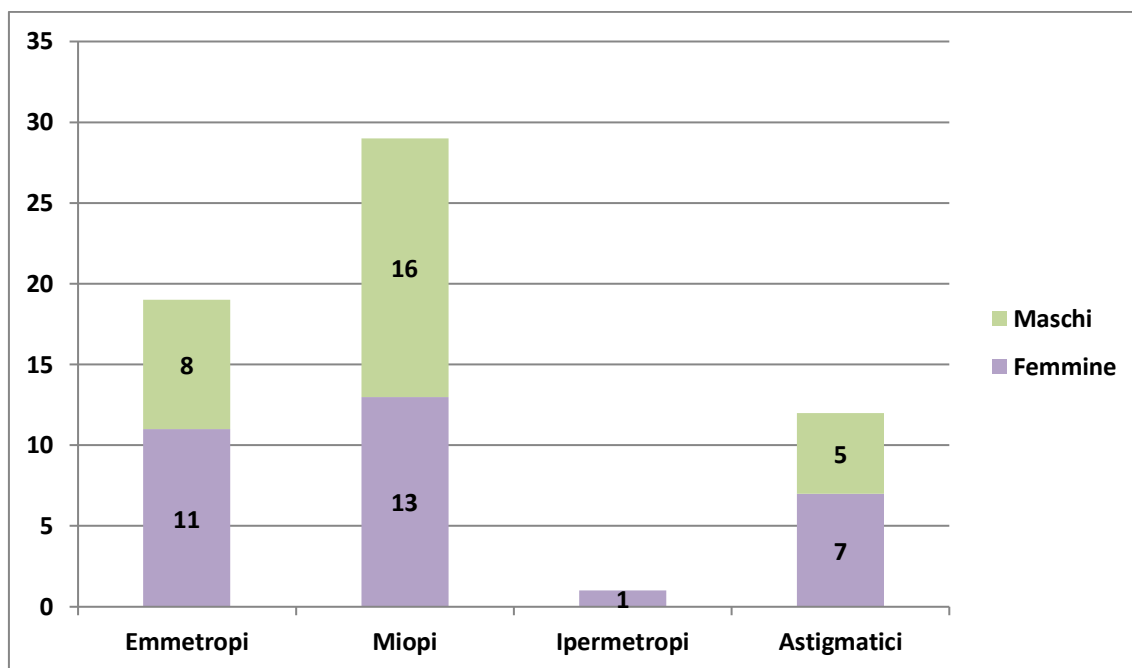


Grafico 3: Ametropie dei candidati. Distribuzione a seconda di sesso e difetto visivo.

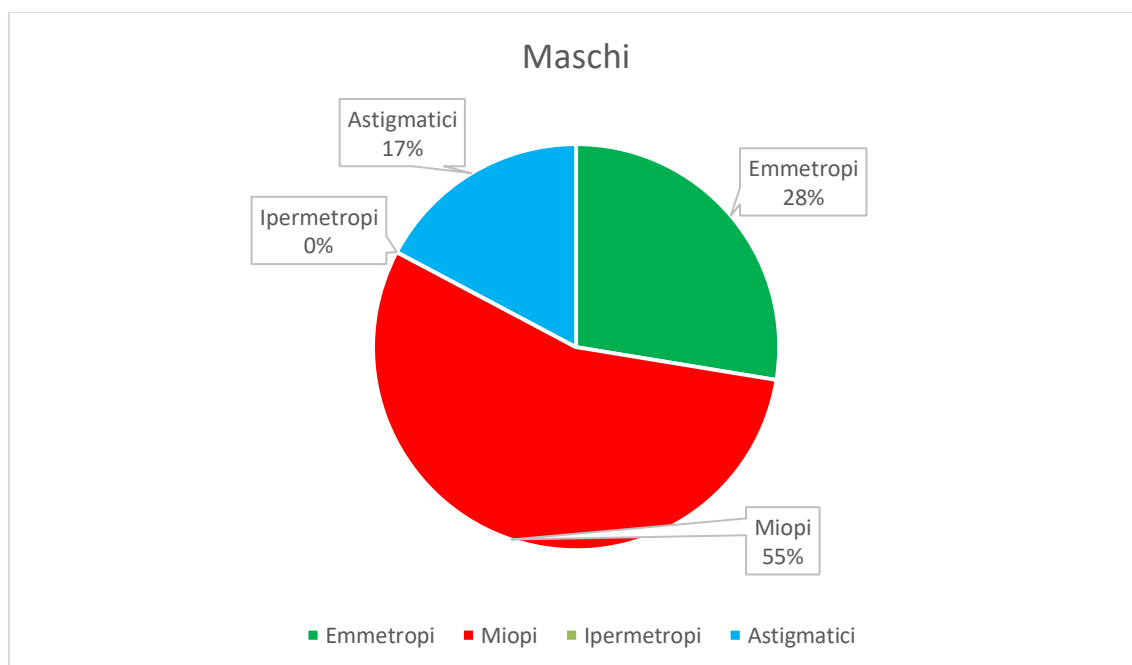


Grafico 4: maschi sottoposti al test.

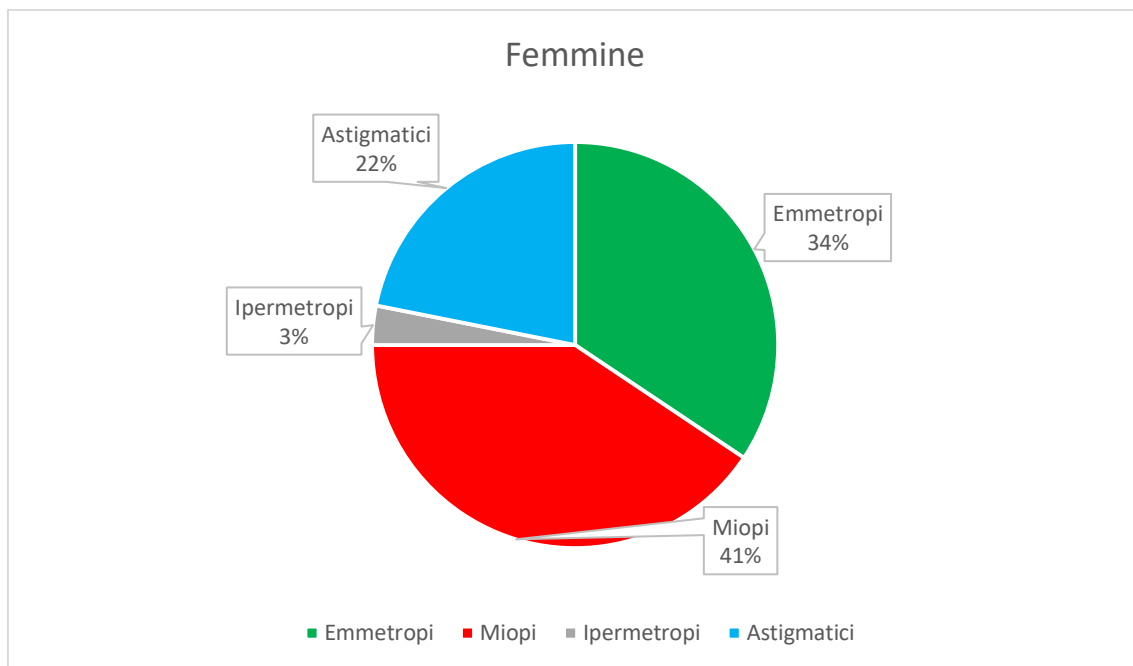


Grafico 5: femmine sottoposte al test.

L'analisi a cui sono stati sottoposti i candidati ha riportato la presenza di 5 soggetti con deficit cromatici, in particolare, con difficoltà nella percezione del verde.

I soggetti sono 4 maschi e 1 femmina e possiedono come correzione:

Soggetti	OD sf cyl ax	OS sf cyl ax	Età	Sesso	Discromatopsia
1	-1,00	-1,50	26	M	Deuteranomalìa
2	-2,50	-1,50	20	M	Deuteranomalìa
3	-4,00 -0,75 125°	-4,50 -0,75 50°	24	M	Deuteranomalìa
4	-0,75	-0,75	22	M	Deuteranomalìa
5	-0,50	-0,50	21	F	Deuteranomalìa

Su di un totale di 50 soggetti, solo 5 persone (10%) presenta deficit cromatici mentre le restanti 45 (90%) possiede una normale visione dei colori.

La totalità dei soggetti affetti da alterazione cromatica presenta miopia; mentre, il 53,3% dei soggetti con visione dei colori normale presenta tale difetto visivo.

Il primo soggetto ha dichiarato di avere un'alterazione ereditaria dei fotorecettori, una deuteranomalìa, e per questo motivo mostra chiare difficoltà nella comprensione delle

tavole anche in visione binoculare. Gli altri tre soggetti commettono minimo tre errori in visione monoculare.

Il secondo soggetto commette errori alla tavola n.13 contenente il numero 73 confondendolo con un 78, alla n.15 contenente solo cerchietti colorati dichiarando più di una volta di vedere un numero 2, e al percorso n.20, dove quest'ultimo viene tagliato ripetutamente ed eseguito in maniera errata da parte del soggetto.

Il terzo soggetto commette errori alla tavola n.9 contenente il numero 74, visto come 71, alla n.13 contenente il 73, visto come 78, ed infine il percorso n.20 non viene fatto in maniera decisa e ottimale.

Il quarto soggetto presenta un'alterazione cromatica sul verde molto marcata. Già dalla seconda tavola il soggetto mostrava un movimento anomalo del capo con lo scopo di decifrare al meglio i numeri, ma chiaramente senza risultati. Il test ha evidenziato chiare difficoltà da parte del candidato nell'interpretare le tavole e una conseguente deuteranomalia.

Il quinto soggetto invece, alla tavola n.5 contenente il 3 vede un 8, alla tavola n.8 confonde il numero 6 con un 8, e anche in questo caso, come i precedenti, viene commesso un errore alla n.13 dove il numero 73 non viene letto.

Conclusioni

In relazione al numero di soggetti esaminati, coloro che hanno presentato difficoltà nella percezione dei colori sono stati quantitativamente bassi; come precedentemente evidenziato soltanto cinque hanno rivelato discromatopsie. Tutti questi soggetti, ai controlli dell'acutezza visiva, si sono dimostrati di base miopica e risultano essere accomunati dalla presenza di una deuteranomalia.

In merito ad un eventuale connessione tra le due difficoltà visive non esiste chiara bibliografia in merito e, d'altro canto, l'origine dei difetti visivi è sufficientemente distante dalla sensibilità delle cellule cono nella risposta alle stimolazioni delle diverse lunghezze d'onda.

Tuttavia, si è potuto constatare attraverso queste misure effettuate che le discromatopsie sono effettivamente presenti in basse percentuali di soggetti e la ripartizione tra maschi e femmine colpiti è nel rapporto orientativo di 8 a 1 così come risulta da numerosi studi e statistiche effettuate.

Nelle 5 persone in cui è stata evidenziata una discromatopsia il rapporto risulta quasi lo stesso; in pratica sono stati classificati 4 maschi e 1 femmina, ma data l'esiguità del numero dei campioni totali è ovvio che non può essere tratta una conclusione statistica.

Ammessa la quantità insufficiente di soggetti esaminati resta tuttavia una particolarità data dall'associazione tra miopia e deuteranomalia; senza nulla a pretendere potrebbe esser preso in considerazione un eventuale studio approfondito per conoscere con maggiore precisione se effettivamente la correlazione tra ametropie e discromatopsie possa avere una consistenza maggiore e trovare spiegazione ed analogie possibili.

Bibliografia

- Billock V.A., Tsou B.H. *'Vedere colori impossibili.'* Le scienze. (2010)
- Catalano F., *'Elementi di ottica generale.'* Zanichelli, Bologna. (2002)
- Dispense di anatomia oculare*, Professor Valiante Salvatore.
- Dispense di fisica della visione*, Professor Peruggi Fulvio.
- Jacobs G.H., Nathans J. *'La visione dei colori nei primati.'* Le scienze. (2009)
- Kalloniatis M, Luu C. *'The Perception of Color.'* In: Kolb H, Fernandez E, Nelson R, editors. *Webvision: 'The Organization of the Retina and Visual System.'* (2005)
- Machado G.M., Oliveira M.M., Fernandes L.A.F., *'A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency,'* in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 15, no. 6, Nov.-Dec. (2009)
- Merola L., *'Esperimentazioni di fisica.'* Liguori. (2004)
- Murra D., Di Lazzaro P., *'Luce e visione, un binomio (quasi) perfetto.'* (2014)
- Neitz M., Neitz J., *'Color Vision Defects.'* John Wiley & Sons, Ltd. (2005)
- Paliaga G., *'I vizi di refrazione.'* Minerva medica. (2008)
- Pescosolido N., *'L'invecchiamento dell'apparato della visione.'* Fabiano. (2013)
- Piccolino M., Moriondo A., *'Retina e visione: elogio dell'imperfezione.'* (2002)
- Pugh E.N., Lamb T.D., *'Amplification and kinetics of the activation steps in phototransduction.'* Biochimica et Biophysica Acta. (1993)
- Rossetti A., Gheller P., *'Manuale di optometria e contattologia.'* Zanichelli, Bologna. (2003)
- Rogošić V., Bojić L., Poljaka N.K., Duplančić D., Vidanc P., Ivančić-Kačerc B., Mulić R. *'Comparative Analysis of Methods and Tests for Testing Colour Vision of Professional Seafarers.'* Transactions on Maritime Science - Ott. (2012)
- Schanda J., *'Colorimetry: Understanding the CIE System.'* John Wiley and Sons Ltd. (2007)
- Simunovic MP. *'Color Vision Deficiency'* (2010)
- Taioli S., *'Occhio, cervello e colore'* (2016)

Zeri F., Rossetti A., Fossetti A., Calossi A., *'Ottica Visuale.'* SEU, Roma. (2012)

Sitografia

<https://occhio.it/anomaloscopio-di-nagel/>

<https://www.salute-nella-scienza.it/salute/esami/test-daltonismo.htm>

<https://www.college-optometrists.org/john-dalton-a-visual-error.html>

<https://www.colourblindawareness.org/colour-blindness/inherited-colour-vision-deficiency/>

Ringraziamenti

Al termine di questo percorso, desidero ringraziare il professor Gagliardi per la pazienza, i consigli e il tempo dedicatomi durante tutta la stesura dell'elaborato.

Ringrazio i professori, che in questo lungo cammino mi hanno aiutato a crescere trasmettendomi curiosità e passione negli argomenti trattati.

Ringrazio mia mamma, che nonostante tutti i periodi di difficoltà passati in questi anni è riuscita a sostenermi moralmente ed economicamente.

Ringrazio i miei amici, che nei momenti di sconforto mi sono stati vicini mostrandomi sostegno e vicinanza, con parole e gesti.

Ringrazio i miei compagni d'avventura, Gennaro e Pasquale, con cui ho condiviso gioie, dolori, ansie e giornate di studio interminabili.

Infine, ringrazio la persona più importante della mia vita, Pasqualina. Se non ci fossi stata probabilmente non avrei mai intrapreso questo percorso. Mi hai aiutato fin dal primo giorno, incoraggiandomi ad andare avanti nonostante presentassi delle lacune non indifferenti per affrontare questo corso di laurea. Mi sei stata vicina in ogni occasione, nello studio, nel panico prima degli esami e soprattutto nei momenti in cui avrei volentieri abbandonato tutto. Hai sempre creduto in me come non ha mai fatto nessuno, e a te che sei la mia metà, dedico questo piccolo traguardo.