



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea Triennale in Ottica e Optometria

Tesi di Laurea

LA PERCEZIONE CROMATICA E LE DISCROMATOPSIE
(Colour Perception and its Impairments: Dyschromatopsia)

Relatore: Prof.ssa Dominga Ortolan

Laureanda: Laura Beltramello

Correlatore: Prof. Renzo Colombo

Matricola: 1119219

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 LA VISIONE DEI COLORI	5
1.1 Fattori di ordine fisico: la luce	5
1.1.1 Lo spettro elettromagnetico	6
1.2 Fattori di ordine fisiologico: dalla retina al cervello	7
1.2.1 Le vie parallele	11
1.3 Le teorie del colore.....	11
1.4 Fattori di ordine psicologico: il senso cromatico	14
CAPITOLO 2 ANOMALIE DELLA PERCEZIONE CROMATICA E TEST DIAGNOSTICI	17
2.1 Difetti genetici nella visione dei colori	18
2.2 Difetti acquisiti nella visione dei colori	22
2.3 I test diagnostici.....	23
2.3.1 Tavole pseudoisocromatiche	23
2.3.2 Test di Farnsworth	24
2.3.3 The City University Colour test.....	25
2.3.4 Anomaloscopio di Nagel	26
2.3.5 Test delle lanterne.....	27
CAPITOLO 3 STRATEGIE DI COMPENSAZIONE DELLE DISCROMATOPSIE.....	29
3.1 Dispositivi ottici con filtro colorato	30
3.2 Nuove speranze per la correzione delle discromatopsie: la terapia genica	36
CONCLUSIONE	39
BIBLIOGRAFIA	43

INTRODUZIONE

Il nostro occhio o meglio, il nostro cervello può percepire diverse sfumature di colore. Sorge spontaneo, quindi, porsi una domanda riguardante l'affascinante e complessa esperienza della percezione dei colori ed in particolare: “cos'è il colore?”.

Quel che è certo è che i colori non esistono materialmente.

Oscar Wilde nella sua lettera *De Profundis* affermava: «È dentro il cervello, che il papavero è rosso, la mela odora e l'allodola canta» (Wilde, 2014); come dire che il colore è una sorta di pigmento della nostra immaginazione.

Il colore è luce ed energia, ma anche una sensazione che ci coinvolge sul piano delle emozioni, rendendo le cose calde e fredde, eccitanti e indifferenti. Il colore è informazione, ci permette di identificare gli oggetti, ci aiuta nel riconoscimento di un frutto maturo, dei cartelli stradali, delle vie di fuga e ci permette di fermarci davanti a una luce rossa e di avanzare quando diventa verde. Comprendere il colore significa aggiungere una dimensione alla vita.

Si può ben capire che la visione del colore è un fenomeno complesso al quale partecipano numerosi fattori come la luce, la relazione tra occhio e cervello, le interazioni di assorbimento, riflessione e rifrazione legate alla struttura e alla diversa composizione chimica della materia.

Una visione dei colori sofisticata ha presumibilmente conferito un vantaggio evolutivo ai nostri antenati primati non umani. Darwin pensava che tutti i vegetali e tutti gli animali fossero costretti a una lotta disperata per l'esistenza, e che la sopravvivenza spettasse sempre al più forte e al meglio adattato. Il colore, una caratteristica ereditaria, diventava così un'arma fondamentale nella continua competizione per la vita (Birren, 1987).

Nel mondo vegetale il colore dei fiori ebbe un ruolo fondamentale per la sopravvivenza delle piante poiché continuando a evolversi, i fiori svilupparono

colori adatti ad attirare quegli insetti maggiormente idonei a diffondere il loro polline e i loro semi.

Nel mondo animale il colore ha un ruolo molto importante nella ricerca di cibo, nella salvezza dai predatori e nel comportamento sessuale (Birren, 1987).

I messaggi trasmessi dai segnali di colore sono di molti tipi. A volte il messaggio è elementare: «vieni qui» indirizzato ad un amico, il colore di un fiore che serve ad attirare un insetto impollinatore o quello di un frutto per attirare un uccello che ne spargerà poi il seme; oppure: «stai lontano» indirizzato ad un nemico, il colore di un insetto pungente o quello di un fungo velenoso come deterrente contro un potenziale predatore. A volte, invece, il messaggio è più complesso, come quando il colore viene usato per comunicare all'interno di un contesto sociale, per esempio durante un corteggiamento o in scontri aggressivi (un pavone che apre la coda a ventaglio, una scimmia che scopre i propri genitali colorati). Qualunque sia il livello del messaggio, i segnali di colore hanno solitamente tre funzioni: attirare l'attenzione, trasmettere informazioni e colpire direttamente le emozioni di chi li vede. Una banana suscita appetito in una scimmia, una vespa gialla paura in un pigliamosche, le rosse labbra di una giovane donna passione in un uomo (Humphrey, 1976).

Nel mondo animale, un esempio molto noto di mimetismo è quello del camaleonte che cambia colore per mimetizzarsi con l'ambiente, questo particolare fenomeno è utile sia per nascondersi dai predatori ma anche per cacciare, ad esempio la colorazione a strisce nere e gialle della tigre la aiuta a mimetizzarsi negli ambienti erbosi dove vive durante la caccia.

Queste tecniche di sopravvivenza utilizzate nel mondo animale sono state riprese fin dall'antichità dai nostri antenati, basti pensare ai cacciatori, ai soldati dell'esercito e al loro abbigliamento per mimetizzarsi e non farsi vedere dall'animale o dalla truppa nemica o all'uso delle giacche rinfrangenti in caso di incidenti stradali o nel caso di una camminata serale.

Una visione del colore normale è di fondamentale importanza in alcune professioni tanto che se il soggetto presentasse delle anomalie ne sarebbe escluso.

Una buona visione del colore è essenziale nelle industrie elettriche, fotografiche, di stampa, per gli addetti all'agricoltura, per le forze armate, per i conducenti di

trasporti e per i piloti. Nel caso particolare dell'aviazione, se un soggetto risulta positivo al test di Ishihara e anche ai successivi test di percezione cromatica, non risulta essere idoneo alla guida degli aerei (Regolamento CE n. 216/2008).

Sebbene non sia più fondamentale per la sopravvivenza, la capacità di distinguere i colori arricchisce incommensurabilmente il nostro aspetto di vedere il mondo ma, purtroppo, non tutti percepiscono il colore allo stesso modo.

L'alterazione della percezione cromatica può assumere forme diverse, alcune attribuibili a fattori ereditari e, altre, a fattori acquisiti, che influiscono sulla maggiore o minore ricchezza delle sensazioni cromatiche percepibili da una persona (Ings, 2008).

Circa l'8% degli uomini e lo 0,4% delle donne interpretano i colori in modo differente rispetto al resto della popolazione.

Le alterazioni della percezione cromatica vengono distinte in due principali gruppi:

- discromatopsie o discromie, caratterizzate da una percezione cromatica anomala;
- acromatopsia o monocromatismo, caratterizzata dall'assenza di percezione del colore.

Ci sono solo alcuni test per valutare la percezione cromatica tra cui, i più utilizzati, sono il test di Farnsworth, le tavole pseudoisocromatiche, ad esempio quella di Ishihara e l'anomaloscopio.

Le alterazioni della percezione cromatica possono quindi essere diagnosticate tramite gli appositi test ma non possono essere totalmente compensate. Strumenti di miglioramento della percezione cromatica evidenziando differenze che normalmente non sarebbero notate; essi sono i filtri colorati, sotto forma di lenti oftalmiche e di lenti a contatto.

Capitolo 1

LA VISIONE DEI COLORI

I colori hanno stimolato fin dall'antichità riflessioni sulla loro origine e natura e sul loro ordinamento. I filosofi classici ritenevano che i colori, come i sapori e gli odori fossero qualità degli oggetti determinate dall'apparato sensoriale, ma ad oggi quando si deve dare la definizione di colore occorre prendere in considerazione molteplici fattori.

Si tratta di fattori di ordine fisico in relazione alle caratteristiche delle radiazioni luminose e della natura dei corpi, di ordine fisiologico in relazione alle caratteristiche e alle modalità processuali del sistema visivo, e infine di ordine psicologico in relazione all'esperienza del colore.

La visione del colore, quindi, è contemporaneamente sia un'esperienza soggettiva che un'esperienza oggettiva; proprio per questo motivo, per spiegare tale fenomeno, occorre soffermarsi sia sulla luce che sui processi visivi di elaborazione.

1.1 Fattori di ordine fisico: la luce

La luce è la condizione necessaria per la visione e soprattutto per la visione a colori. La radiazione elettromagnetica è un'onda che si propaga nello spazio ad altissima velocità e il nostro occhio riesce a percepirne solo una piccola porzione.

Ai fini della visione dei colori, l'ampiezza dell'onda influisce sull'intensità luminosa dello stimolo elaborato dal cervello, mentre la lunghezza dell'onda influenza la tonalità del colore percepito.

Nel 1666 Newton dimostrò sperimentalmente che, se si osserva un raggio solare attraverso un prisma di cristallo, esso si scompone in una serie ordinata di raggi colorati aventi differenti lunghezze d'onda (Fig.1). Si vide anche che, collocando due prismi identici in opposizione, si riotteneva il raggio luminoso bianco scomposto precedentemente (Otha and Robertson, 2005).

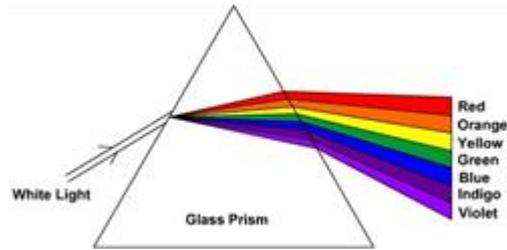


Figura 1 Dispersione di un prisma rifrangente (da P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Elementi di fisica*, Padova; Edises, 2002).

Egli ottenne ciò che noi attualmente chiamiamo spettro visibile.

Newton dimostrò che la luce bianca o policroma è costituita dall'insieme delle radiazioni monocromatiche che il nostro occhio percepisce come colore.

1.1.1 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è costituito dall'insieme delle radiazioni e comprende l'intera gamma delle lunghezze d'onda esistenti in natura, dalle onde lunghissime alle onde cortissime.

Lo spettro è suddiviso convenzionalmente in una successione di bande: onde hertziane, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X e γ (Mazzoldi, 2002). La luce visibile è la banda dello spettro cui l'occhio umano è sensibile. Le differenze individuali possono far variare leggermente l'ampiezza dello spettro che approssimativamente si situa tra i 380 e i 780nm. Alla lunghezza d'onda minore corrisponde la gamma cromatica del blu-violetto, a quella maggiore corrisponde invece la gamma dei rossi (Fig.2).

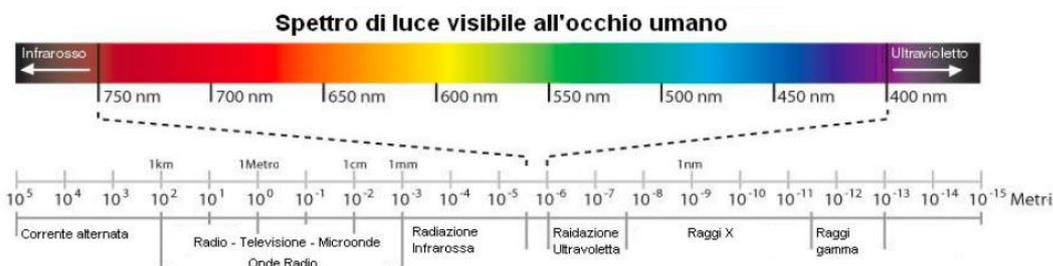


Figura 2 Spettro elettromagnetico (da P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Elementi di fisica*, Padova; Edises, 2002).

L'ottica è quel settore della fisica che studia i fenomeni connessi all'emissione, alla propagazione e alla rilevazione di un particolare intervallo di radiazioni elettromagnetiche (luce) in grado di produrre stimoli sulla retina dell'occhio umano.

Il campo dell'ottica fisica è spesso allargato alle radiazioni contigue a quelle del cosiddetto spettro visibile e cioè allo studio dell'infrarosso e dell'ultravioletto, in quanto queste radiazioni agiscono sui tessuti che compongono la struttura anatomica dell'occhio. In particolare, la sovraesposizione ai raggi UV causa danni non solo alla pelle ma anche alla cornea, al cristallino e in minor quantità alla retina (Allaria et al, 2010).

L'agente fisico che provoca la sensazione visiva è costituito dalle radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda comprese tra 380nm e 780nm e questo intervallo, comprende circa 10 milioni di colori percepibili dall'occhio umano (Wyszecki, 2006), ma il colore è un'esperienza che dipende da due cose: la luce che gli oggetti riflettono e le proprietà del sistema visivo di chi guarda.

Quando la luce solare illumina un oggetto si possono realizzare i seguenti fenomeni: tutto lo spettro viene riflesso e l'oggetto appare bianco, tutto lo spettro viene assorbito e l'oggetto appare nero, una parte dello spettro viene assorbita e l'altra viene riflessa per cui l'oggetto ci appare del colore della luce riflessa.

Si può ben capire che il colore è funzione delle caratteristiche di assorbimento e di riflessione delle radiazioni luminose da parte dei corpi ma è anche un fenomeno elaborato dai processi che hanno luogo nell'organismo, dalla retina ai centri di codificazione del cervello (Bressan, 2007).

1.2 Fattori di ordine fisiologico: dalla retina al cervello

Il complesso meccanismo che porta alla visione e in particolare alla percezione dei colori inizia a livello retinico e termina a livello della corteccia visiva primaria.

La retina è la più interna delle tre tuniche che costituiscono la parete del bulbo oculare. È una membrana sensoriale altamente differenziata negli elementi costituenti, nella quale avvengono, per l'azione delle radiazioni luminose, delle trasformazioni chimiche, fisiche ed elettriche, per mezzo delle quali si origina lo

stimolo che, giunto ai centri nervosi, vi determina il fenomeno percettivo della visione. Essendo una struttura neuronale è naturale che sia complessa e i suoi componenti possono essere classificati in molteplici strati (Bucci, 1993; Midena, 2006).

Anatomicamente la retina si suddivide in 10 strati (Fig.3), così distinti dall'esterno verso l'interno:

1. Epitelio pigmentato retinico (EPR): è costituito da un unico strato di cellule pigmentate, in contatto esternamente con la membrana di Bruch e internamente con i fotorecettori.
2. Strato dei coni e dei bastoncelli: elementi nervosi deputati alla trasformazione dello stimolo luminoso in un impulso elettrico.
3. Membrana limitante esterna: localizzata all'esterno dei nuclei dei fotorecettori.
4. Strato nucleare esterno: composto dai nuclei dei fotorecettori.
5. Strato plessiforme esterno: è rappresentato dalle sinapsi tra i fotorecettori e i dendriti delle cellule bipolari e orizzontali.
6. Strato nucleare interno: contiene i corpi cellulari delle cellule orizzontali, bipolari, amacrine, cellule del Muller, astrociti e microgliali.
7. Strato plessiforme interno: interazione sinaptica tra le cellule bipolari, amacrine e gangliari.
8. Strato delle cellule gangliari: è formato da cellule nervose di varia grandezza.
9. Strato delle fibre nervose ottiche: è costituito dagli assoni delle cellule gangliari e si presenta come un sottile foglietto di fibre che si dirigono verso la papilla per formare il nervo ottico e successivamente proiettarsi verso il corpo genicolato laterale (CGL).
10. Membrana limitante interna: è una sottilissima membrana che separa la retina dall'umor vitreo.

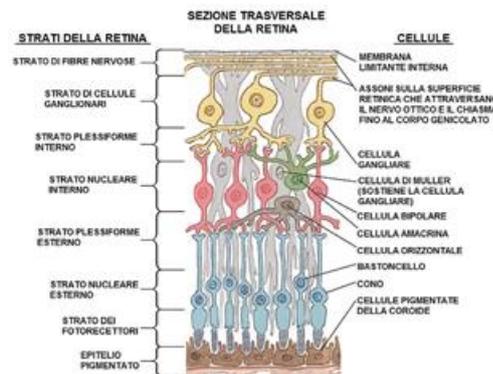


Figura 3 Strati della retina (dal sito <https://www.studioculisticiquerzola.com/glaucoma?lightbox=dataitem-iyrgu3x>).

Nella retina sono presenti due tipi differenti di fotorecettori: i coni e i bastoncelli. Si calcola che nella retina umana siano presenti circa 6 milioni di coni e 120 milioni di bastoncelli. La concentrazione dei primi è massima nella fovea mentre i bastoncelli raggiungono la maggiore densità a circa 20 gradi dalla fovea (Palumbi, 1962; Oyster, 1999).

I coni sono deputati alla visione della luce e dei colori e si suddividono in tre tipologie differenti a seconda del fotopigmento localizzato a livello del segmento esterno. Essi sono coni lunghi o rossi, coni medi o verdi e coni corti o blu a seconda della loro sensibilità alle radiazioni luminose (Mustafi et al., 2009).

I bastoncelli mediano la visione scotopica e possiedono un solo fotopigmento. Entrambi i tipi di fotorecettori contengono un pigmento fotosensibile detto porpora visiva o rodopsina, una proteina di membrana costituita da una parte proteica l'opsina e una parte aldeidica, il retinale, che è un cromoforo della vitamina A (Sharpe et al., 1999).

Nei coni la rodopsina assume alcune varianti atte a conferire ai ricettori la loro particolare specializzazione nella percezione cromatica.

Tali varianti sono:

- L'eritropsina,
- La cloropsina
- La cianopsina.

Quando la luce colpisce il fotopigmento, la rodopsina contenuta si divide nelle sue componenti con conseguente sbiancamento del pigmento visivo e liberazione di un neurotrasmettitore chimico. Tale processo dà inizio ai messaggi elettrici dei fotorecettori che alla fine raggiungono il cervello, mentre meccanismi biochimici speciali, rigenerano continuamente le molecole di rodopsina schiarite riportandole alla loro forma originale sensibile alla luce (Ganong, 1979).

Solo quando i segnali della luce e del colore provenienti dall'occhio raggiungono il cervello, vediamo il colore. I coni e i bastoncelli traducono la luce che assorbono in schemi di segnali elettrici che vengono trasmessi attraverso le sinapsi allo strato connettivo di cellule bipolari. Queste mettono insieme le informazioni ricevute dai recettori e le trasmettono verticalmente allo strato successivo, le cellule gangliari, mentre, le cellule orizzontali e i neuroni amacri distribuiti fra le cellule bipolari trasmettono lateralmente l'informazione (Hung, 2002).

In particolare, esistono due tipi di cellule gangliari che si differenziano per forma e funzione:

- Cellule Parvo o midget: forniscono informazioni sul colore e sulla forma di un oggetto.

- Cellule Magno o parsol: forniscono informazioni sul movimento e sulle rapide variazioni di luminanza. I loro campi recettivi sono molto ampi (Zocchi, 2012).

Il campo recettivo è quella porzione di retina che se stimolata dalla luce produce la massima risposta della stessa cellula gangliare. Esso può essere più o meno esteso e a seconda della sua grandezza fornisce informazioni più o meno precise sulla natura di uno stimolo. In particolare, più sono piccoli i campi recettivi, maggiore sarà la loro densità e migliore sarà la discriminazione di un dato oggetto. I campi recettivi delle cellule M sono molto grandi, mentre quelli delle cellule P sono piccoli ed è questo il motivo della loro alta capacità discriminativa.

Gli assoni delle cellule M e P si riuniscono a formare il nervo ottico, la parte nasale si incrocia a livello del chiasma ottico mentre quella temporale si dirige direttamente al corpo genicolato laterale (CGL) (Fig. 4), struttura suddivisa in sei strati, situata a livello del talamo.

I due strati più ventrali I e II del CGL contengono cellule relativamente grandi e vengono detti strati magnocellulari poiché ricevono la proiezione delle cellule gangliari M. I quattro strati dorsali, detti parvocellulari contengono cellule

relativamente piccole e ricevono le proiezioni delle cellule P. Esiste un'ulteriore regione tra gli strati parvocellulari e magnocellulari, detta interlaminare, che contiene neuroni molto piccoli chiamati cellule konio che hanno la funzione di identificare le varie lunghezze d'onda e quindi di riconoscere il colore in maniera grossolana.

L'informazione visiva, dal CGL prosegue viaggiando tramite le radiazioni ottiche per poi giungere a livello della corteccia cerebrale, e più propriamente nella corteccia visiva primaria (V1) o area 17 di Brodman che si trova collocata per metà nell'emisfero cerebrale destro e per metà in quello sinistro (Gregory, 1990).

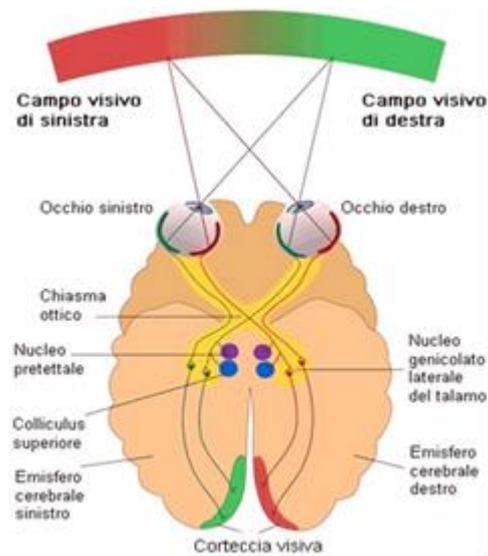


Figura 4 Schema delle vie visive (dal sito <https://medicinaonline.co/2017/03/07/come-funziona-vista-come-si-formano-le-immagini-che-locchio-vede>).

1.2.1 *Le vie parallele*

A livello della corteccia visiva primaria ritroviamo la stessa distinzione presente sia a livello retinico che a livello del CGL per quanto riguarda la suddivisione degli strati in magnocellulari, parvocellulari e koniocellulari.

Di conseguenza si parla di tre vie parallele:

- La via Magno o dorsale codifica il movimento.
- La via Parvo o ventrale codifica la forma e i dettagli degli oggetti.
- La via visiva Konio o blob si ritiene deputata all'analisi del colore. I campi recettivi dei blob sono ad antagonismo centro-periferia e ad opponenza al colore. Presentano un'alta sensibilità alle lunghezze d'onda, cosa che le altre due vie non mostrano e ciò suggerisce che siano deputate all'analisi del colore dell'oggetto (Schwartz, 2004).

Le cellule della corteccia striata (V1) inviano gli assoni alle vicine aree corticali visive più elevate, che sono le aree V2, V3, V4 e V5. Queste sono coinvolte nell'integrazione delle informazioni visive con gli altri sensi e con la memoria.

L'area V5 è deputata al movimento, l'area V4 al colore e l'area V3 alla forma degli oggetti (Casco, 1992).

Il sistema visivo è quindi un processo assai complesso, caratterizzato da neuroni che rispondono a stimoli sempre più complessi man mano che si prosegue lungo le vie ottiche per ottenere così l'immagine di un oggetto che sia il più rispondente alla realtà per quanto riguarda la forma, le dimensioni e i colori.

Per quanto riguarda la visione dei colori, ad oggi si fa riferimento ad un modello basato su due livelli che concorrono entrambi alla determinazione finale del colore percepito: il primo livello è definito dalla teoria tricromatica, mentre il secondo livello è definito dalla teoria dell'opponenza cromatica.

1.3 **Le teorie del colore**

Il meccanismo di percezione dei colori è stato a lungo oggetto di interesse e sono state formulate numerose ipotesi. Le due ipotesi più note sono la teoria tricromatica originariamente proposta da Thomas Young e Hermann von Helmholtz, e la teoria dell'opponenza cromatica proposta da Ewald Hering.

La teoria tricromatica fu proposta da Thomas Young nel 1802 e successivamente integrata da Herman von Helmholtz nel 1894. Young supponeva esistessero tre gruppi distinti di fibre nervose, una sensibile al rosso, una al verde e una al blu, basandosi sul fatto che qualsiasi colore poteva essere prodotto da un'opportuna mescolanza dei tre primari. Questa teoria presuppone quindi la presenza di tre tipi di coni, contenenti differenti sostanze fotochimiche che presentano la sensibilità massima per uno dei colori primari. Non esiste quindi un fotorecettore specifico per ogni singola lunghezza d'onda, ma la visione del colore è data dalla combinazione funzionale di soli tre tipi di coni. Ad esempio, la sensazione del giallo è generata dalla risposta simultanea dei fotorecettori rossi e verdi. I tre tipi di cono, denominati L, M e S, si distinguono principalmente per la porzione dello spettro visibile cui ciascuno è estremamente sensibile.

I coni L o rossi sono i più sensibili alle lunghezze d'onda lunghe (assorbimento massimo 564 nm), i coni M o verdi alle lunghezze d'onda medie (assorbimento massimo 533nm) e i coni S o blu alle lunghezze d'onda corte (assorbimento massimo 437 nm) (Fig.5).

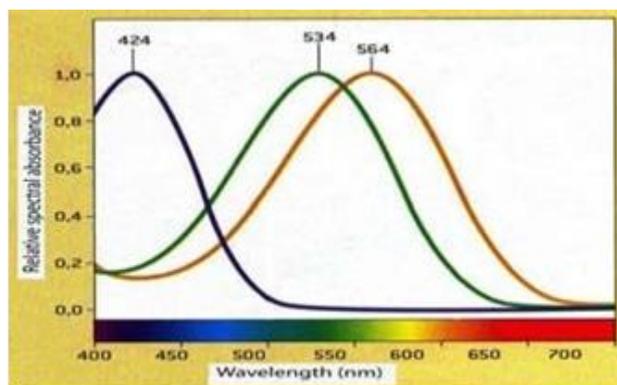


Figura 5 Spettro di assorbimento dei coni S, M, L (da J.L. Schaaf et al, Sensibility of Human Cone Photoreceptors. Nature).

Queste tre tipologie di coni non sono presenti in egual concentrazione bensì è stimato che gli L siano 2,9 milioni, gli M siano 1,4 e gli S 0,2 milioni per un totale di circa 4,5 milioni di coni per occhio. La stimolazione dovuta a una luce rossa, porta alla visione di questo colore perché vi è una forte eccitazione da parte dei coni che contengono il fotopigmento L, e ad una debole stimolazione degli altri due tipi. Il risultato finale sarà quindi la percezione del colore rosso (Curcio et al, 1991).

Ewald Hering propose la teoria dell'opponenza cromatica nel 1878, la quale afferma che la visione cromatica funziona per coppie opposte di colori: rosso-verde, blu-giallo e nero-bianco.

La risposta data dai coni alle diverse lunghezze d'onda dello stimolo luminoso costituisce l'informazione che poi viene analizzata dalle altre cellule retiniche. La maggior parte delle cellule orizzontali, gangliari e quelle del nucleo genicolato laterale rispondono in maniera differente alla lunghezza d'onda relativa allo spettro visibile: esse sono eccitate da alcune lunghezze d'onda e inibite da altre.

Questi neuroni sono caratterizzati da campi recettivi concentrici a opponenza cromatica semplice (Fig.6) e l'eccitazione del neurone avviene se il centro del campo recettivo viene colpito da un colore, mentre si ha un'inibizione della risposta quando la periferia

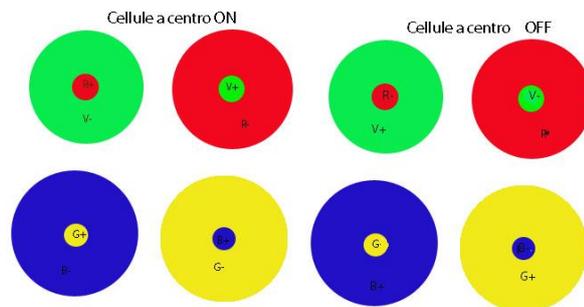


Figura 6 Cellule ad opponenza cromatica (da *Handbook of Optics*, sponsored by the Optical Society of America).

del campo recettivo risulta colpita dal colore opposto (rosso-verde, giallo-blu). Ad esempio una cellula rosso-on/verde-off (R+/V-) sarà eccitata da luce rossa al centro e inibita da luce verde nella periferia.

A livello della corteccia visiva primaria troviamo neuroni con risposte più complesse e questi neuroni sono caratterizzati da campi recettivi a opponenza cromatica doppia (Casco, 1992).

La prima considerazione di Hering è che i grigi costituiscono una serie di sfumature che va dal nero più scuro al bianco. Tutti gli altri colori si possono ordinare in altre quattro serie di sfumature: dal rosso al blu, dal blu al verde, dal verde al giallo e dal giallo al rosso. Gli estremi di queste quattro serie sono i cosiddetti colori fondamentali.

Poiché i colori considerati sono quattro, cioè rosso, verde, giallo e blu la teoria è anche nota come teoria dei quattro colori o tetracromatica.

Ai tempi di Hering questa teoria non era compatibile con la teoria tricromatica, e la controversia tra Helmholtz e Hering durò diversi anni.

Da alcuni studi sui pesci (Tomita et al, 1967), sulle scimmie (De Valois, 1966) e sugli uomini (Brown and Wald, 1964), è emerso che le due teorie sono entrambe corrette ma si riferiscono a due momenti diversi del processo visivo.

L'uso di tecniche avanzate e i progressi nel campo dell'elettrofisiologia, hanno permesso di misurare l'assorbimento spettrale dei singoli coni presenti sulla retina umana e su quella della carpa. I risultati ottenuti mostrano chiaramente la presenza di tre tipi di coni con picchi di assorbimento relativi alle lunghezze d'onda di circa 450 ± 3 , 525 ± 3 , 560 ± 3 nm. Le ricerche sulle scimmie, effettuate dal neurofisiologo statunitense R.L. De Valois, hanno dimostrato a livello delle cellule orizzontali, bipolari, gangliari e del corpo genicolato laterale, la presenza di campi recettivi a opponenza cromatica centro-periferia. Questi rispondono in maniera differente alle variazioni di luminanza e di lunghezze d'onda.

La risposta tricromatica è quindi presente nei coni mentre la risposta cromatica opponente riguarda gli stadi successivi dell'elaborazione dello stimolo luminoso e cioè le cellule orizzontali, gangliari, il CGL e la corteccia visiva (Maffei e Mecacci, 1979).

1.4 Fattori di ordine psicologico: il senso cromatico

Il senso cromatico è la capacità di distinguere correttamente i colori del mondo che ci circonda e che ci permette di riconoscere le caratteristiche proprie dell'oggetto valutandone il volume, la pesantezza e il probabile materiale di cui è composto.

Tre distinte qualità fisiche e psicofisiche ci permettono di distinguere un colore da un altro. Esse sono: tono, saturazione e intensità (Miotto, 1994).

- Il tono o colore propriamente detto, caratterizzato dalla lunghezza d'onda dello spettro.
- La saturazione, indica la purezza o l'intensità di un colore. Un colore saturo quindi non contiene parti di nero o bianco.
- L'intensità o luminosità è il carattere che permette di distinguere un colore luminoso da uno opaco.

La materia è composta da una struttura molecolare che reagisce alla luce in modi diversi, infatti, secondo la propria composizione, assorbe alcune radiazioni e ne respinge altre. Ogni sostanza o superficie che ci appare colorata sottrae alcune radiazioni alla luce e trasmette per riflessione tutte le altre, in base alla propria struttura molecolare. Ciò che viene percepito dall'occhio umano come colore,

sono le radiazioni riflesse, perché i corpi materiali non sono né luminosi né colorati ma sono percepiti come tali solamente dall'occhio umano. Un corpo nero assorbe tutte le radiazioni elettromagnetiche visibili, mentre un corpo bianco le respinge tutte. Un corpo giallo, per esempio, assorbe le radiazioni comprese nella zona spettrale del viola e riflette nella zona degli arancioni e dei verdi. Un occhio normale è in grado di percepire non solo i colori fondamentali puri ma anche le varie combinazioni cromatiche che derivano dalla mescolanza di essi eseguita in varie proporzioni.

La luce bianca o policroma è costituita da differenti radiazioni monocromatiche che compongono lo spettro del visibile e che il nostro occhio percepisce come colore. L'uomo però non è in grado di distinguere le componenti della luce, ma ne percepisce la sintesi.

Nella sintesi additiva (Fig.7) i colori sono suddivisi in:

- Colori primari: rosso, verde, blu
- Colori secondari: giallo, ciano, magenta.

Nella sintesi sottrattiva (Fig.7) i colori sono suddivisi in:

- Colori primari: giallo, ciano, magenta.
- Colori secondari: rosso, verde, blu.

Nella sintesi additiva la somma di più onde visibili, che ai nostri occhi appaiono colorate, dà il bianco; mentre nella sintesi sottrattiva la somma di più pigmenti colorati dà il nero (De Grandis, 2000).



Figura 7 Sintesi additiva e sintesi sottrattiva (da L. De Grandis, *Teoria e uso del colore*, Milano, Mondadori, 2000).

Grazie alla conoscenza della fisiologia della visione dei colori, ci si è potuti dedicare allo studio delle anomalie della percezione cromatica e allo sviluppo di test diagnostici utili per la gestione e la compensazione di questi difetti mediante l'utilizzo di filtri specializzati.

Capitolo 2

ANOMALIE DELLA PERCEZIONE CROMATICA E TEST DIAGNOSTICI

La sensazione del colore deriva dalle interazioni delle varie lunghezze d'onda luminose con i pigmenti fotosensibili della retina e la loro successiva interpretazione neurale all'interno del percorso visivo. È importante ricordare, quindi, che la percezione del colore non è la stessa per tutti poiché si tratta di esperienze soggettive e psicologiche e anche perché gli oggetti e le superfici non possiedono colore ma quest'ultimo è visibile grazie all'effetto che la luce, riflessa dall'oggetto, ha sul nostro sistema nervoso (Rosenfield, 2009).

Da molto tempo l'inabilità a distinguere i colori ha suscitato un curioso interesse. La prima evidenziazione clinica dell'alterazione della percezione cromatica è dovuta al ricercatore britannico John Dalton, affetto da una discromatopsia, che per primo, nel 1794, descrisse il disturbo nell'articolo "Fatti straordinari legati alla visione dei colori".

Dalton ripeteva spesso che per lui le calze rosse o blu scuro avevano il medesimo colore; egli infatti sosteneva che i colori erano stati nominati ingiustamente poiché a causa del suo deficit, il rosso scuro, il blu scuro e il marrone gli apparivano dello stesso colore.¹

Il colore è luce sotto forma di radiazioni elettromagnetiche caratterizzate da lunghezze d'onda e frequenze differenti che l'occhio assorbe e il cervello elabora e converte per dare inizio alla percezione cromatica ma se a livello retinico vi è un malfunzionamento dei coni questo porta ad una difficile distinzione delle varie

¹ Dalton di sé stesso disse: «I was always of the opinion, though I might not mention it, that several colours were injudiciously named. All crimsons appear to me to consist chiefly of dark blue: but many of them seem to have a tinge of dark brown. I have seen specimens of crimson, claret, and mud, which were very nearly alike. Crimson has a grave appearance, being the reverse of every shewy and splendid colour. Woolen yarn dyed crimson or dark blue is the same to me (1798/1948, p. 102) » (Blake and Sekuler, 2006).

lunghezze d'onda provocando difficoltà nel distinguere il colore e in altri casi una totale incapacità nella discriminazione di alcune tonalità. Si stima che circa il 4,5% della popolazione manifesti difetti nella visione del colore (Pokorny et al, 1979), suddivisi in genetici e acquisiti.

2.1 Difetti genetici nella visione dei colori

Le discromatopsie congenite sono forme legate all'ereditarietà.

Studi condotti da Pokorny et al. (1987) e Nathans et al. (1999) affermano che l'incidenza di tali problemi dipendano dall'etnia infatti la loro diffusione è doppia nella popolazione bianca rispetto a quella nera (8% caucasici, 5% asiatici, 5% africani, 2% aborigeni australiani con difetti rosso-verdi) e dal sesso infatti circa l'8% degli uomini e solo lo 0,4% delle donne interpretano i colori in modo differente rispetto al resto della popolazione (Brown and Lindsey 2004; Schwartz, 2004).

Un soggetto con visione tricromatica normale possiede tre pigmenti retinici con differente spettro di assorbimento per le lunghezze d'onda rosse, verdi e blu. I difetti congeniti possono essere caratterizzati dalla sola presenza di un fotorecettore e quindi si parla di monocromatismo, dalla presenza di due fotorecettori e si parla quindi di dicromia, dalla presenza di tre fotorecettori, di cui uno differisce dal normale, e in questo caso si parla di tricromia anomala.

Le forme più comuni sono quelle di tipo protan e deutan anche note come deficit rosso-verdi e sono alterazioni ereditarie recessive legate ai cromosomi sessuali. Poiché l'anomalia è legata al cromosoma X, le donne risultano in minor modo colpite poiché è necessario che entrambi i genitori siano portatori o affetti dall'anomalia, invece negli uomini che presentano un solo cromosoma X (ereditato dalla madre) il coinvolgimento è maggiore poiché devono avere una madre che sia portatrice o affetta dalla malattia per avere, rispettivamente, il 50% o il 100% di possibilità di essere colpiti (Bressan, 2007).

Le anomalie tritan, dette anche giallo-blu, sono le meno frequenti e, a differenza delle altre sopra elencate, sono alterazioni di tipo autosomico dominante e cioè non legate ai cromosomi sessuali, ma al cromosoma 7 che codifica per il gene

delle lunghezze d'onda blu. Quest'ultima anomalia è più spesso correlata alle forme acquisite (Rossetti e Gheller, 2003).

I difetti congeniti sono suddivisi in base alla loro severità.

Il monocromatismo è la forma più grave e si ha quando la percezione del colore è assente per cui i colori sono visti come differente gradazione di grigio. Quello bastoncellare, il più diffuso, anche noto come acromatopsia tipica è dovuto all'assenza dei coni per cui la visione è affidata esclusivamente ai bastoncelli che sono ciechi al colore. In questi soggetti è assente la capacità di distinguere tra i differenti stimoli spettrali ed essi presentano inoltre fotofobia, nistagmo e bassa acuità visiva (20/200).

Il monocromatismo dei coni, detto acromatopsia atipica, è la forma più rara dovuta alla presenza di un unico cono. In questo caso però l'acuità visiva risulta essere normale (Grosvenor, 2002).

Curioso è il caso degli abitanti dell'isola di Pingelap, un'isola del pacifico, descritto da Oliver Sacks in "L'isola dei senza colore". In seguito a un tifone abbattutosi sull'isola sopravvissero il sovrano, portatore di un raro gene di una forma estrema di acromatopsia, e una ventina di abitanti che, accoppiandosi tra di loro, generarono bambini acromatopsici. Ad ora l'incidenza di questo difetto è di 1 su 12, oltre la media mondiale che prevede un caso ogni 30 mila (Stone, National Geographic 2018).

Le forme moderate di discromatopsia sono rappresentate dalle dicromie che sono suddivise in base al tipo di cono coinvolto.

Il soggetto si definisce protanope quando vi è una compromissione dei coni L, a causa dell'assenza del fotopigmento eritrolabile. Esso discrimina solo le lunghezze d'onda corte e confonde il rosso con il verde. L'incidenza di questa anomalia è dell'1% per i maschi e dello 0,02% per le femmine.

Il deuteranope manca del fotopigmento per le lunghezze d'onda M, infatti è assente il pigmento clorolabile. Il soggetto attribuisce due principali colori a tutto lo spettro e in particolare giallo per le lunghezze d'onda lunghe e bluastro o porpora-blu per le lunghezze d'onda corte. Il risultato è che anche in questo caso il soggetto confonde i colori rosso-verde. L'incidenza di questo difetto è dell'1,1% nei maschi e dello 0,1% per le femmine.

Nella tritanopia il soggetto è insensibile al giallo e al blu per l'assenza del fotopigmento cianolabile dei coni S e tutto ciò che lo circonda è visto con sfumature rosso-verde. È un'anomalia molto rara infatti ne sono affetti lo 0,002% dei maschi e lo 0,0001% delle femmine (Fig.8, fig.9).

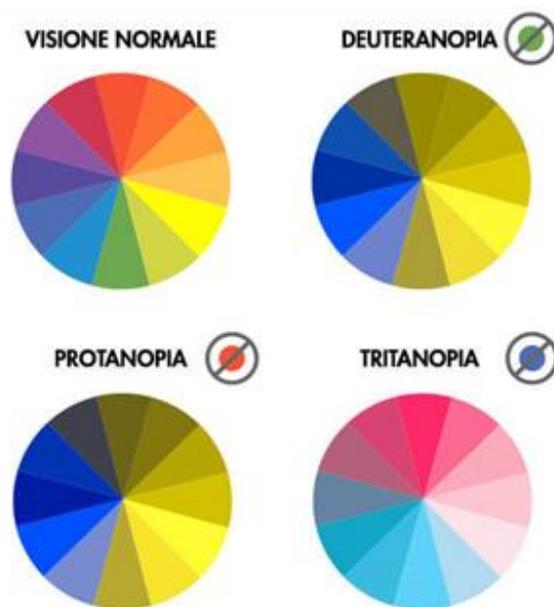


Figura 8 Gamma cromatica percepita dai soggetti protan, deutan e tritan messa a confronto con quella di un soggetto con visione dei colori normale (dal sito <https://www.doveecomemicro.it/notizie/aggiornamenti/daltonismo>).

La forma lieve viene definita tricromia anomala e si verifica quando uno dei tre fotopigmenti è alterato, in questo caso la visione tricromatica non è totalmente compromessa ma vi è una riduzione della sensibilità nei confronti dei colori fondamentali: rosso, verde e blu.

Il soggetto si definisce protanomalo quando l'anomalia riguarda il fotopigmento L perciò si ha uno scivolamento della sensibilità dello spettro luminoso verso le lunghezze d'onda medie per cui il soggetto confonde con facilità il verde con il rosso.

Il deuteranomalo presenta un'anomalia del fotopigmento M, l'assorbimento è spostato verso le lunghezze d'onda lunghe portando il soggetto a confondere il rosso con il verde (Fig.9).

Nel caso della tritanomalia si ha una riduzione della sensibilità spettrale dei coni S per le lunghezze d'onda corte per cui il soggetto incontra difficoltà a distinguere il giallo e il blu (Schwartz, 2004).

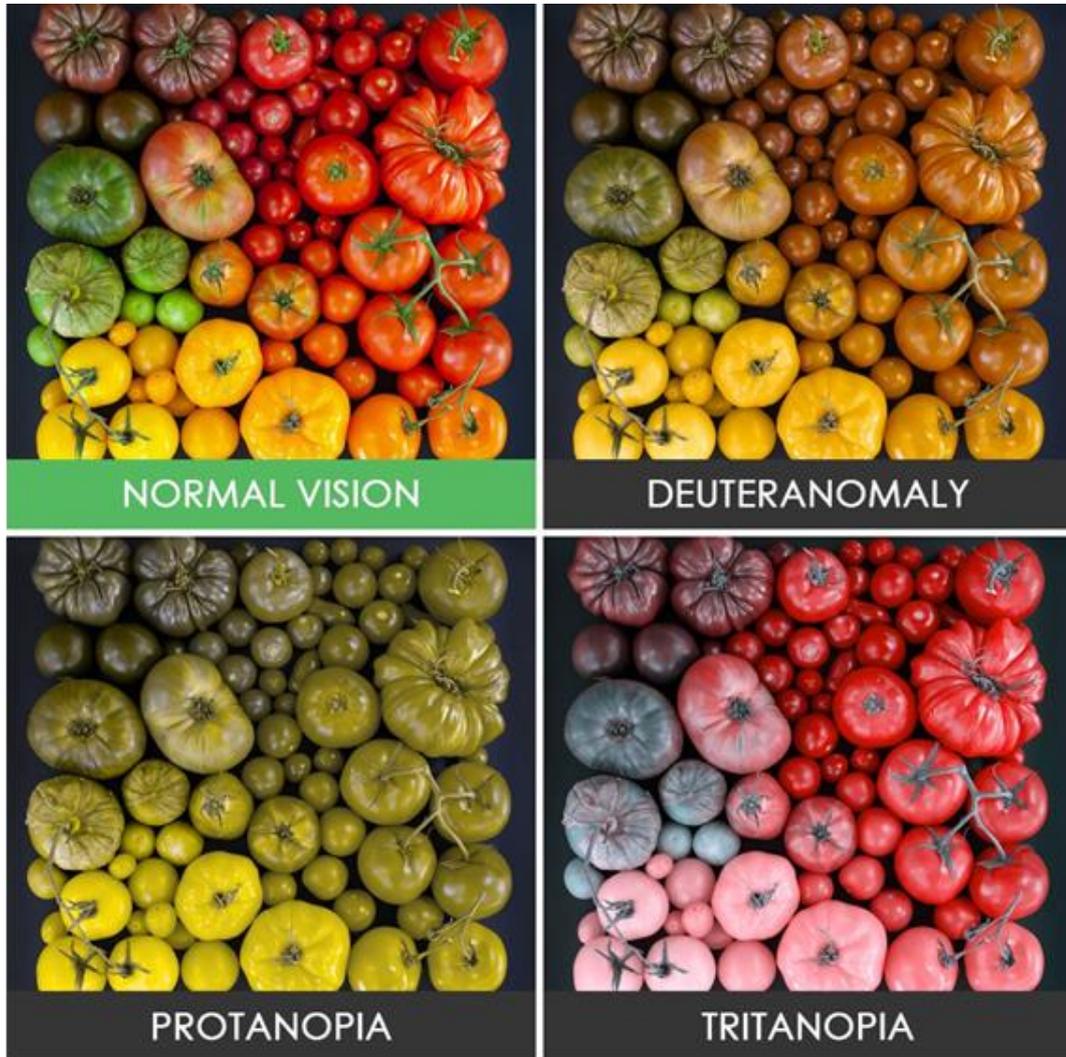


Figura 9 Comparazione tra la visione di un soggetto normale e soggetti affetti da anomalie della percezione cromatica quali: protanopia, deuteranomalia e tritanopia (dal sito <http://factsverse.com/color-blind-people-see-world>).

2.2 Difetti acquisiti nella visione dei colori

Le carenze acquisite della visione del colore possono insorgere in qualsiasi momento della vita a causa di malattie generali o oculari, traumi, farmaci o in conseguenza dell'esposizione a sostanze tossiche. Sono spesso variabili nel loro corso e fluttuano nella severità, causando difetti che potrebbero non essere stabili e solitamente sono unilaterali e asimmetrici al contrario di quelli ereditari che sono bilaterali e simmetrici (Blake and Sekuler, 2006). Oltre alle cause sopra descritte il cambiamento nella visione dei colori è dovuta ai processi fisiologici naturali di invecchiamento come l'ingiallimento dei media oculari (Swanson and Cohen, 2003) o i cambiamenti nella sensibilità retinica (Nathan, 2002).

In generale, si possono distinguere tre tipi di difetti della visione dei colori e Birch (Birch, 1993) classifica le forme acquisite in:

- Tipo 1 (rosso-verde): simile a un difetto protan congenito, il picco della curva di efficienza luminosa è spostato verso le lunghezze d'onda brevi.
- Tipo 2 (rosso-verde): simile a un difetto deutan congenito, ma con maggiore riduzione della sensibilità spettrale a lunghezza d'onda brevi.
- Tipo 3 (blu): simile a un difetto tritan ma con picco della curva di efficienza luminosa spostato verso le lunghezze d'onda brevi.

Come regola generale, le lesioni della coroide tendono a causare anomalie giallo-blu, le lesioni della retina causano anomalie giallo-blu o rosso-verde e le lesioni del nervo ottico tendono a causare anomalie rosso-verde. Esistono anche altre malattie che possono causare deficit di colore e sono il diabete, il glaucoma, la degenerazione maculare, il morbo di Alzheimer, il morbo di Parkinson, la sclerosi multipla, l'alcolismo cronico, la leucemia e l'anemia falciforme (Grosvenor, 2002).

L'esposizione cronica a solventi industriali (ad esempio stirene, disolfuro di carbonio e miscele di solventi) e mercurio inorganico porta a difetti di tipo 3 (blu). Inoltre, i soggetti con una dieta inadeguata, in particolare quelli con carenza di vitamina A, presentano una forte costrizione del campo visivo e una riduzione generale della discriminazione di tonalità. Il miglioramento si ha con la

somministrazione di vitamina A (Rosenfield, 2009). Da ciò si deduce che le forme acquisite possono essere di gravità variabile.

2.3 I test diagnostici

Molti sono i test per diagnosticare i problemi della visione dei colori e le persone cui è consigliato sottoporre i test di valutazione cromatica sono i bambini in età prescolare o i soggetti al primo esame visivo, tutti i soggetti con bassa acuità visiva di eziologia dubbia e con anamnesi che evidenzia problemi nella percezione cromatica. I test vengono effettuati alla fine dell'esame visivo optometrico con correzione, se necessaria, e con una buona illuminazione della stanza. Solitamente sono effettuati in modalità binoculare perché la maggior parte dei difetti sono di tipo congenito ma se si sospetta un'anomalia acquisita, si propongono i test monocolarmente.

2.3.1 *Tavole pseudoisocromatiche*

Il test di Ishihara è costituito da 38 tavole colorate, ognuna delle quali mostra un numero o un percorso composti da cerchi colorati di varie dimensioni che tendono a confondersi e mescolarsi con lo sfondo, anch'esso costituito da cerchi di dimensioni differenti e colore diverso (Fig.10). Il test deve essere tenuto all'altezza degli occhi ad una distanza di circa 40-50 cm, in una stanza ben illuminata e con la correzione per vicino quando necessaria.

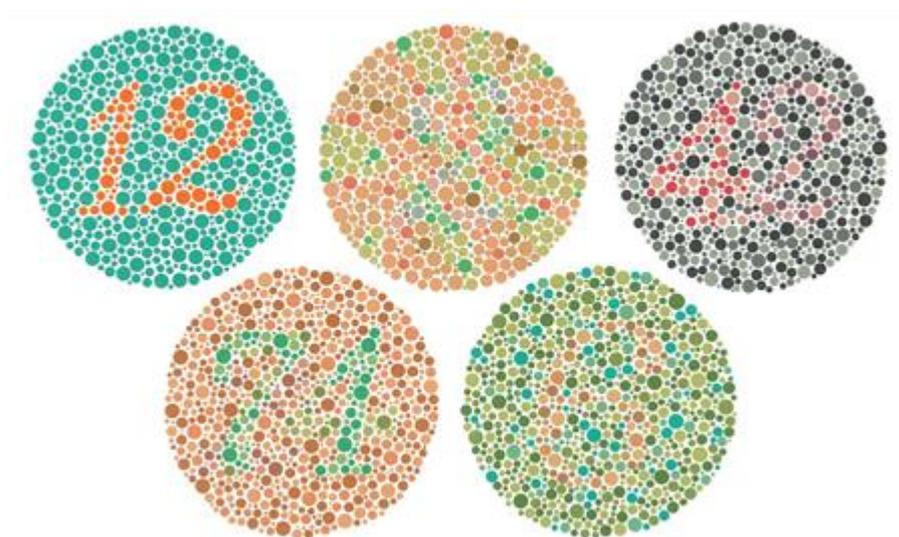


Figura 10 Tavole di Ishihara (dal sito <https://jeangalea.com/wp-content/uploads/2017/07/color-blindness.jpg>).

La prima tavola contiene il numero 12 e non è pseudoisocromatica, viene letta anche da chi vede male i colori. Dalla 2 alla 17 i numeri vengono letti male o per nulla dai soggetti con deficit rosso/verde. Nelle tavole 18-21 non sono contenuti numeri, che invece vengono letti da chi presenta una deficienza rosso/verde e non vengono riconosciuti da chi ha una visione normale dei colori. Le tavole 22-25 sono le più importanti, in quanto permettono di distinguere la vera cecità per un colore (protanopia o deuteranopia) dalla cecità parziale (protanomalia o deuteranomalia). Dalla tavola 27 alla 38 i numeri sono sostituiti da percorsi per gli illetterati (Ishihara, 1972).

Il test purtroppo non comprende la valutazione dei soggetti tritan, cioè con deficit giallo/blu che però vengono valutati dal test HRR costituito da 26 tavole (Handy, Randy e Rittler), composte da simboli quali il cerchio, la stella e il triangolo (Cole et al, 2006). Il test oltre a discriminare le varie anomalie ne identifica anche la gravità classificandole in lievi medie e severe.

2.3.2 Test di Farnsworth

Lo scopo principale di questi test è quello di disporre in modo ordinato le varie pastiglie colorate in base alla loro tonalità. Questa procedura permette di diagnosticare i difetti protan, deutan, tritan e la loro severità ed è anche utile negli screening per le anomalie acquisite. Esistono due versioni del test di Farnsworth: il D-15 (Fig.11), utilizzato nella pratica clinica e il test dei 100 toni, utilizzati nella ricerca (Elliott, 2014).



Figura 11 Test di Farnsworth D-15 (dal sito http://www.appstate.edu/~steelekm/classes/psy3215/ColorBlind/Farnsworth_D15.jpg).

Il test di Farnsworth D-15 è un test dicotomico, il cui principio consiste nel classificare in modo ordinato 15 dischi o pastiglie, aventi tonalità differenti, partendo dal disco di riferimento. I soggetti con difetti della visione del colore sono incapaci di discriminare certe tonalità e quindi li posizionano fuori ordine. La sequenza corretta è rilevata grazie al numero riportato dietro ogni disco in

modo tale che i numeri della successione, ordinata dal paziente, vengano trascritti su un grafico prestampato.

Unendo tutti i punti corrispondenti a tali numeri si avrà uno schema che esprimerà, per confronto con quella della successione standard, il senso cromatico del soggetto. Nell'ordine corretto, le linee che uniscono i numeri dall'1 al 15 ritracciano il cerchio di tonalità. Un esempio di errore minore potrebbe essere l'inversione dell'ordine dei dischi 5 e 6. Si verifica un errore grave quando i dischi distanti, ad esempio 3 e 12, sono posizionati uno accanto all'altro. La linea che collega questi dischi ora attraversa il cerchio di tonalità. I soggetti con normale visione dei colori fanno al massimo solo uno o due errori minori.

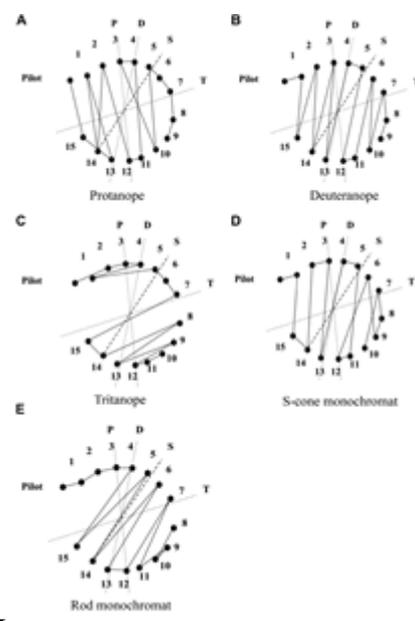


Figura 12 Risultati del test di Farnsworth D-15 (da M.P. Simunvic, Acquired color vision deficiency, Survey Ophtalmologic, 2016).

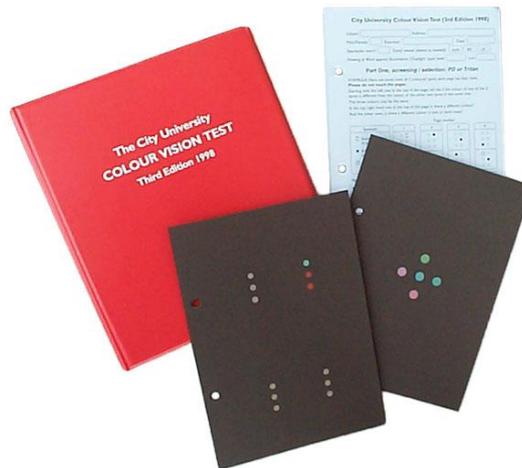
Occasionalmente una singola linea che attraversa il cerchio può verificarsi quando l'osservatore inverte parte della serie. I dicromati e i tricromati anomali estremi fanno più crossover (da 6 a 12), formando una serie di linee quasi parallele (Fig.12). L'asse delle linee di crossover è caratteristico del tipo di difetto; gli assi corrispondenti ai difetti protan, deutan e tritan sono indicati sul foglio di punteggio. (Simunovic, 2016; Collins et al, 1981).

Nel test di Fransworth-Munsell dei 100 toni, vengono utilizzate 85 pastiglie colorate. Lo svolgimento è lo stesso del test precedente e dura all'incirca 20-30 minuti, ma purtroppo non identifica la tricromia anomala.

2.3.3 The City University Colour test

Il professor John L. Barbur della City University di Londra, noto per le sue ricerche nel campo della visione dei colori e del daltonismo, con il suo team ha sviluppato un test denominato City University Colour Test (CUCT) che deriva dal test di Fransworth D-15 ma è di sensibilità maggiore per le forme acquisite e la tricromia anomala.

La versione più utilizzata è la terza edizione (Fig.13), costituita da due sezioni che possono essere usate in sequenza o separatamente. La prima sezione è costituita da quattro pagine dove sono presenti quattro linee verticali, contenenti ciascuna tre cerchi colorati, ed il soggetto deve rilevarne le differenze.



Questa parte viene utilizzata principalmente come test di screening però non distingue la separazione fra

Figura 13 The City University colour vision test, terza edizione (da R. Fletcher, *The City University Color Vision Test*, 1998).

protan e deutan. La seconda parte è costituita da pagine in cui quattro punti colorati circondano un punto centrale. Il soggetto deve scegliere un punto che corrisponda maggiormente al colore centrale. Questa seconda parte dà informazioni più precise sul tipo e sulla gravità del difetto cromatico (Fletcher, 1998).

2.3.4 Anomaloscopia di Nagel

Introdotta nel 1907, l'anomaloscopia di Nagel permette di riconoscere le anomalie di tipo rosso-verde mentre l'anomaloscopia di Pickford-Nicholson è utile per i difetti blu-giallo (Squire et al 2005). Esso è uno spettroscopio, costituito da un tubo con tre fessure attraverso cui passano una luce gialla, una verde e una rossa che si proiettano su un campo circolare diviso in due metà. La metà superiore riceve le luci rossa e verde, la metà inferiore quella gialla. Lo scopo del test è quello di bilanciare la luce rossa, verde e gialla, variandone l'intensità con due comandi, in modo da eguagliare il colore dei due semicampi. Se il paziente utilizzerà troppo rosso sarà affetto da un'anomalia protan mentre sarà un deuteranomalo se avrà dato una prevalenza alla componente verde (Pinckers, 1999). L'anomaloscopia è l'unico strumento clinico in grado di fornire una completa diagnosi delle anomalie della visione dei colori ma, essendo molto costoso, viene utilizzato difficilmente nella pratica comune.

2.3.5 Test delle lanterne

I test delle lanterne sono stati progettati come mezzi pratici per misurare la capacità di marinai, personale ferroviario e piloti di compagnie aeree il cui obiettivo principale è quello di determinare se i soggetti sono in grado di identificare correttamente le luci di segnalazione (Collins et al, 1981).

Ogni stato utilizza un tipo di lanterna basato su diversi principi di progettazione per cui si parlerà di lanterne di Holmes-Wright (UK), di Farnsworth (USA) e di Beyne (FR).

Capitolo 3

STRATEGIE DI COMPENSAZIONE DELLE DISCROMATOPSIE

Il colore, da sempre, è parte integrante della nostra vita, a partire dalle attività scolastiche e lavorative fino all'uso della tecnologia come smartphone, tablet e computer. Le persone con anomalie della visione del colore, disturbo che non rappresenta un limite per la salute o la longevità, hanno una possibile compromissione della vita e possono incontrare numerose difficoltà nella quotidianità. Un'accurata e sofisticata visione dei colori è di estrema importanza nel riconoscimento e nella risposta tempestiva agli stimoli come per esempio, le luci semaforiche mentre si guida e i segnali luminosi di pericolo, nella determinazione della cottura della carne, la freschezza di frutta e verdura, la scelta degli abbinamenti dei vestiti e anche in alcune attività lavorative.

Tali difficoltà sono state analizzate in uno studio condotto da Cole e Steward su 102 soggetti tra dicromati e tricromati anomali. Dai risultati dello studio (Fig.14) si nota che la maggior difficoltà è rappresentata dalla scelta dell'abbinamento

giusto per quanto riguarda vestiti e trucco. Per quanto riguarda i problemi nel riconoscimento dei segnali stradali essi si manifestano con la confusione delle luci dei semafori stradali o in generale delle illuminazioni degli altri segnali luminosi. Nell'ambito lavorativo i problemi sono relativi alla preclusione di alcune professioni, con limitazioni di carriera.

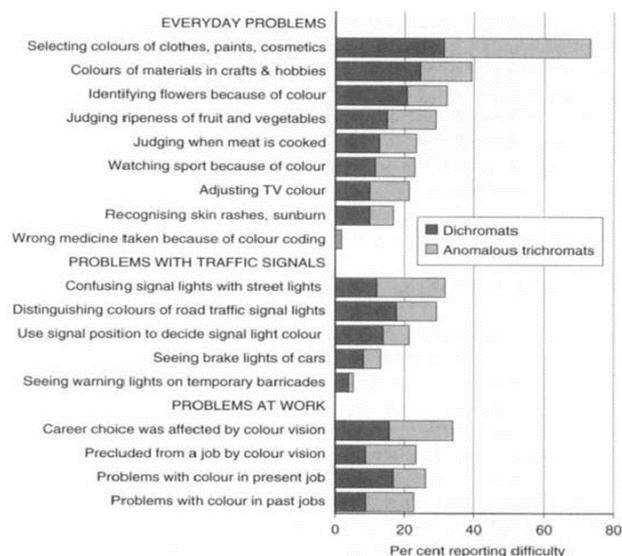


Figura 14 Percentuale delle difficoltà quotidiane riportate dai soggetti affetti da discromatopsia (da B.L. Cole et al, "The handicap of abnormal colour vision", Clinical and Experimental Optometry, 2004).

La percentuale, in questo caso, è comunque minore rispetto agli altri ambiti studiati e questo è dovuto al fatto che le suddette anomalie limitano già a monte l'assunzione del candidato. Vi sono infatti alcune professioni in cui come prerequisito per l'assunzione è necessario possedere una visione dei colori normale come nel caso di piloti, conduttori di treni e trasporti marittimi, industrie chimiche, plastiche e tessili, medici e grafici (Cole, 2004).

Per limitare gli svantaggi legati a questo deficit si sono ricercate delle strategie di compensazione per aiutare le persone affette da questo disturbo. Più di duecento anni fa uomini di scienza e non, proposero delle soluzioni palliative al daltonismo che però si rivelarono rimedi ciarlatani come iniezioni di veleno di cobra, prescrizione di multi-vitamine e addirittura somministrazione di scosse elettriche (Sharpe, 2001).

3.1 Dispositivi ottici con filtro colorato

Ad oggi non esiste un trattamento compensativo definitivo per i deficit visivi dei colori ma si è raggiunto un interessante risultato positivo grazie all'uso di speciali filtri colorati, inizialmente sotto forma di lenti filtranti da montare su occhiali, che venivano spesso specchiati in modo da farli somigliare ad occhiali da sole (Hodd, 1998) e di lenti a contatto poi, con una preferibile resa estetica. Questa strategia fu inizialmente proposta da Seebeck nel 1837, sviluppata da Maxwell e ripresa da altri come Schmidt (1976), Fletcher (1980) ed Egan (1982). Il principio di funzionamento è il medesimo sia per l'occhiale che per la lente a contatto: il filtro assorbe determinate lunghezze d'onda, permettendo di discriminare meglio i colori, modificando la percezione, la saturazione, la tonalità e la luminosità dello stimolo. Ad esempio una lente a contatto con filtro rosso blocca le lunghezze d'onda corte e trasmette le lunghezze d'onda lunghe lasciandole passare; in questo modo gli oggetti verdi appariranno più scuri mentre gli oggetti rossi appariranno più brillanti e chiari (Paulson, 1980).

Quando un oggetto con colori come il giallo, il verde e l'arancio è visto attraverso un filtro rosso, le parti di colore giallo-verde appaiono più scure e meno sature, mentre le parti arancio vengono viste più rosse e con colore più saturo. Grazie a

questa strategia il soggetto discromate sarà in grado di distinguere un maggior numero di colori (Hovis, 1997).

Le persone con visione tricromatica normale possiedono tre tipi di coni che rilevano il colore rosso, verde e blu. Le lunghezze d'onda che questi tre coni assorbono, presentano delle regioni sovrapposte e nel caso delle discromatopsie questo fenomeno si incrementa provocando un differente range di sensibilità dei fotorecettori. Per esempio nel caso di un soggetto deuteranomalo lo spostamento della lunghezza d'onda media verso la lunghezza d'onda lunga provoca una loro sovrapposizione che porta ad una difficile percezione delle sfumature verdi e gialle.

Per compensare questo difetto, Colorite ha sviluppato un filtro appositamente progettato che permette di spostare la sensibilità del cono di lunghezza d'onda media difettosa molto vicino a quella normale lasciando intatta la sensibilità della lunghezza d'onda corta e causando una piccola deviazione nella sensibilità alla lunghezza d'onda lunga. In questo modo la capacità di visione dei colori del soggetto è stata ripristinata e risulta essere molto simile a quella normale (Colorlite, 2016).

Oltre ai filtri sopraccitati gli occhiali EnChroma utilizzano un filtro per tagliare le lunghezze d'onda sovrapposte, consentendo una più chiara distinzione dei colori, in particolare il rosso e il verde (EnChroma, Cross, 2016).

Altri noti filtri sono: X-Chrom (Zeltzer, 1971), JLS (Schalanger, 1984), ChromaGen (Harris, 1996).

La lente X-Chrom, inventata da Harry I Zeltzer nel 1971, è una lente a contatto di colore rosso applicata monocularmente, preferibilmente sull'occhio non dominante. La lente a contatto, neutra o graduata, può essere morbida o rigida a seconda delle necessità del soggetto. Inoltre, la porzione colorata, solitamente di 6 mm ricopre interamente la zona pupillare e parte dell'iride, mentre la parte restante rimane chiara.

Essa agisce essenzialmente come un filtro passa-alto, cioè attenua le lunghezze d'onda inferiori e lascia passare quelle superiori, simile al filtro Kodak Wratten 23 o 35, utilizzato nella compensazione delle discromatopsie (Sharpe, 2001; Rossetti e Gheller, 2003).

L'occhio con la lente a contatto permette al soggetto con deficit rosso-verde di vedere gli oggetti verdi più scuri e quelli rossi più chiari, mentre l'occhio controlaterale, senza lente, vede lo spettro giallo-blu. Il principio alla base di questa tecnica applicativa è definito rivalità retinica, per cui poi sarà il cervello a estrapolare le informazioni necessarie per meglio distinguere le sfumature di colore (Schwartz, 2004; Paulson, 1980; Zeltzer).

Da alcuni studi condotti sulle lenti X-Chrom è emerso che il dispositivo permette di migliorare la performance nei test standard in maniera più efficace per i tricromati anomali piuttosto che per i dicromati. Shodhi PK et al., hanno esaminato le lenti X-Chrom su 51 soggetti con difetti visivi usando le tavole di Ishihara, l'anomaloscopio e la lanterna verde di Edridge. I risultati ottenuti hanno mostrato un notevole miglioramento della performance con le tavole pseudoisocromatiche e l'anomaloscopio, ma non con la lanterna (Sodhi, 2017).

Qualsiasi vantaggio offerto da tali dispositivi è limitato a compiti specifici o a regioni di tonalità e può essere soggetto a effetti collaterali tra cui la riduzione della luminanza e dell'acuità visiva, distorsioni visive indotte, stereopsi e percezione della profondità alterate (Sharpe, 2001).

La JLS è una lente a contatto blu-verde che se applicata monocolarmente segue lo stesso principio della lente Zeltzer X-Chrom. L'obiettivo di questo dispositivo è stato testato da Schlanger su 24 pazienti con deficit dei colori e solo in 17 hanno mostrato un miglioramento del 62%. L'autore ha concluso che la luminosità differente percepita dai due occhi gioca un ruolo fondamentale nel miglioramento della discriminazione dei colori (Schlanger, 1985).

Un altro dispositivo ottico utilizzato per migliorare la percezione cromatica è la serie di occhiali e lenti a contatto ChromaGen. Il sistema di lenti è stato sviluppato nel 1996 da un ottico inglese di nome David Harris.

L'efficacia di queste lenti è stata analizzata in uno studio condotto da Swarbrick su 14 soggetti con deficit della visione cromatica (Fig.15).

Le lenti applicate in questo studio sono costruite in materiale Benz 5X 55% Filcon 4a (Harris, 1997), disponibile in tre diverse curve base (8.30mm, 8.60mm e 8.90mm) e con un diametro totale di 14.5mm. Il diametro del filtro colorato varia da 5.6 a 7mm, a seconda delle dimensioni pupillari in condizioni scotopiche. Le

colorazioni disponibili sono sette: magenta, rosa, viola, giallo, azzurro, arancione e verde e la loro densità varia in leggera, media e scura.

Subject no.	Age (years)	Sex	Anomaloscope results		CVD diagnosis
			Range	Midpoint	
1	19	F	62-64	63	Protanomalous
2	19	M	54-58	56	Protanomalous
3	25	M	0-72	(36)	Protanope
4	17	M	0-72	(36)	Protanope
5	16	M	0-72	(36)	Protanope
6	21	M	21-24	22.5	Deuteranomalous
7	24	M	0-36	18	Deuteranomalous
8	25	M	11-30	20	Deuteranomalous
9	35	M	21-27	24	Deuteranomalous
10	34	M	11-46	29	Deuteranomalous
11	30	M	0-72	(36)	Deuteranope
12	26	M	0-72	(36)	Deuteranope
13	22	M	0-72	(36)	Deuteranope
14	24	M	0-72	(36)	Deuteranope

Figura 15 Dettagli dei soggetti con CVD (deficit di visione dei colori) e risultati dell'anomaloscopia (da H.A. Swarbrick, "The ChromaGen contact lens system: colour vision test results and subjective responses", *Ophthalmic & Physiological Optics*, 2001).

Il test di Ishihara, il test di Farnsworth D-15 e la lanterna di Farnsworth sono stati somministrati ai soggetti prima e dopo il porto della lente che è durato due settimane. Nell'arco di questo tempo i soggetti hanno registrato giorno per giorno le proprie sensazioni visive su un diario, classificandole su una scala da 0 a 10, dove 0=peggiore assoluto, 5=nessun cambiamento e 10=totalmente positivo, e in tutti è stato evidenziato un miglioramento soggettivo della percezione dei colori.

I risultati dello studio hanno mostrato che le lenti ChromaGen hanno ridotto significativamente il punteggio di errore del test di Ishihara, in particolare per i soggetti deutan. Per il test di Farnsworth D-15 i risultati sono variabili a seconda dei soggetti, prevalentemente nei deutan vi è un miglioramento mentre per i protan vi è un peggioramento. Nessun miglioramento è stato rilevato con la lanterna di Farnsworth (Swarbrick et al, 2001).

Un altro studio è quello effettuato da Oriowo e Alotaibi su un gruppo di 13 studenti della scuola di Riyadh. I partecipanti sono tre protanomali, due protanopi, sei deuteranomali e due deuteranopi, così classificati grazie all'anomaloscopia (Fig.16).

Subject Number	Age (Years)	Type of CVD	Dominant eye	Number of pages identified correctly without lens	Chromagen filter lens tint selected	Number of pages identified correctly with Chromagen lens	Percentage improvement
1	13	Deuteranomaly	OD	10	Orange	14	27%
2	18	Deuteranomaly	OD	7	Magenta	14	47%
3	12	Deuteranomaly	OD	9	Magenta	14	33%
4	17	Deuteranopia	OD	1	Magenta	11	67%
5	8	Deuteranomaly	OS	6	Pink	10	27%
6	13	Deuteranopia	OD	1	Pink	12	73%
7	8	Protanomaly	OD	9	Pink	12	20%
8	16	Protanomaly	OD	7	Magenta	11	27%
9	20	Protanomaly	OD	10	Pink	14	27%
10	9	Protanopia	OS	1	Magenta	10	60%
11	14	Deuteranomaly	OS	8	No choice	No difference	NA
12	16	Deuteranomaly	OD	4	Magenta	12	53%
13	15	Protanopia	OD	1	No choice	No difference	NA

Figura 16 Elenco dei partecipanti allo studio, scelta della tinta ChromaGen e risultati del test d Ishihara prima e dopo l'applicazione (da O.M. Oriowo et al, "Chromagen lenses and abnormal colour perception", The South African Optometrist, 2011).

I soggetti hanno eseguito il test di Ishihara prima e dopo la scelta dei filtri colorati e si è visto che solo 11 dei soggetti (85%) hanno avuto un notevole miglioramento, mentre i due restanti (15%) non hanno riportato alcuna differenza. In accordo con lo studio condotto precedentemente da Swarbrick et al, i risultati mostrano che i soggetti deutan hanno tratto maggior beneficio dall'uso delle lenti ChromaGen (Oriowo et al, 2011).

Entrambi gli studi tengono a sottolineare che nonostante il miglioramento nella discriminazione dei colori, le lenti non forniscono una vera e propria percezione cromatica normale, ma permettono di identificare sfumature di colori che in precedenza non venivano distinte.

Dagli studi riportati si può dedurre che l'utilizzo delle lenti a contatto può cambiare e migliorare la vita dei discromati: il loro utilizzo ne favorisce l'aspetto estetico e addirittura le interazioni sociali perché, al contrario, l'occhiale è molto più identificabile e riconoscibile. La lente a contatto, avendo un filtro colorato di piccole dimensioni, si rende sicuramente molto meno visibile soprattutto in quei soggetti con iride scura e generalmente si preferisce una colorazione media piuttosto che scura perché in tal modo la visione risulta ottimale anche in condizione di scarsa luminosità (Sharpe, 2001). Un altro particolare da non sottovalutare è il diametro del filtro che dovrebbe essere maggiore dei margini pupillari per evitar il fenomeno dell'abbagliamento.

Inoltre, come mostrano gli studi condotti da Schornack (Schornack et al., 2007) e Severinsky (Severinsky, 2016), molto spesso le lenti a contatto con filtro colorato rosso (Fig.17), vengono utilizzate per alleviare la fotofobia, ridurre l'abbagliamento e quindi migliorare la performance e la qualità di vita in soggetti con acromatopsia e problemi retinici.

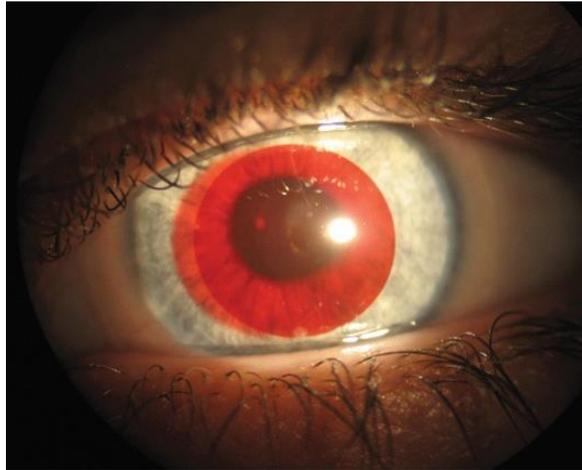


Figura 17 Lente a contatto in Filicon II hydrogel con filtro rosso di 7.00mm e diametro totale di 14.50mm (Soflex Ltd., Mishgav, Israel), utilizzata per alleviare la fotofobia nei soggetti con acromatopsia (da B.Severinsky, "Red-Tinted Contact Lenses May Improve Quality of Life in Retinal Diseases", Optometry Vision Science, 2016).

Sicuramente la lente a contatto è molto più confortevole ed

esteticamente ha un impatto meno evidente, ma richiede una maggiore attenzione rispetto agli occhiali: non tutti sono portatori ideali di lenti a contatto, poiché essendo quest'ultima un dispositivo medico appartenente alla classe IIA, che va ad inserirsi a livello della superficie oculare, potrebbe non interagire al meglio con il film lacrimale ed in generale con la fisiologia dell'occhio. Affinché il soggetto possa utilizzare le lenti a contatto è doveroso effettuare tutti gli esami necessari per osservare e misurare la superficie oculare, certi dell'assenza di patologie oculari, traumi, infezioni e infiammazioni e qualunque condizione ne limiti l'applicazione. È necessario inoltre informare il soggetto sulle tecniche di pulizia e conservazione delle lenti a contatto e monitorare periodicamente, con dei follow-up, l'andamento dell'applicazione (Rossetti e Gheller, 2003).

È molto importante quindi valutare l'interazione lacrima-lente ricercando materiali biocompatibili con la struttura oculare.

In questo campo si sono mossi i ricercatori dell'Università di Birmingham che stanno mettendo a punto delle lenti a contatto per la correzione del daltonismo che funzionano grazie ad un colorante sicuro per la salute umana, di derivazione naturale ed economico.

Queste lenti sfruttano un colorante fluorescente a base di rodamina, 6-(2,5-dicarbossifenil)-1,11-dietil-3,4,8,9,10,11-esaidro-2H-pirano[3,2-g:5,6-g']

dichinolin-1-io, in grado di assorbire determinate lunghezze d'onda nell'intervallo rosso-verde, con banda di assorbimento 545-575nm e picco a 565nm. L'assorbimento di questa banda permette l'inattivazione simultanea dei coni M e L consentendo in questo modo una migliore differenziazione tra i colori rosso e verde. La tossicità del colorante è stata valutata utilizzando l'MTT, 3-(4,5-dimetiltiazolo-2-il)-2,5-difeniltetrazolo bromuro, e si è giunti alla conclusione che esso non è tossico né per i fibroblasti corneali né per le cellule epiteliali umane.

Le lenti colorate, applicate a un vetrino, sono state testate su persone con deficit di visione del colore rosso-verde. Ai partecipanti è stato chiesto di guardare alcuni numeri attraverso il vetrino e di notare se c'erano dei miglioramenti nei colori, nella chiarezza del numero e nell'osservazione dell'ambiente circostante. I risultati hanno mostrato che le lenti colorate possono essere utilizzate per migliorare la percezione del colore perciò grazie alla facilità del processo di produzione e al basso costo del colorante, queste lenti a contatto colorate possono essere promettenti per la gestione delle discromatopsie. Ulteriori studi sui pazienti sono attualmente in corso (Badawy, 2018).

3.2 Nuove speranze per la correzione delle discromatopsie: la terapia genica

La ricerca in ambito medico per le discromatopsie si rivolge a possibili terapie geniche. Mancuso et al., hanno esaminato l'effetto della terapia genica su scimmie scoiattolo adulte (*Saimiri sciureus*) cui mancava il gene L-opsina. In questa specie, alcune femmine hanno una visione a colori tricromatica mentre tutti i maschi sono dicromati con deficit rosso-verde. Due scimmie scoiattolo maschio sono state trattate con iniezioni sottoretiniche di virus adeno-associato ricombinante contenente il gene umano L-opsina. I due primati che sono stati precedentemente addestrati a eseguire a computer il Cambridge color test, modificato per uso animale, dopo circa 20 settimane dall'iniezione, hanno mostrato un miglioramento per le soglie blu-verde (490 nm) e rosso-violetto (499 nm). Ciò dimostra che le scimmie riconoscevano i due colori, segno di una nuova visione tricromatica acquisita.

Considerando alcune forme di deprivazione visiva che potrebbero portare alla perdita irreversibile della funzionalità visiva, se non diagnosticate nel periodo

critico, si pensava che la terapia genica non funzionasse in scimmie già adulte. I risultati clinici hanno dimostrato il contrario e cioè che il miglioramento nell'identificazione dei colori può avvenire anche in età adulta.

I risultati degli esperimenti per il trattamento delle discromatopsie nei topi (Neitz, 2007) e nei primati non umani (Mancuso et al., 2009) forniscono importanti lezioni su come i circuiti preesistenti possano essere sfruttati in risposta a nuovi input aggiunti in età adulta. La capacità del cervello dei primati adulti di adattarsi a nuovi input apre ulteriori strade nella ricerca della terapia genica che si spera venga applicata al più presto anche agli umani che presentano anomalie nella visione dei colori.

CONCLUSIONE

In questa tesi si è voluto trattare l'affascinante tema della visione dei colori fornendo una panoramica relativa al senso cromatico, cercando di abbracciarne la problematica più significativa è cioè le discromatopsie, con relativa compensazione attraverso l'uso di speciali filtri colorati.

Ogni individuo percepisce il colore degli oggetti in maniera strettamente personale e oltre agli aspetti fisiologici entrano in campo infatti numerosi fattori quali lo stato d'animo, le emozioni, le condizioni fisiche, psichiche e anche la propria sensibilità.

Nel campo della percezione visiva i colori suscitano determinate sensazioni. Che sui rubinetti ci sia il blu per l'acqua fredda e il rosso per quella calda non è casuale. Nei sistemi di salvataggio i contrasti di colore hanno spesso una funzione di vitale importanza: un canotto di colore arancione sull'azzurro del mare ha un carattere segnaletico ben preciso. Il rosso nelle luci dei semafori e nei cartelli segnaletici sta a indicare pericolo ed aumenta quasi automaticamente l'attenzione. Un ruolo importante è anche quello del simbolismo cromatico, per cui i colori risvegliano determinate sensazioni, immagini o sentimenti: il nero si identifica con il lutto, il bianco con i nobili sentimenti e lo stato di purezza e per questo viene utilizzato come colore per l'abito da sposa. Il rosso si identifica con l'amore, la passionalità e l'energia vitale, l'azzurro trasmette calma e tranquillità, il giallo è il simbolo della luce del sole ma anche della conoscenza e dell'energia ed è per questo che è il colore indossato dai monaci buddisti, infine il verde emana senso di equilibrio compassione, armonia e trasmette amore per tutto ciò che riguarda il regno della natura.

Se nella vita di tutti i giorni distinguere i vari colori è utile per associare le scarpe alla borsa, per godere delle meraviglie dei pittori e degli scultori al museo e per essere appagati dalla vista del panorama in montagna, per altri è fonte di sostentamento. Infatti per stilisti, costumisti, designer, grafici e arredatori il colore

è il primo elemento che cattura l'attenzione di un potenziale acquirente e quello decisivo nella definizione ultima dell'acquisto.

A teatro le luci colorate possono attirare l'attenzione su eventi significativi creando effetti speciali, stati d'animo particolari e dando carica espressiva alla scena. Il tecnico della luce è un lavoro determinante anche negli spettacoli musicali dove un arcobaleno di luci può accompagnare un ritmo veloce, mentre una luce soffusa è l'ideale per un assolo musicale.

Anche nel mondo animale e vegetale il colore è determinante nella vita: il pavone distende la sua ruota colorata per attirare la femmina e dare il via al corteggiamento e poi all'accoppiamento; il camaleonte si confonde nella vegetazione per procurarsi il cibo, gli insetti sono attratti dai fiori più colorati e brillanti sui quali si posano sporcandosi di polline che poi depositeranno su altri fiori proseguendo così il ciclo della vita.

Purtroppo per numerose persone l'esperienza del colore è negata completamente o parzialmente e tale handicap può portare a fenomeni di isolamento in età pediatrica o di gravi insicurezze in età adulta.

Molto spesso infatti non ci rendiamo conto di quanto sia limitante una vita senza colori in ambito sportivo, educativo-scolastico e lavorativo. Ad esempio tali persone sono svantaggiate nella codificazione delle informazioni mediante l'uso del colore, come nel caso delle luci semaforiche, dei segnali stradali e delle luci utilizzate in marina o nell'aviazione per segnalare la partenza o l'arrivo di una nave o di un aereo.

Anche in campo medico uno studio effettuato da Spalding ha evidenziato che numerosi medici e tecnici di laboratorio con deficit cromatico riscontravano difficoltà nella loro professione, infatti risultava loro difficile vedere eruzioni cutanee, ittero e i segni di alcune malattie come pallore, arrossamento e cianosi (Spalding, 1993).

Per far fronte a questi problemi, in ambito optometrico, si sono ricercate delle strategie compensative per le discromatopsie e si sono sviluppati dei dispositivi sotto forma sia di lenti oftalmiche che di lenti a contatto contenenti un filtro colorato.

I filtri modificano la visione delle persone che li utilizzano, variando la percezione dei colori, i contrasti e la luminosità. Si parla di filtri selettivi che permettono il passaggio di determinate lunghezze d'onda, ad esempio nei casi dei deficit rosso-verde, il filtro assorbe le lunghezze d'onda corte e permette la trasmissione delle lunghezze d'onda medie e lunghe, aiutando in questo modo il soggetto a discriminare in maniera più efficace i colori.

Il principio su cui si basano i filtri colorati è lo stesso sia per gli occhiali che per le lenti a contatto; la differenza di luminosità percepita dal soggetto permette a quest'ultimo di identificare gli oggetti rossi come più brillanti e gli oggetti verdi come più scuri. Gli studi effettuati su soggetti affetti da discromatopsia, tricromia anomala e acromatopsia hanno permesso di identificare l'obiettivo principale dei filtri colorati e cioè quello di rendere la curva di sensibilità spettrale simile a quella dei soggetti con visione tricromatica normale.

I benefici che i soggetti traggono nell'indossare i filtri colorati sono il miglioramento della performance ai test per la rilevazione delle anomalie cromatiche e una ottimizzazione della discriminazione dei colori.

Al momento esiste una grande lacuna per quanto riguarda la compensazione dei deficit giallo-blu, ma studi che si stanno svolgendo presso l'Università di Birmingham e altri riguardanti la terapia genica si stanno muovendo in questo ambito per sopperire a tale mancanza.

Sebbene l'uso di lenti oftalmiche e di lenti a contatto con filtro colorato migliorino indiscutibilmente il modo di vedere i colori degli oggetti che ci circondano, queste soluzioni compensative non risultano essere molto utilizzate a causa del loro costo. Inoltre se per alcune persone affette da un grave deficit di percezione cromatica questo problema è invalidante e si può tradurre in un vero e proprio handicap, per altri che presentano deficit minori può non esserlo. I soggetti imparano a convivere con la loro discromatopsia e, addirittura, in alcuni casi lievi non sanno di esserne affetti o lo scoprono in tarda età.

È comunque importante ricordare che chi usufruisce di tali strategie migliora il proprio modo di vedere e ciò si traduce in un beneficio non solo in termini visivi ma anche in termini di qualità della vita.

BIBLIOGRAFIA

- ALLARIA B., Dr. G. REVERDY, HOGNESSL D.S., “Protezione dagli UV nelle lenti oftalmiche”, *Professione ottico edizione di Medical Evidence*, anno terzo, numero 19, (marzo 2010), pp.1-5.
- BADAWY A.R., Dr. M.U. HASSAN, ELSHERIF M., Dr. H. BUTT, “Contact Lenses for Color Blindness”, *Advance. Healthcare Materials* 7:1800152 (2018), pp.1-7.
- BIRREN F., *Colore. Natura, storia, proprietà e usi*, Milano, IdeaLibri, 1987, 2^a, pp.10-46.
- BLAKE R. SEKULER R., *Perception*, New York, McGraw-Hill Companies, 2006, 5^a, pp. 233-271
- BRESSAN P., *Il colore della luna. Come vediamo e perché*, Roma, Laterza Editori, 2007, pp. 20-80.
- BROWN P.K. and WALD G., “Visual pigments in single rods and cones of the human retina”, *Science* 144 (1964), pp.45-51.
- BUCCI M.G., *Oftalmologia*, n.l., Società editrice universo, 1993, pp.267-271, 299-300
- CASCO C., *Vedere*, Torino, Bollati Boringhieri editore, 1992, pp.20-46, 71-96, 138-159.
- COLE B.L., “The handicap of abnormal colour vision”, *Clinical and Experimental Optometry* 87:4-5 (2004), pp.258-275.
- COLE B.L., LIAN K.Y, LAKKIS C., “The new Richmond HRR pseudoisochromatic test for colour vision is better than the Ishihara test”, *Clinical and Experimental Optometry* 89:2 (marzo 2006), pp.73-80.

- COLLINS B., POKORNY J., SHEVELL S. et al., "Procedures for Testing Color Vision: Report of Working Group 41", Committee on Vision Assembly of Behavioral and Social Sciences National Research Council, Washington DC, National Academies Press (US), 1981, pp.14-78.
- CURCIO CA., ALLEN KA., SLOAN KR., LEREA CL., HURLEY JB., KLOCK IB. and MILAM AB., 1991 "Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin", *Journal of Comparative Neurology*, 312:610-624 in *The Human Eye*, CW. OYSTER, Sunderland, Massachussets; Sinauer Associates Publisher, 1999, pp.668.
- DE GRANDIS L., *Teoria e uso del colore*, Milano, Mondadori, 2000, 3^a, pp. 11-52.
- DE VALOIS R.L., ABRAMOV I., JACOBS G.H., "Analysis of response patterns of LGN cells", *Journal of the Optical Society of America* 56:7 (1966), pp.966-977.
- ELLIOTT D.B., *Primary eye care*, USA, Elsevier, Bradford UK, 2014, 4^a, pp. 50-64.
- FLETCHER R., *The City University Color Vision Test*, City University, Londra, 1998, 3^a, pp.1-8.
- GANONG W.F., *Fisiologia medica*, Giulio Stella, Padova Piccin Editore, 1979, 3^a, pp.85-101.
- GREGORY R.L., *Occhio e cervello. La psicologia del vedere*, Londra, Raffaello Cortina Editore, 1990, 4^a, pp. 35-81, 135-150.
- GROSVENOR T., *Primary care Optometry*, USA, Butterworth Heinemann, 2002, 4^a, pp. 130, 149-152, 203-205.
- HAEGERSTROM-PORTNOY G., SCHNECK M.E., VERDON W.A., HEWLETTS S.E., "Clinical Vision Characteristics of the Congenital Achromatopsias. II. Color Vision", *Optometry and Vision Science* 73:7 (giugno 1996), pp.457-465.
- Handbook of Optics* (sponsored by the Optical Society of America), n.l., McGraw-Hill Companies, 3^a, vol. III pp.11.1-11.85.
- HODD N.B., "Putting ChromaGen to the test", *Optometry Today*, 1998, pp. 39-42.

- HOVIS J.K., “Long Wavelength Pass Filters Designed for the Management of Color Vision Deficiencies”, *Optometry Vision Science*, 74 (1997), pp.222-230.
- HUMPHREY N., “*The Colour Currency of Nature*”, 1976, in *Colour for Architecture*, ed.T. Porter, B. Mikellides, Londra, pp. 95-98.
- HUNG G.K., CIUFFREDA K.J., *Models of the Visual System*, New York, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp 109-113.
- INGS S., *Storia naturale dell’occhio*, traduzione di Allegra Panini, Torino, Giulio Einaudi editore, 2008, pp.247-267.
- ISHIHARA S., *The series of plates designed as tests for colour-blindness*, Tokyo, Japan, Kanehara Shuppan Co. LTD, 1972.
- L’Enciclopedia, opera realizzata dalle Redazioni Grandi Opere di Cultura UTET, nl, gruppo editoriale L’Espresso SpA, vol.5, pp149-152.
- MAFFEI L., MECACCI L., *La visione, dalla neurofisiologia alla psicologia*, Milano, Mondadori, dicembre 1979, 1^a, pp. 97-116.
- MANCUSO K., HAUSWIRTH W., Q. LI, CONNOR T.B., KUCHENBECKER J.A., MAUCK M.C., NEITZ J., NEITZ M., “Gene therapy for red–green colour blindness in adult primates”, *Nature* 461 (2009), pp.784-788.
- MAZZOLDI P., NIGRO M., VOCI C., *Elementi di fisica*, Padova; EdiSES, 2002, 2^a, pp.253-275, 313-332.
- MIDENA E., *Malattie dell’apparato visivo*, n.l., Casa editrice Dott. Antonio Milani CEDAM, 2006, pp.1-18.
- MIOTTO E., *Luce e colori*, Milano, Fenice 2000, 1994, pp.46-55.
- MUSTAFA D., ENGEL A.H., PALCZEWSKI K., “Structure of Cone Photoreceptors”, *Progress in Retinal and Eye Research* 28:4 (luglio 2009), pp.289-302.
- NATHAN J., “The painter and handicapped vision”, *Clinical and Experimental Optometry*, 2002, 85:5 (2002), pp.309-314.

- NATHANS J., "The evolution and physiology of human color vision: insights from molecular genetic studies of visual pigments", *Neuron* 24:2 (ottobre 1999), pp.299-312 in *Visual perception*, USA, McGraw-Hill, 2004.
- NEITZ M., NEITZ J., "Curing color blindness-mice and nonhuman primates", *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine* 4:11, novembre 2014.
- ORIOWO O.M., ALOTAIBI A.Z. "Chromagen lenses and abnormal colour perception", *The South African Optometrist*, 70:2 (2011), pp.69-74.
- OTHA N., ROBERTSON A.R, *Colorimetry fundamentals and applications*, n.l., Wiley-IS&T, 2005, pp.1-62.
- OYSTER C.W., *The Human Eye*, Sunderland, Massachusetts, Sinauer Associates Publisher, 1999, pp.649-700.
- PALUMBI G., *Istologia e Anatomia umana normale*, Pavia; Milano, Napoli, Editrice Viscontea, 1962, 3^a, pp.462-463.
- PAULSON H.M., "The X-Chrom Lens for Correction of Color Deficiency", *Military Medicine* 145:8 (agosto 1980), pp.557-560.
- PINCKERS A., "Anomaloscope examination: scotopization (the luminance fall)", *Acta, Ophthalmologia Scandinavica*, 77 (1999), pp.552-554.
- POKORNY J., SMITH V.C., LUTZE M. (1987). Aging of the human lens. *Applied Optics* 26(8), 1437–1440 in "Color and language: worldwide distribution of Daltonism and distinct words for blue", A.M. BROWN, D.T. LINDSEY, *Visual Neuroscience*, Maggio 2004, 21(3):409-412.
- Regolamento CE della Commissione che stabilisce norme di attuazione dettagliate per l' idoneità medica del personale dell' aviazione civile ai sensi del regolamento (CE) n. 216/2008 del Parlamento europeo e del Consiglio, Commissione delle Comunità Europee, Bruxelles, pp. 22-24.
- ROSENFELD M., LOGAN N., *Optometry: Science, Techniques and Clinical Management*, New York USA, Birmingham UK, Elsevier, 2009, 2^a, pp. 299-316.

- ROSSETTI A., GHELLER P., *Manuale di optometria e contattologia*, Bologna, Zanichelli, 2003, 2^a, pp. 113-122, 143-149, 254-255.
- SACKS O., *L'isola dei senza colore*, New York, Adelphi, 1996.
- SCHLANGER J.L., "The JLS Lens: An Aid for Patients with Color Vision Problems", *American Journal of Optometry & Physiological Optics* 62:2 (1985), pp.149-151.
- SCHORNACK M.M., BROWN W.L., SIEMSEN D.W., "The use of tinted contact lenses in the management of achromatopsia", *Optometry*, 2007, 78:1.
- SCHWARTZ S.H, *Visual perception*, USA, McGraw-Hill, 2004, 3^a, pp.3-162.
- SEVERINSKY B., YAHALOM C., SEBOK T.F., TZUR V., DOTAN S., MOULTON E.A., "Red-Tinted Contact Lenses May Improve Quality of Life in Retinal Diseases", *Optometry Vision Science* 93:00 (2016), pp 2-6.
- SHARPE L.T., "I Used to Be Color Blind", *Color research and application* 26 (2001), pp.269-272.
- SHARPE LT., STOCKMAN A., JAGLE H., NATHANS J., (1999), "Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In: Gegenfurtner KR, Sharpe LT (eds) *Color vision: from genes to perception*. Cambridge University Press, New York, pp 3–51.
- SIMUNOVIC M.P., "Acquired color vision deficiency", *Survey Ophthalmology* 61:2 (2016) pp.132-55.
- SODHI P.K., SARAF S., KISHORE J., "Are X-Chrome Lenses an Occupational Succor for the Colour Vision Defectives?", *Journal of Research in Medical Sciences* 4:1:2 (2017), pp. 1-6.
- SPALDING J.A.B., "The doctor with an inherited defect of colour vision: effect on clinical skills", *British Journal of General Practice* 43 (1993), pp. 32-33.
- SQUIRE T.I., RODRIGUEZ-CARMONA M., EVANS A.D.B et al., "Color vision tests for aviation: comparison of the anomaloscope and three lantern types", *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 76:5 (2005), pp.421-429.

- STONE D., “Sull’isola dei daltonici, il paradiso ha una tonalità diversa” *National Geographic*, 26 gennaio 2018.
- SWANSON W.H., COHEN J.M., “Color vision”, *Ophthalmology Clinics of North America* 16:2 (giugno 2003), pp.179-203.
- SWARBRICK H.A., NGUYEN P., NGUYEN T., PHAMVIS P., “The ChromaGen contact lens system: colour vision test results and subjective responses”, *Ophthalmic & Physiological Optics* 21:3 (2001), pp.182-196.
- TOMITA T., KANEKO A., MURAKAMI M. and PAULTER E.L., “Spectral response curves of single cones in the carp”, *Vision Res.* 7 (luglio 1967), pp.519-531.
- WILDE O., *De Profundis*, 16^a, n.l, Feltrinelli, 2014.
- WYSZECKI G., *Color*, Chicago, World Book Inc., 2006:824 in *Discriminate or Diversity* di Enrique Ruiz, Maryland, USA, PositivePsycheBiz. Publication, 2009, p.174.
- ZELTZER H.I., “The X-Chrom Manual revisited”, pp.1-42.
- ZOCCHI L., *Principi di fisiologia*, Napoli, EdiSES s.r.l., 2012, pp.110-122.

SITOGRAFIA

<https://colorlitelens.com/color-blindness-correction-info.html>.

<https://www.technologyreview.com/s/how-enchromas-glasses-correct-color-blindness>.