

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

Valutazione dei Filtri Colorlite per la compensazione del deficit nella visione dei colori

Relatori:

Prof. Paolo Carelli

Candidato:

Francesca Di Rubbo

Matricola M44/403

A.A. 2016/2017

*Alle persone che più mi hanno aiutato ed insegnato,
mio padre e mia madre.*

Indice

Introduzione	4
1. Gli aspetti fisici della luce	
1.1. La luce: Cenni storici.....	5
1.2. Le onde elettromagnetiche.....	6
1.3. La radiazione visibile.....	7
1.4. La temperatura di colore.....	8
2. La fisiologia del colore	
2.1. La struttura retinica.....	10
2.2. La visione scotopica e fotopica.....	11
2.3. La visione cromatica.....	12
3. La psicofisica del colore	
3.1. Le caratteristiche del colore.....	14
3.2. Sintesi additiva e sottrattiva.....	14
3.3. Principali fenomeni della percezione dei colori.....	16
3.4. Modelli rappresentativi dei colori.....	18
3.4.1. Primo modello: Disco rotante di Newton.....	18
3.4.2. Diagramma cromatico CIE standard.....	18
4. Test e alterazione del colore	
4.1. Alterazioni della percezione cromatica.....	20
4.1.1. Il daltonismo.....	20
4.1.2. Tricromia anomala.....	20
4.1.3. Dicromie.....	21
4.1.4. Discromatopsie congenite e acquisite.....	23
4.2. Test per l'individuazione delle alterazioni cromatiche.....	24
4.2.1. Test pseudoisocromatici: Tavole di Ishihara.....	24
4.2.2. Test di classificazione: Farnsworth 15 Tinte.....	25
4.2.3. Test di eguaglianza: Anomaloscopia di Nagel.....	26
4.2.4. Test ColorLITE.....	27
5. Valutazione dei filtri ColorLite per la compensazione della CVD	
5.1. Scopo.....	29

5.2.	Studio dei filtri ColorLite con uno spettrofotometro.....	30
5.3.	Strumenti e metodo.....	31
5.4.	Analisi dati dei soggetti.....	31
5.5.	Discussione risultati.....	38
5.6.	Cure future.....	39
Conclusioni		40
Bibliografia		41
Elenco Figure		42
Ringraziamenti		43

Introduzione

Il deficit nella visione dei colori (Color vision deficiency o CVD), in particolare di tipo rosso-verde (RG), meglio conosciuta con il termine di daltonismo, ha principalmente origine genetica e deriva dal difetto del cromosoma X, colpendo in questo modo l'8% della popolazione maschile e lo 0,5% della popolazione femminile. Si tratta di un'anomalia che interessa i coni, cellule fotorecetrici presenti nella retina deputate al riconoscimento dei colori. In una retina, in media, ci sono 6 milioni di coni suddivisi in tre tipologie: i coni L (che assorbono prevalentemente luce rossa), S (blu) e M (verde). In un individuo daltonico una di queste tipologie di coni è assente, oppure funziona in maniera anomala. Ad oggi, non esiste alcuna cura per il deficit nella visione dei colori. Tuttavia, ci sono in commercio specifiche lenti filtranti per migliorare il contrasto di colore per gli individui affetti da CVD. Recentemente, sono nati i filtri EnChroma, i quali sono stati già oggetto di studi ottenendo non in tutti i casi significativi miglioramenti. Lo scopo di questa tesi è valutare la validità di un'altra tipologia di filtri chiamati Colorlite, proponendo a 12 soggetti test specifici che ci permettono di appurare o meno l'effettiva compensazione della discromatopsia attraverso il confronto dei dati. Naturalmente, non si tratta del primo tentativo di risolvere il problema con accessori correttivi, da tempo infatti esistono lenti a contatto e occhiali creati appositamente per compensare i difetti cromatici. Inoltre sono disponibili una serie di app per smartphone e tablet che possono risultare utili, anche se, nessuna di queste opzioni si era rivelata veramente funzionale. In questa tesi verranno poi trattati brevemente gli aspetti fisici della luce, il colore e le sue caratteristiche e la struttura retinica, al fine di comprendere come l'apparato visivo elabora i messaggi inviati dalla luce.

Capitolo 1:

Gli aspetti fisici della luce

Per le persone comuni i colori sono caratteristiche intrinseche degli oggetti: ci sembra del tutto scontato e naturale che i colori siano una caratteristica delle cose stesse. Per i pittori sono pigmenti che permettono di creare un quadro. Per un fisiologo sono una risposta del cervello. Per lo psicologo sono un fenomeno di percezione. Per un fisico invece sono aspetti dell'energia radiante: la visione, vedremo, dipende dalla luce: è la luce che ci porta informazioni sulla forma e sul colore degli oggetti del nostro ambiente. In una stanza completamente buia, pur continuando ad esistere le cose intorno a noi, non appare alcuna immagine di esse. Oggi sappiamo con certezza che il colore non è una caratteristica del mondo reale, ma il complesso risultato dell'effetto della luce sul sistema percettivo. La visione del colore è quindi un fenomeno complesso nel quale intervengono molti fattori quale la luce, le relazioni occhio/cervello, le interazioni di "assorbimento e riflessione" e "rifrazione" e anche fattori genetici, che possono influire sulla maggiore o minore ricchezza di sensazioni cromatiche percepibili da una persona.

1.1. La luce: Cenni Storici

Nel XVII secolo esistevano due teorie che tentarono di spiegare le proprietà della luce: quella di Newton ed altri fisici che ipotizzarono che la luce fosse costituita da particelle estremamente piccole (teoria corpuscolare), e quella di Huygens che intuì che il comportamento della luce poteva essere spiegato come un fenomeno ondulatorio (teoria ondulatoria).

Entrambe le teorie da sole non erano sufficienti a spiegare i molteplici fenomeni che una completa teoria sulla luce deve comprendere.

Fu Maxwell, intorno al 1864 attraverso le equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo, che permise di descrivere la propagazione di un'onda elettromagnetica sia nel vuoto che in un mezzo isotropo.

Le radiazioni elettromagnetiche, delle quali Hertz dimostrò sperimentalmente l'esistenza nel 1887, costituiscono una modalità di propagazione di energia per quanti e fotoni, in accordo con i principi della meccanica quantistica.

1.2. Le onde elettromagnetiche

Dal punto di vista fisico la luce è una radiazione elettromagnetica: è un'onda che si propaga nello spazio ad altissima velocità, la velocità della luce, pari a circa 300.000 chilometri al secondo. Le tre caratteristiche principali di una onda sono lunghezza d'onda, ampiezza e frequenza (Fig. 1.1). La lunghezza d'onda indicata con λ , è la distanza fra due punti di ampiezza massima ovvero due creste successive; l'ampiezza indicata con α , è la distanza tra il punto più alto raggiunto dall'onda (cresta) ed il piano mediano che interseca l'onda; la frequenza, infine, indicata con f , è la quantità di oscillazioni che l'onda compie nell'unità di tempo (con unità di misura Hertz, oscillazioni al secondo). La frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda: minore è la lunghezza d'onda maggiore è la frequenza, e viceversa.



Fig. 1.1 Caratteristiche di un'onda e.m

L'insieme delle radiazioni elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico. (Fig. 1.2) È possibile fare una suddivisione puramente convenzionale ed indicativa in vari intervalli o *bande di frequenza*, intervalli che non sono ben definiti, ma hanno zone di sovrapposizione.

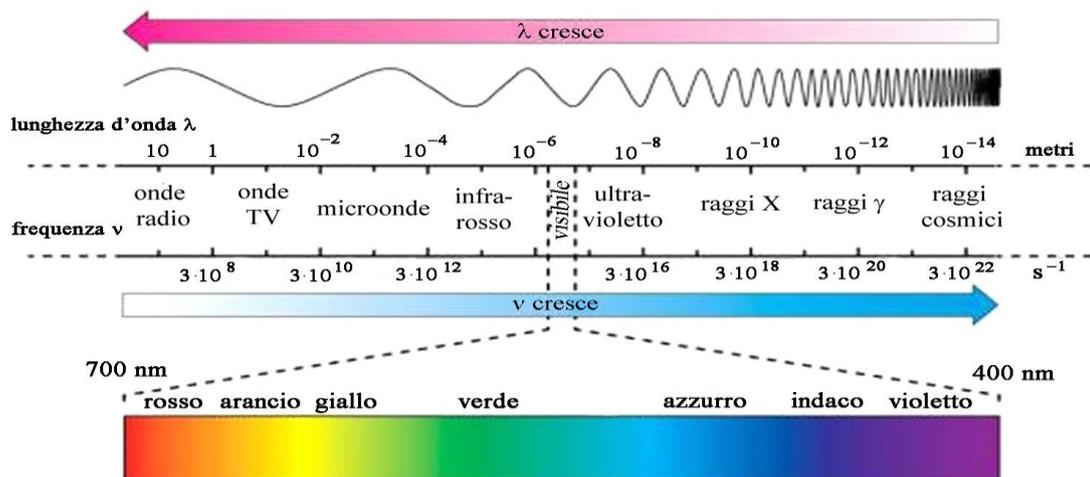


Fig. 1.2 modello di rappresentazione dello spettro elettromagnetico suddiviso per frequenze, potenze di dieci, nomenclatura, onde e lunghezze d'onda.

Partendo da sinistra verso destra si va dalle onde più lunghe e quindi dalle frequenze e dalle energie più basse alle onde più corte e quindi alle frequenze e alle energie più alte: onde radio, le microonde, la radiazione infrarossa, la radiazione visibile, la radiazione ultravioletta, i raggi X e i raggi gamma.

1.3. La radiazione visibile

La radiazione visibile (o semplicemente luce visibile) ha frequenza compresa tra $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz e $7,9 \cdot 10^{14}$ e lunghezza d'onda compresa tra 380 nm e 780 nm, con una certa variazione da persona a persona. Rispetto all'intero spettro delle radiazioni è un campo molto ristretto, tuttavia è estremamente importante per gli organismi viventi poiché l'occhio della maggior parte di essi tra cui l'uomo, è sensibile a queste radiazioni. Il fatto che noi riusciamo a percepire sotto forma di luce soltanto una parte così limitata delle radiazioni elettromagnetiche è dovuto alla particolare natura del nostro occhio. Ad esempio è noto come alcuni animali riescano a percepire le radiazioni infrarosse (lunghezza d'onda compresa tra 740 nm ed 1 mm) e quelle ultraviolette (lunghezza d'onda compresa tra 380 e 100 nm). Quando ad esempio, l'occhio riceve una radiazione la cui lunghezza d'onda è di 470 nm noi diciamo di vedere una luce blu, mentre una radiazione di 600 nm corrisponde ad una luce di colore arancione. I vari colori fondamentali corrispondenti alle diverse oscillazioni comprese nei limiti che abbiamo sopra citato (380 nm e 780 nm) sono ben distinguibili nell'arcobaleno e sono indicati nell'elenco in tabella:

Colore	Lunghezza d'onda (λ)
violetto	380-430
blu	430-500
ciano	500-520
verde	520-565
giallo	565-580
arancione	580-625
rosso	625-740

Le lunghezze d'onda comprese tra quelle indicate corrispondono a tutta la gamma di tinte intermedie tra un colore fondamentale e l'altro. Quando le varie oscillazioni corrispondenti alle sopraindicate lunghezze d'onda colpiscono contemporaneamente l'occhio i loro effetti si integrano dando luogo alla cosiddetta luce bianca. La luce bianca non corrisponde dunque ad una determinata lunghezza d'onda ma è prodotta dalla fusione delle varie luci colorate che costituiscono lo spettro visibile. Ciò può essere dimostrato grazie al famoso

esperimento del prisma che Isaac Newton fece nel 1666, nel quale fece passare un fascio di raggi solari attraverso un prisma di vetro (Fig. 1.3). Dato che l'indice di rifrazione non è uguale per tutte le lunghezze d'onda ed è tanto più elevato quanto minore è la lunghezza d'onda stessa, dalla parte opposta del prisma si vedrà emergere una successione di raggi luminosi il cui colore passa dal violetto al rosso prendendo il nome di colori spettrali. In natura sono presenti colori che non sono spettrali, generati da una mescolanza di due o più dei colori spettrali. Mescolando ad esempio in varie proporzioni i due colori estremi dello spettro visibile, il rosso e il violetto, si ottiene tutta una gamma di colori non spettrali, detti **porpore**.

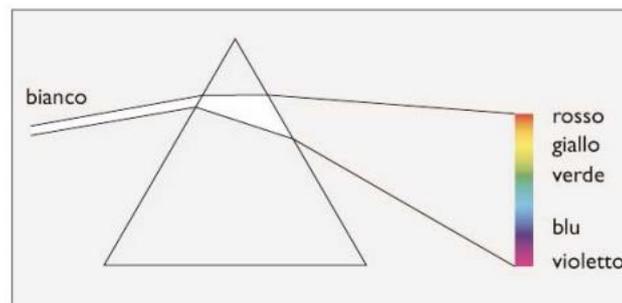


Fig. 1.3 Composizione della luce bianca

1.4. La temperatura di colore

La ripartizione delle radiazioni nella banda spettrale del visibile determina il colore della luce, o meglio la sua tonalità di colore. La tonalità di colore della luce si esprime attraverso una grandezza termica, cioè la temperatura assoluta di un corpo nero che irradia luce con la stessa tonalità di colore della luce emessa dalla sorgente in esame. Tale temperatura di riferimento è chiamata temperatura di colore e la sua unità di misura secondo il sistema internazionale è il grado Kelvin (K). Dire che una sorgente ha una temperatura di colore di 3000 K significa che la luce da essa prodotta ha la stessa tonalità di quella generata dal corpo nero portato alla temperatura di 3000 K. Nella tabella seguente sono riportate le temperature di colore di diverse sorgenti:

Sorgenti	Temperatura di colore in °K
Cielo sereno	20000-15000
Cielo coperto	15000-5000
Sole a mezzogiorno	5250
Sole all'alba	1600

Ad una temperatura di colore più bassa corrisponde una tonalità di luce più calda (rossa);
 Ad una temperatura di colore più alta corrisponde una tonalità di luce più fredda (azzurro).
 La luce bianca è la luce naturale del sole.

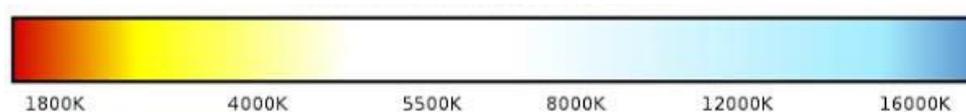


Fig. 1.4 scala temperatura di colore

Capitolo 2

La fisiologia del colore

Una fiamma non è gialla, una foglia non è verde, ma noi vediamo gialla la fiamma e verde la foglia. Il colore che noi attribuiamo alla luce o agli oggetti è il risultato di un processo complesso che inizia nei nostri occhi per azione di radiazioni di opportuna lunghezza d'onda che gli oggetti osservati ci riflettono, successivamente l'elaborazione di questa informazione continua nel cervello.

2.1. La struttura retinica

Nonostante la sua posizione periferica, la retina fa parte del sistema nervoso centrale ed essendo una componente di questo sistema è formata da circuiti nervosi complessi che convertono l'attività elettrica graduata dei fotorecettori in potenziali d'azione che tramite il nervo ottico viaggiano fino all'encefalo. Nella retina sono presenti cinque tipi di neuroni (Fig. 2.1a): nello Strato Nucleare Esterno (SNE), il più profondo e lontano dal cristallino, ci sono i fotorecettori, invece nello Strato Nucleare Interno (SNI) ci sono le cellule bipolari, orizzontali e amacrine; nell'ultimo strato, quello più vicino al cristallino, ci sono le cellule gangliari. Gli assoni, i prolungamenti del corpo delle cellule gangliari impiegati per la trasmissione di segnali elettrici tra un neurone e l'altro, convergono verso il punto cieco, dove si uniscono per formare il nervo ottico, un "cavo" che conduce l'informazione visiva fino al cervello per la successiva elaborazione.

Delle cellule contenute nella retina i fotorecettori sono le uniche ad essere sensibili alla luce. Essi si dividono in coni (circa 6 milioni) situati maggiormente nella parte centrale della retina (fovea) e bastoncelli (circa 120 milioni). Entrambi questi fotorecettori presentano un segmento esterno che contiene un fotopigmento e un segmento interno che contiene il nucleo della cellula e dà origine alle terminazioni sinaptiche che entrano in contatto con le cellule bipolari e con le cellule orizzontali. La struttura dei due tipi di fotorecettori è visibile in figura 2.1b.

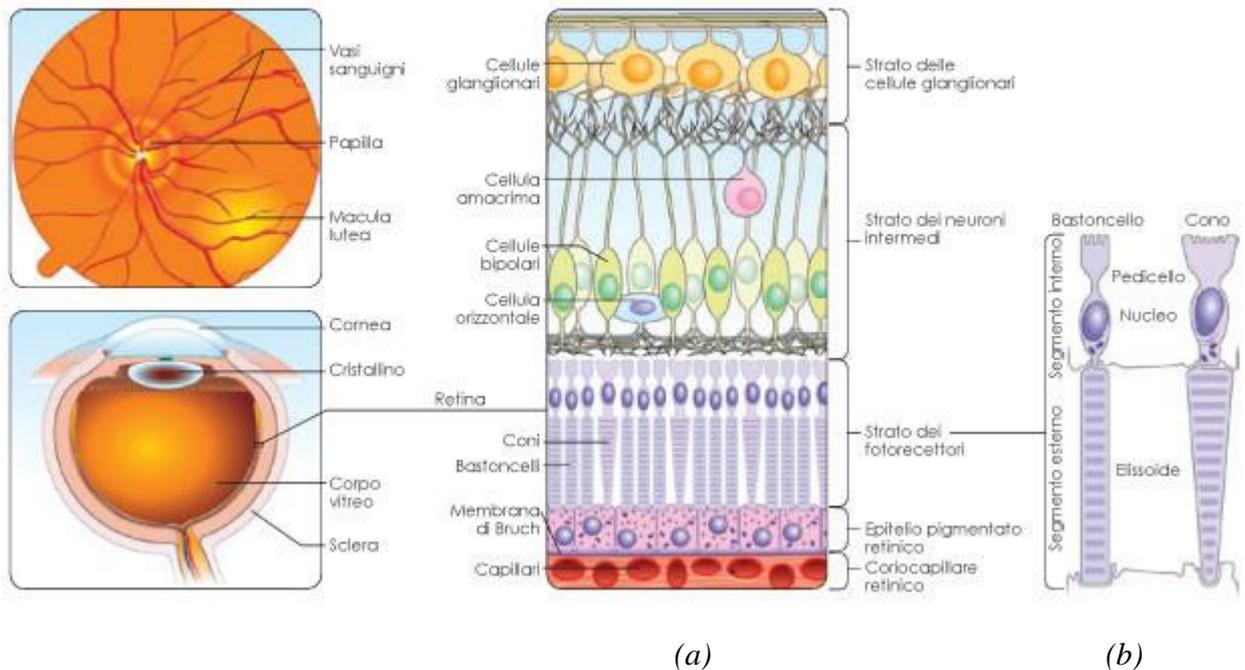


Fig. 2.1 Strati della retina

Il motivo per cui la luce debba attraversare i vari elementi retinici, tra l'altro insensibili alla luce prima di raggiungere il segmento esterno dei fotorecettori è dovuto alla loro interazione con l'epitelio pigmentato, infatti l'estremità dei segmenti sono immerse in esso. L'epitelio presenta una funzione di rimozione dei dischi membranosi costituite da fotopigmento e altre proteine coinvolte nel processo di fototrasduzione, che vengono opportunamente sostituiti mediante un processo di fagocitazione e una funzione di riciclaggio del fotopigmento. Inoltre l'epitelio pigmentato è molto ricco di melanina che gli permette di assorbire eventuali fotoni non processati dai fotorecettori ed evitare quindi pericolose riflessioni.

2.2. La visione fotopica e scotopica

Il sistema dei coni e quello dei bastoncelli sono specializzati in aspetti differenti della funzione visiva. Il sistema dei bastoncelli permette la visione periferica e in condizioni di scarsa luminosità, è quindi specializzato nell'aspetto della sensibilità a discapito del potere di risoluzione spaziale che è molto basso. Essi rendono possibile quella che si definisce visione scotopica (cioè notturna). Il sistema dei coni permette la visione dei dettagli e la visione cromatica, è caratterizzato da un potere di risoluzione spaziale alto ma è relativamente insensibile alla luce, di conseguenza è specializzato nell'aspetto dell'acuità

visiva a discapito di quello della sensibilità. La visione mediata dai coni è detta visione fotopica (diurna). Nella figura 2.2 vengono rappresentati i coefficienti di visibilità spettrale. A livelli di illuminazione elevati nei bastoncelli la reazione alla luce giunge a saturazione, in quest'ultimi cioè il potenziale di membrana raggiunto un certo valore, non varia più in funzione dell'illuminazione. Infine si ha la visione mesopica, quella a livelli di luce in presenza dei quali svolgono un ruolo sia i coni che i bastoncelli. Da quanto detto risulta chiaro che la vista è mediata prevalentemente dal sistema dei coni e che la perdita della loro funzionalità ha risultati devastanti. Perdere la funzionalità dei bastoncelli significa avere difficoltà visive solo in condizioni di scarsa illuminazione, perdere la funzionalità dei coni porta a cecità totale.

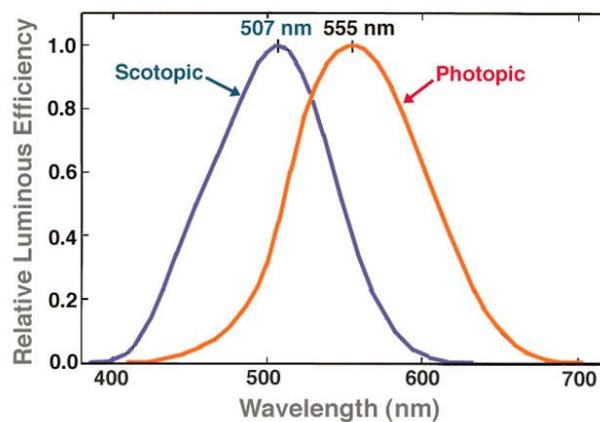


Fig. 2.2 Coefficienti di visibilità spettrale

2.3. La visione cromatica

La visione a colori è possibile grazie alla presenza di fotopigmenti differenti nei coni ognuno particolarmente sensibile a una determinata lunghezza d'onda della luce, in particolare i coni S (short, sensibili a corte lunghezze d'onda), M (medium, sensibili a medie lunghezze d'onda) e L (large, sensibili a lunghezze d'onda lunghe). La lunghezza d'onda per la quale la sensibilità è massima è 560 nm per i coni L, 530 nm per i coni M e 425 nm per i coni S e questi rappresentano solo il 5-10% circa dell'intera popolazione dei coni prevalenti sulla retina e sono praticamente assenti nel centro della fovea mentre i tipi L e M sono quelli maggiormente presenti. (Fig. 2.3) Il fotopigmento presente nei bastoncelli è la rodopsina, mentre quello nei coni è costituito da una proteina, l'opsina, e da un cromoforo, il retinale che è la forma aldeidica della vitamina A. La presenza di tre diversi tipi di opsine per i coni è origine della loro differenziazione e della visione

tricromatica che è resa grazie all'attività di almeno due fotopigmenti, ognuno dei quali assorbe un'ampia frazione dello spettro, ma assorbe più efficacemente la luce di una data lunghezza d'onda. La quantità di luce assorbita dipende sia dalla sua lunghezza d'onda sia dalla sua intensità per cui, luci di diversa lunghezza d'onda e intensità possono produrre la stessa risposta e creare un segnale ambiguo, non ben decifrabile, quindi la presenza di almeno due fotorecettori con fotopigmento differente permette la distinzione tra le lunghezze d'onda di pari intensità; la presenza di tre fotorecettori, invece, permette di discriminare sottili differenze tra di esse. Per avere visione del colore la condizione minima è che la retina contenga due tipi di fotopigmenti con diverse proprietà di assorbimento spettrale, come confermato dall'inglese Rushton nel suo principio di univarianza stipulato sulla base degli studi effettuati su soggetti anomali aventi un solo recettore del colore. Da tali studi egli classificò i fotopigmenti dei coni in: eritolabio, che risponde in modo selettivo l'eccitazione del rosso, clorolabio, decomposto dal verde e cianolabio che assorbe più lunghezze d'onda all'interno della gamma del blu. In un cono vi è solo uno di questi tre fotopigmenti che, al momento dell'incisione della luce, si scinde attuando il processo di fototrasduzione e successivamente, di invio delle informazioni.

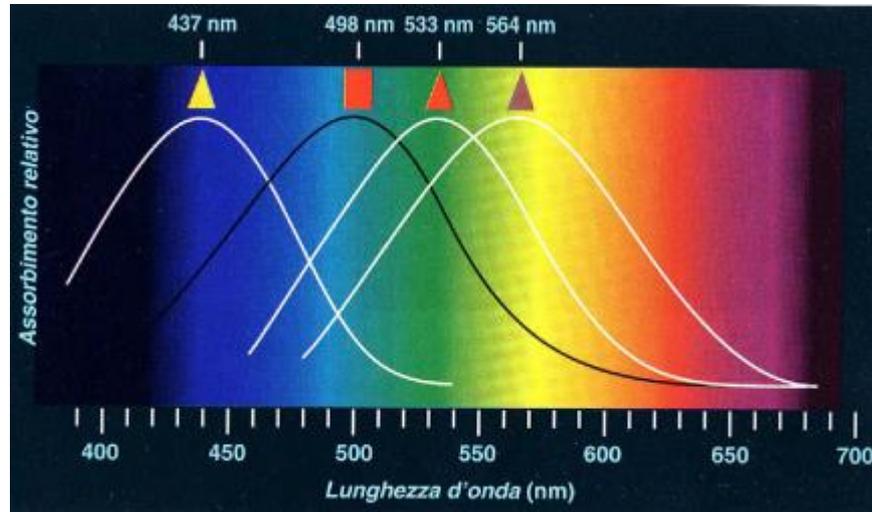


Fig. 2.3 curve di assorbimento della luce da parte dei tre tipi di coni

Capitolo 3

La psicofisica del colore

Gli esseri umani non hanno memoria per il colore; per ricordarci di esso lo dobbiamo sempre associare ad un oggetto, seppure in modo inconsapevole. Quindi com'è possibile comunicare il colore in maniera univoca se la percezione è del tutto soggetta a parametri instabili e soggettivi?

3.1. Le caratteristiche dei colori

Ogni colore può essere descritto nei termini del possesso di tre attributi principali: tonalità, saturazione e luminosità:

- **Tinta:** è un colore puro, ovvero caratterizzato da una singola lunghezza d'onda ed è il motivo per cui conferiamo al colore il nome della cromia percepita più evidente. Il nostro occhio è in grado di percepire come “assoluto” i soli colori spettrali, mentre gli altri colori (es. rosa) possono essere definiti come combinazioni di una certa tonalità (es. il rosa è un rosso poco saturo).
- **Saturazione:** è la misura della purezza del colore, ovvero l'intensità di una specifica tinta indicandola come carica o pallida, ed è data dalla miscela di colore puro con il componente acromatico (ovvero il bianco). Una tinta molto satura presenta un colore vivido, al diminuire della saturazione il colore diventa più debole e tende al grigio, ciò è dovuto alla mescolanza di luci di diversa λ che sottraggono luminosità al cromatismo.
- **Luminosità:** rappresenta la quantità totale di luce riflessa dal colore e dipende dalla quantità di bianco contenuta nel colore, potendolo così definire “chiaro” o “scuro”.

3.2. Sintesi Additiva e Sottrattiva

La terna di colori *RGB* (acronimo di Red = rosso, Green = verde, Blue = blu) è detta **terna additiva** (Fig. 3.1): dalla somma o sovrapposizione dei tre colori risulta infatti il colore bianco, mentre dalla loro assenza ha origine il nero. Al contrario, la terna *CMY* (acronimo di Ciano, Magenta, Yellow = giallo), composta dai *complementari* dei colori *RGB*, è detta **terna sottrattiva** (Fig. 3.1): la somma dei tre colori genera il nero, mentre l'assenza

produce il bianco. Due colori si dicono complementari quando sommati (o sovrapposti) danno un risultato acromatico: cioè bianco o variazioni di grigio. I colori CMY sono complementari di quelli RGB poiché sono ottenuti sommando due a due tale terna: Giallo = Verde + Rosso, Magenta = Rosso + Blu, Ciano = Verde + Blu. Usare in stampa e in pittura la terna CMY (ciano, magenta, giallo) al posto di quella RGB (rosso, verde, blu), utilizzata invece negli schermi del computer, è solo una questione di praticità. Il bianco, ovvero il colore prevalente, essendo bianco lo sfondo del foglio, è ottenuto in questo caso con l'assenza di colore. Per ottenerlo con la terna RGB, dove il bianco corrisponde alla somma dei tre colori, verrebbero sprecate per la stampa tutte e tre le cartucce di inchiostro. Alla terna CMY in stampa si aggiunge il nero (K) per un'altra ragione pratica, in quanto la somma della terna CMY non genera il nero ma una sorta di marrone scuro per questo per riprodurre il nero puro viene aggiunto inchiostro. La lettera "K" della serie "CMYK" deriva dalla dicitura "Key black", nome che ha origine dal sistema di stampa di tipo CTP (Computer To Plate: ogni sistema di stampa che utilizza la quadricromia CMYK). La maggior parte della gente è erroneamente portata a pensare che non potendo utilizzare la prima lettera "B" di "black" per indicare il colore nero (per non confonderlo con la lettera "B" di "Blue", già utilizzata per esprimere la terna RGB), si sia scelto di ricorrere all'ultima lettera del nome, cioè la "K". Ma non è così. Nelle arti figurative, come la pittura, esiste anche un'altra ragione per preferire la terna CMY: è comodo infatti partire da essa poiché contiene in partenza il giallo. Ottenerlo sia con la sintesi additiva sia con quella sottrattiva dei pigmenti è un procedimento non sempre possibile, dato che per questo particolare colore entra in gioco anche il fattore luminosità: rosso + verde può dare il giallo, ma se la superficie è poco riflettente l'occhio dell'osservatore può percepire al suo posto un effetto di "marrone".

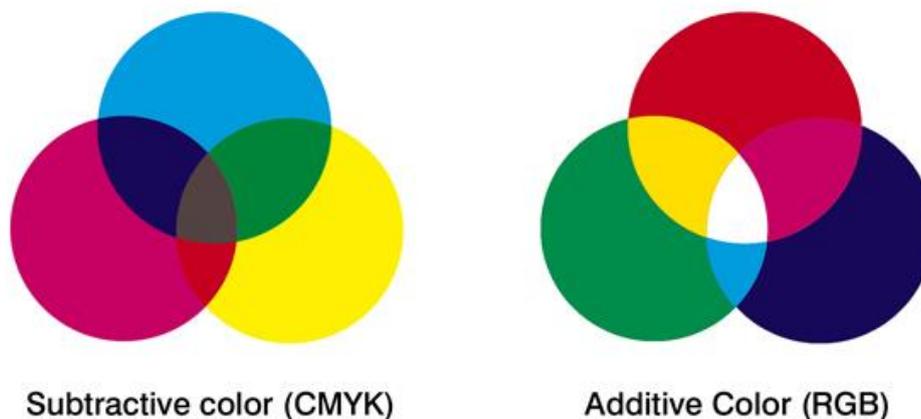


Fig. 3.1 Sintesi sottrattiva e additiva

3.3. Principali fenomeni della percezione dei colori

I principali fenomeni che caratterizzano la percezione dei colori sono tre:

- Al fenomeno di **opponenza cromatica** si assiste osservando come rispettivamente le sensazioni di verde e rosso, giallo e blu e bianco e nero sembrano in antagonismo fra loro, tendano, cioè a cancellarsi reciprocamente. Come aveva fatto osservare Hering, non è possibile avere la percezione di un verde-rossastro o di un giallo-bluastrò, mentre sono invece percepibili il rosso-bluastrò (magenta), il giallo-rossastro (arancio) o il verde-bluastrò (viola). Certi abbinamenti non possono mai venir percepiti. La luce rossa e quella verde possono venir mescolate in modo tale che ogni traccia del rosso e del verde scompaiano e si percepisca un giallo puro.



Fig. 3.2 Opponenza cromatica

- Il fenomeno dell'influenza reciproca dei colori era stato studiato in precedenza da Goethe ma venne ripreso da Chevreul definendolo come **contrasto cromatico simultaneo** (figura 3.3), ed egli fu uno dei primi ad accorgersi che se la fissazione dell'occhio su di un'immagine fortemente colorata, per un tempo di circa 15-20 secondi, si spostava poi su di uno sfondo bianco, si aveva la formazione per pochi secondi, della stessa immagine, ma del colore complementare a quello reale. Questo fenomeno di **contrasto successivo** per Chevreul è rappresentato nella figura 3.4. In questo fenomeno, i colori delle tre coppie rosso-verde, giallo-blu e bianco-nero si facilitano reciprocamente, anziché entrare in competizione fra loro. A livello della corteccia visiva sono stati trovati neuroni le cui risposte alla stimolazione cromatica mimano l'esperienza percettiva del contrasto simultaneo.

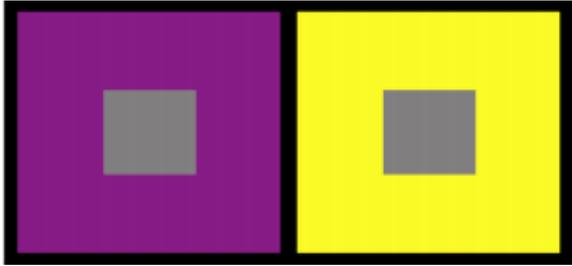
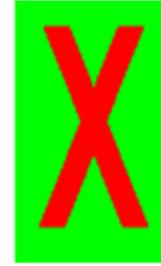


Fig. 3.3 Esempio di contrasto simultaneo.



Fig. 3.4 Esempio di contrasto successivo.



- La **costanza dei colori** è la terza proprietà importante della visione cromatica. Quando la composizione della luce incidente varia, i meccanismi che presiedono alla visione dei colori compensano queste variazioni, cosicché il colore degli oggetti sembra sempre lo stesso. Ad esempio, le immagini in figura 3.5, mostrano come nella prima immagine la maglietta della donna ci appare gialla. Nell'immagine centrale possiamo osservare l'immagine originale non filtrata e la nostra risposta viene confermata. L'immagine a destra rappresenta l'immagine originale con solamente la maglietta filtrata (ovvero come ci appariva nella figura a sinistra), la maglietta ci appare ora verde. A causa della costanza cromatica abbiamo correttamente visto la maglietta gialla anche se la sensazione che i nostri fotorecettori hanno registrato era quella del verde. Questa proprietà della visione dei colori dipende in gran parte dall'analisi che il sistema visivo opera nei confronti non solo di un oggetto, ma anche del suo sfondo, o comunque di ciò che lo circonda; è pur vero che a bassi livelli di illuminazione gli oggetti blu e quelli verdi sembrano più brillanti dei rossi, al contrario di quanto accade quando l'illuminazione è maggiore, fenomeno interpretato in modo soddisfacente da Purkinje e quando l'illuminazione è molto forte si assiste ad uno scolorimento delle tinte, ma in ogni caso riusciamo ancora a percepire i colori come costanti. A parità di illuminazione, sfondi di diverso colore possono conferire ad uno stesso oggetto sfumature cromatiche diverse.



Fig. 3.5 Esempio del fenomeno della costanza cromatica.

3.4. Modelli rappresentativi dei colori

3.4.1. Primo modello: Disco rotante di Newton

A Newton si deve il primo modello di rappresentazione del colore, un cerchio che ha al suo centro il bianco e lungo la circonferenza, ordinatamente disposti, i colori scomposti dal prisma (Fig. 3.6). I due colori agli estremi dello spettro visibile – il rosso e il violetto – sono posti sulla circonferenza in modo da creare una continuità. Sette sono i colori identificati come principali in questo modello: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto.

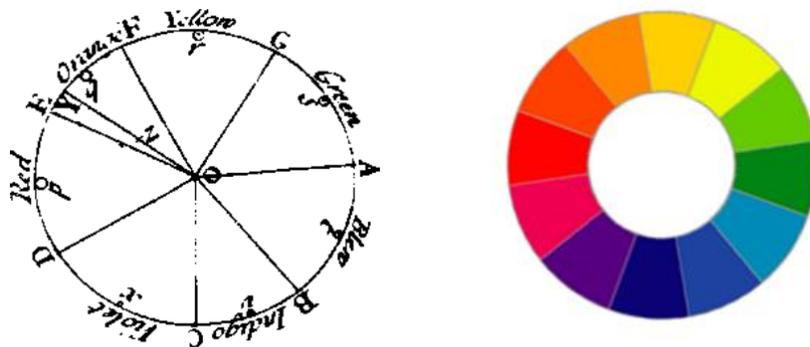


Fig. 3.6 Disco rotante di Newton

I colori freddi spaziano dal blu al viola, la metà del cerchio cromatico con lunghezze d'onda più corte. I colori caldi vanno dal rosso al giallo, essenzialmente la metà del cerchio cromatico corrispondente alle lunghezze d'onda maggiori. I colori complementari si trovano uno di fronte all'altro sul cerchio cromatico. Quando sono mescolati insieme in quantitativi uguali, i complementari sottrattivi, dovrebbero teoricamente produrre nero o grigio.

3.4.2. Diagramma cromatico CIE standard

Nel 1931 la C.I.E (Commissione Internazionale per L'Illuminazione), strutturò un diagramma per misurare tutte le cromaticità che l'occhio umano è in grado di percepire.

I vertici del triangolo, cioè i punti aventi $(x=0, y=0)$ $(x=1, y=0)$ $(x=0, y=1)$ corrispondono a colori immaginari, scelti in modo tale che tutti i colori reali percepibili dall'occhio umano si possano ottenere come sovrapposizione opportuna di x , y e z . I colori spettrali "puri", corrispondenti cioè a lunghezze d'onda ben definite, stanno su una curva a ferro di cavallo; la curva è chiusa alla base dalla linea "porpora pura", che non corrisponde a nessun colore ottenibile con una definita lunghezza d'onda. Il punto W al centro del diagramma

(coordinate $x=0,33$, $y=0,33$, $z=0,33$) è il bianco (“white”) o punto acromatico, cioè senza colore. Il modo più sicuro per ottenere un colore bianco è fare in modo che tutti e tre i componenti primari saturino, mandando una luce molto intensa. La tinta di un punto P si ottiene congiungendo P al punto W e prolungando il segmento fino alla curva dei colori spettrali. Il punto D che sta sull’intersezione è il colore dominante, nel senso che P è una miscela più o meno carica di bianco e del colore di D. In D si ha la saturazione della tinta. L’intersezione C dal lato opposto di B è il colore complementare, cioè il colore che si ottiene togliendo dal bianco il colore avente lunghezza d’onda D. Il colore nero si ottiene quando si è al di sotto della soglia di sensibilità di tutti e tre i tipi di coni, per cui non si registra nessuno stimolo. Fra il bianco e il nero ci sono diversi toni di grigio, in cui si supera la soglia di sensibilità dei coni, pur mantenendo la stessa miscela eguale delle tre componenti. Anche i colori possono avere un loro tono, che si ottiene valutando a quale “tono di grigio” corrisponde l’intensità di luce dei colori componenti.

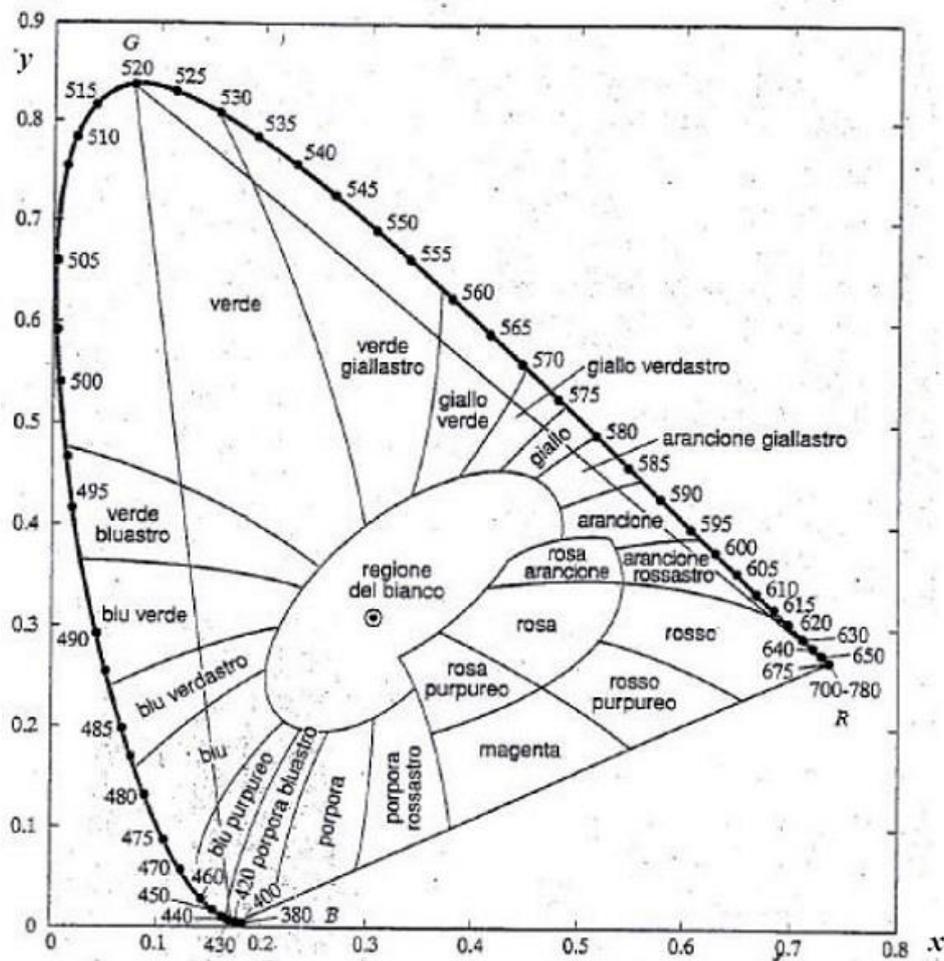


Fig. 3.7 Diagramma cromatico CIE standard

Capitolo 4

4.1 Alterazioni della percezione cromatica

4.1.1. Il daltonismo

Un mal funzionamento della struttura retinica implica inevitabilmente una mal interpretazione dell'oggetto visualizzato e quindi della percezione. Il chimico fisico J. Dalton fu il primo a descrivere di una anomalia della percezione cromatica in quanto egli stesso ne era affetto, anche se, sino ad allora, non si rese conto di avere una simile disfunzione. Le alterazioni cromatiche, in suo onore, prendono il nome di daltonismo che, in termini strettamente medici, viene definito come la manifestata incapacità di alcune persone di percepire alcuni colori. L'alterazione della percezione cromatica è però divisibile in due grandi categorie: le **discromatopsie**, in cui vi è il funzionamento di tutti e tre i coni ma la sensibilità di assorbimento spettrale di alcuni è ridotta, e le **acromie o (acromatopsie)**, in cui non funziona almeno uno dei recettori oppure c'è la mancanza anche di due o tre coni. Nella normale visione a colori, il fotopigmento di ciascun cono presenta un differente spettro di assorbimento, situazione conosciuta come tricromia. A seconda di quale fotorecettore è alterato abbiamo: *protan*, irregolare assorbimento delle lunghezze d'onda elevate (coinvolge i coni L); *deutan*, irregolare assorbimento delle lunghezze d'onda medie (coinvolge i coni M), mentre *tritan* irregolare assorbimento delle lunghezze d'onda brevi che riguardano i coni S.

4.1.2. Tricromia anomala

Se la tricromia è presente, ma c'è l'alterazione di uno dei coni si tratta di tricromia anomala. In particolare, **deuteranomia** quando la sensibilità spettrale del recettore M può modificarsi diventando molto simile alla sensibilità spettrale del recettore L. Sapendo che il recettore L è sensibile al colore rosso, ne consegue che, sebbene in una misura più ridotta, anche il recettore M sarà sensibile al rosso, ed ovviamente diminuisce la sensibilità per il colore verde. Similmente, chiameremo **protanomalia** quando la sensibilità spettrale del recettore L può modificarsi diventando molto simile alla sensibilità del recettore M, ovvero diventando sensibile in maniera ridotta al colore verde. Il difetto genetico del recettore S è molto raro ed è identificato come **tritanomia**.

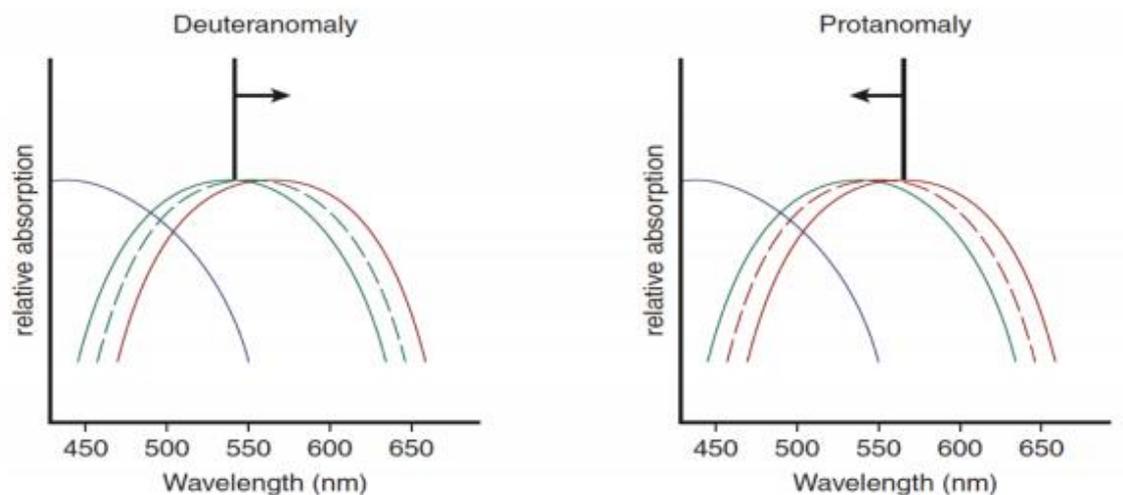


Fig. 4.1 Spettri di assorbimento semplificati per tricromia anomala

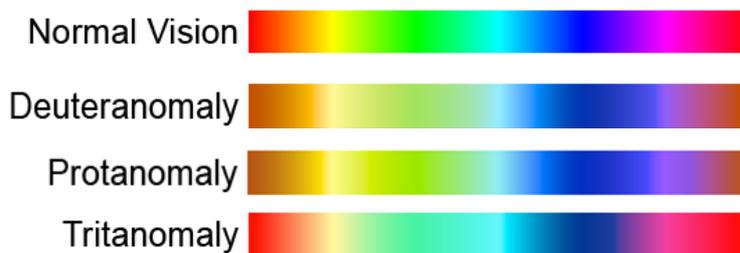


Fig. 4.2 Tricromia anomala

4.1.3. Dicromie

Un soggetto che presenta l'attività di soli due fotopigmenti è affetto da dicromia; a seconda di quale sia il fotorecettore che manchi distinguiamo deuteranopia, protanopia e tritanopia. La **deuteranopia** è un tipo di cecità ai colori più comunemente conosciuta come daltonismo rosso-verde. Le persone con questa condizione hanno difficoltà a distinguere tra le sfumature del giallo, del rosso e dell'arancio, in quanto le lunghe lunghezze d'onda vengono rilevate tutte come giallo mentre le brevi lunghezze d'onda vengono rilevate come bluastro. La **protanopia** è molto simile alla deuteranopia, infatti anche qui il verde, il giallo, l'arancio e il rosso vengono recepiti come giallo e le lunghezze d'onda brevi come blu. La sostanziale differenza, che la rende poi come dicromia più grave, è il mancato funzionamento del cono L, ovvero del rosso, tanto da confondere questo colore con il nero. La **tritanopia** come la tritanomalia è abbastanza rara, è chiamata anche cecità blu-giallo e il nome stesso preso come descrizione è in realtà piuttosto fuorviante. Le persone che sono daltoniche blu-giallo confonderanno alcune tonalità di blu con il verde e alcune tonalità di giallo con il viola. A differenza della cecità ai colori rosso-verde, la cecità ai colori blu-

giallo non è più rilevante nei maschi, poiché il gene che causa l'assenza o il difetto dei coni S non si trova sul cromosoma X, ma piuttosto sul cromosoma 7.

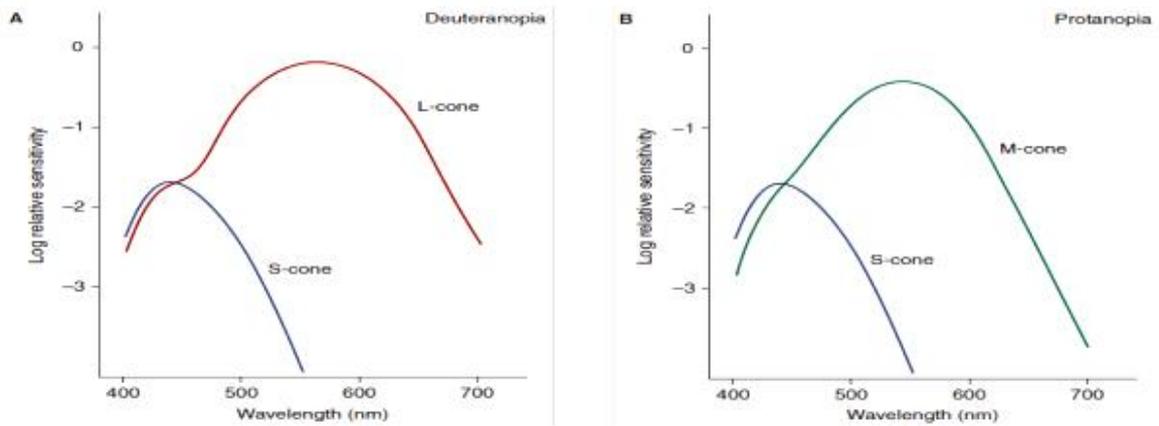


Fig. 4.3 Approssimazione degli spettri di assorbimento rimanenti in deuteranopia e protanopia

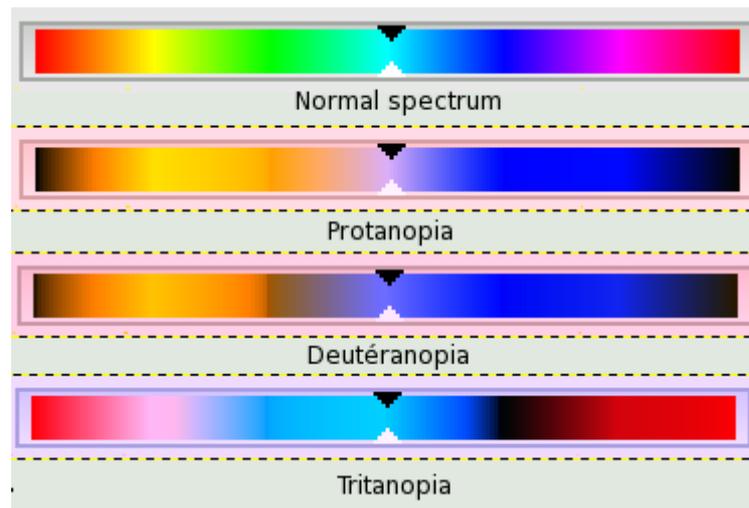


Fig. 4.4 Dicromie

La totale cecità ai colori o **monocromia** è una grave compromissione della vista causata dall'assenza totale di 2 o 3 coni retinici, riducendo la visione ad una dimensione. Una persona affetta da monocromia è completamente incapace di distinguere qualsiasi colore, le cose appaiono solo in scala di grigi (sfumature di bianco e nero). Si presenta in due forme:

- **Monocromia dei bastoncelli:** è la condizione in cui le cellule della retina sono presenti e funzionali, ma tutti i tipi di coni sono non funzionali o assenti. Pur essendo la forma più comune di cecità totale, si ritiene che la monocromia dei bastoncelli si verifichi solo in circa lo 0,003% delle persone o meno. Un altro nome per la monocromia dei bastoncelli è **acromatopsia**, e non è legato al sesso: uomini e donne hanno altrettante probabilità di soffrire di questa malattia. Di solito è associata ad una serie di altri sintomi, quali: ambliopia (ridotta acuità visiva 1/10), fotofobia, nistagmo, anomalia funzionale dell'iride. La gravità di questi sintomi, comunque, varia molto da persona a persona.
- **Monocromia dei coni blu:** è la condizione in cui i coni si sviluppano normalmente, ma la retina non è in grado di produrre né il pigmento verde né quello rosso, in modo che solo i coni blu funzionano normalmente. I sintomi associati sono gli stessi.

4.1.4. Discromatopsie congenite e acquisite

Le discromatopsie sono principalmente di tipo congenito, a causa della mutazione del cromosoma X. Considerato che gli uomini hanno solo un cromosoma X, se ricevono un cromosoma X difettoso da parte di una madre portatrice, saranno certamente daltonici. Le donne invece hanno due cromosomi X, la probabilità che entrambi siano difettosi è estremamente bassa; quando uno è difettoso e l'altro è sano, la donna sarà solo portatrice del difetto e avrà una normale percezione del colore. Statisticamente infatti l'8 % degli uomini ne è affetto rispetto allo 0,5% delle donne. Le discromatopsie acquisite sono causate da malattie (atrofie ottiche, degenerazioni maculari, retiniti pigmentarie glaucoma sclerosi multipla), incidenti (traumi cranici) o intossicazioni (nicotina, piombo, solfuro di carbonio farmaci), quindi presentabili in qualsiasi momento della vita e con gravità variabile nel tempo. Pertanto incidono similmente sia nei maschi che nelle femmine, con una ridotta acuità, un campo visivo alterato e solitamente monoculare.

4.2 Test per l'individuazione delle alterazioni cromatiche

4.2.1. Test pseudoisocromatici: Tavole di Ishihara

Il Metodo preferenziale per identificare il daltonismo è attraverso le tavole di Ishihara (Fig. 4.5). La prima versione di queste tavole è stata creata nel 1918 dal dott. Shinobu Ishihara, professore dell'Università di Tokyo. Le tavole di Ishihara sono un insieme di tavole ripiene di cerchietti di colore diverso ma di medesima luminosità. Il soggetto esaminato deve riconoscere numeri, o percorsi che risultano evidenti a chi possiede un normale senso cromatico ma difficili o



Fig.4.5 Le tavole di Ishihara

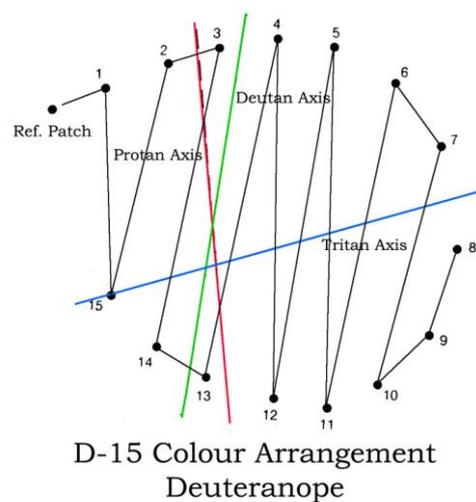
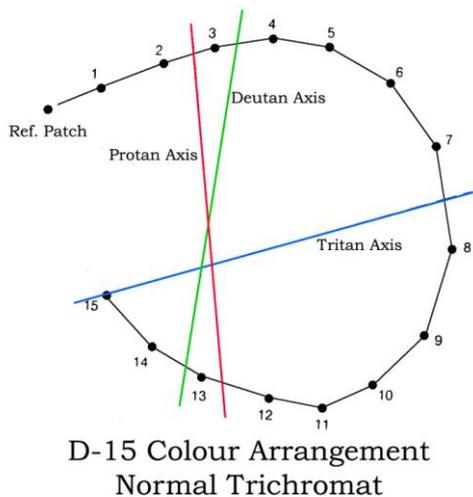
impossibili da riconoscere per che non vede bene i colori. Queste tavole sono utili per diagnosticare difetti congeniti della visione dei colori soprattutto per l'asse rosso/verde. Sono ideate per essere utilizzate in una stanza adeguatamente illuminata dalla luce del giorno. La luce del sole diretta o la luce elettrica possono produrre alterazioni dell'intensità di colore. Quando è necessario utilizzare la luce elettrica, si dovrebbe illuminare la stanza con lampade simili alla luce solare. Le tavole vanno tenute a 75 cm dal soggetto e inclinate in modo tale che il piano della carta sia ad angolo retto rispetto la linea di visione. La prima tavola contiene il numero 12 e non è pseudoisocromatica. Serve per dimostrare il test e viene letta anche da chi vede male i colori. Dalla tavola 2 alla tavola 17 i numeri vengono letti male o per nulla da chi presenta anomalie della visione dei colori nell'asse rosso/verde. Nelle tavole 18-21 non sono contenuti numeri, che invece vengono letti da chi presenta una deficienza rosso/verde. Le tavole 22-25 sono le più interessanti, in quanto permettono di distinguere la vera cecità per un colore (protanopia o deuteranopia a seconda che sia per il rosso o per il verde) dalla cecità parziale (protanomalia o deuteranomalia). Dalla tavola 27 alla 38 i numeri sono sostituiti da percorsi per gli illetterati, con lo stesso significato della lettura dei numeri. E' possibile eseguire il test sia in mono che in binoculare. I difetti congeniti sono sempre binoculari. I difetti acquisiti possono essere monoculari.

4.2.2. Test di classificazione: Farnsworth 15 Tinte

Questo test ha un procedimento di esecuzione molto rapido (4 minuti) e semplice. Una volta che il soggetto abbia ordinato le 15 pastiglie con sfumature cromatiche differenti (Fig. 4.6) la scatola viene chiusa e capovolta; i numeri stampati sul retro delle pastiglie verranno segnati ed uniti in successione, nell'ordine in cui appaiono disposte, nel grafico apposito. La continuità della successione assicura l'assenza della deficienza, mentre la discontinuità ne conferma la presenza ed evidenzia subito eventuali assi di confusione. Può essere utilizzato per bambini sin dall'età di 4 anni, negli analfabeti ed in soggetti con acuità visiva molto ridotta. Questo test è particolarmente indicato per la diagnosi dei dicromati e nelle forme gravi di discromatopsie acquisite; risulta invece poco sensibile nei tricromati anomali e nelle forme leggere di discromatopsie acquisite. Esiste anche una versione del test con 100 tinte ma è di più difficile esecuzione e quindi poco utilizzato.



Fig. 4.6 Test Farnsworth 15 Tinte



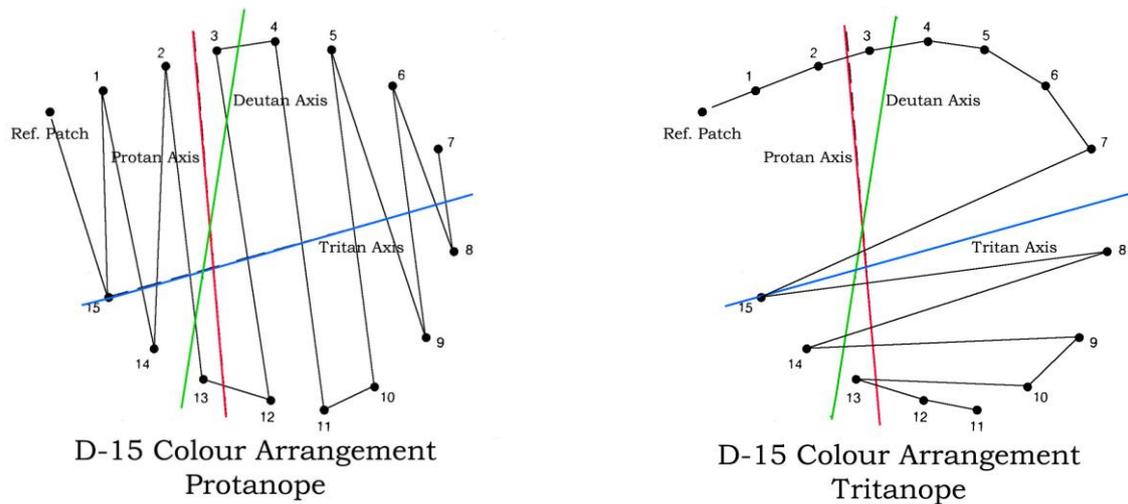


Fig. 4.7 Grafici di comparazione per l'individuazione della deficienza in base alla disposizione dei colori da parte dell'esaminato.

4.2.3. Test di eguaglianza: Anomaloscopio di Nagel

L'anomaloscopio di Nagel è 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 gialla. Scopo del test è bilanciare la luce rossa, la verde e la gialla, variandone l'intensità con dei comandi, in modo da eguagliare il colore dei due semicampi. Il test consente di individuare i difetti del senso cromatico attinenti alla visione del rosso e del verde. Infatti il daltonico tenderà ad utilizzare in misura maggiore il colore che percepisce con maggiore difficoltà. L'anomaloscopio appena descritto è Nagel di tipo I; esiste l'anomaloscopio di Nagel di tipo II che permette invece di evidenziare discromatopsie di asse giallo-blu.



Fig.4.8 Anomaloscopio di Nagel

4.2.4. Test ColorLITE

Il libro ColorLite per la visione dei colori si basa sul riconoscimento all'interno di cerchietti colorati di figure rappresentanti anelli di Landolt poste in 8 direzioni (Fig. 4.9). Può essere utilizzato, data la sua semplicità, anche con i bambini e gli illetterati. Il test si divide in tre serie di tavole: la prima serie è rosso-verde e va dal grado di difficoltà 300, il più facile, al grado 20 il più difficile; la seconda serie è viola-blu e la terza è viola-verde e vanno dal grado di difficoltà 200, il più facile, al grado 30, il più difficile. Le figure passano dal colore acceso caratteristico della serie (rosso, blu, verde) verso le variazioni sempre più difficili da distinguere. La persona esaminata avanza gradualmente nel riconoscimento delle figure finché non è più capace di dare la risposta giusta su dove si interrompe l'anello. Se il soggetto nella prima serie arriva a distinguere le figure nelle tavole di grado maggiore di 30, allora soffre di discromatopsia. Per determinare il tipo di discromatopsia si esegue il test con la serie viola-blu e viola-verde; la discromatopsia di tipo protan implica più sbagli nella serie viola-blu, la discromatopsia di tipo deutan implica più sbagli nella serie viola-verde. Se il soggetto produce gli stessi risultati per le due serie, sarà di tipo deutan. Si ripete il test nella serie rosso-verde con l'occhialino di prova nel quale si scambiano i 5 filtri correttivi P10-15-20-25-30 per il tipo protan e D10-15-20-25-30 per il tipo deutan. La migliore correzione sarà raggiunta dal tipo di filtro con quale il soggetto ha potuto distinguere più figure. Fondamentalmente il test ColorLite valuta lo spostamento della funzione di sensibilità (esempio in figura 4.10) del fotorecettore difettoso rispetto a quello normale, in nanometri. L'applicazione della teoria del *parallel shift* (spostamento parallelo) consente non solo una diagnosi più accurata della CVD (color vision deficiency), ma allo stesso tempo permette di suggerire la migliore lente correttiva.



Fig. 4.9 Test e Filtri ColorLite

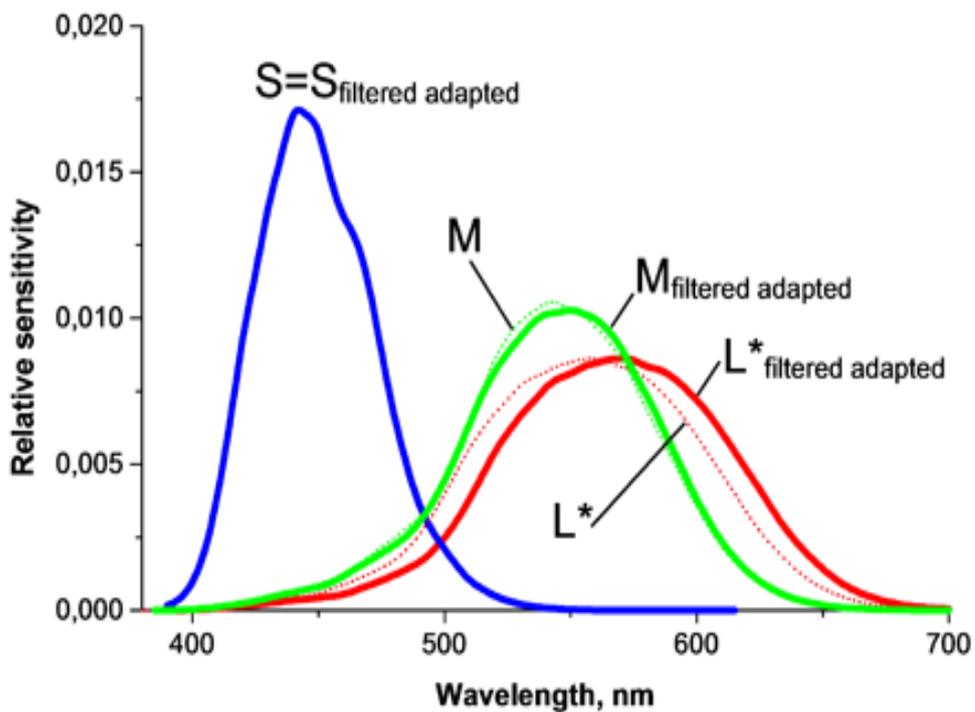
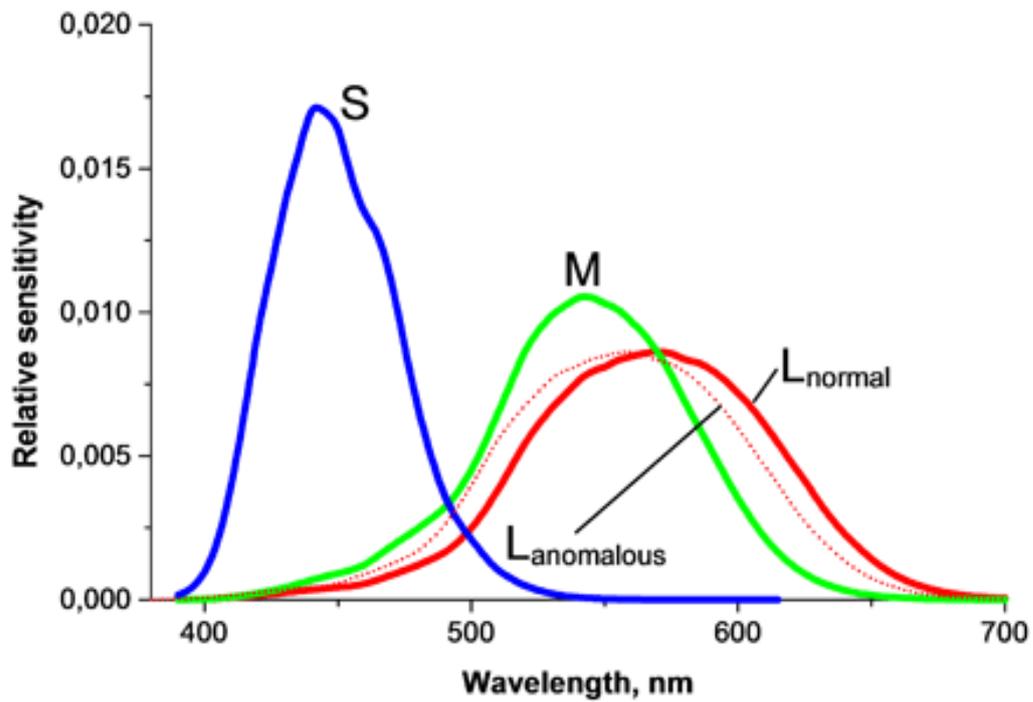


Fig 4.10 Funzioni di sensibilità del cono di L, M e S di un soggetto normale e di un soggetto deutan. I coni M e S si sovrappongono completamente; la differenza è nella sensibilità del cono L. La seconda figura mostra la compensazione con filtro.

Capitolo 5

Valutazione dei filtri ColorLite per la compensazione della CVD

5.1. Scopo

La rete è una fonte inesauribile di informazioni e di strumenti. Usando Google Chrome, è possibile aggiungere un'estensione che si chiama *Chrome Daltonize!* (Fig. 5.1) che promette di migliorare la lettura per i daltonici selezionando nel menù del software il tipo di difetto visivo dei colori (protanopia, deuteranopia, tritanopia) ed eseguendo il caricamento della pagina si assiste alla “daltonizzazione” (fig.5.2), una tecnica così descritta dagli sviluppatori per l'esposizione dei dettagli agli utenti daltonici, consentendo loro di vedere cose che altrimenti avrebbero perso.

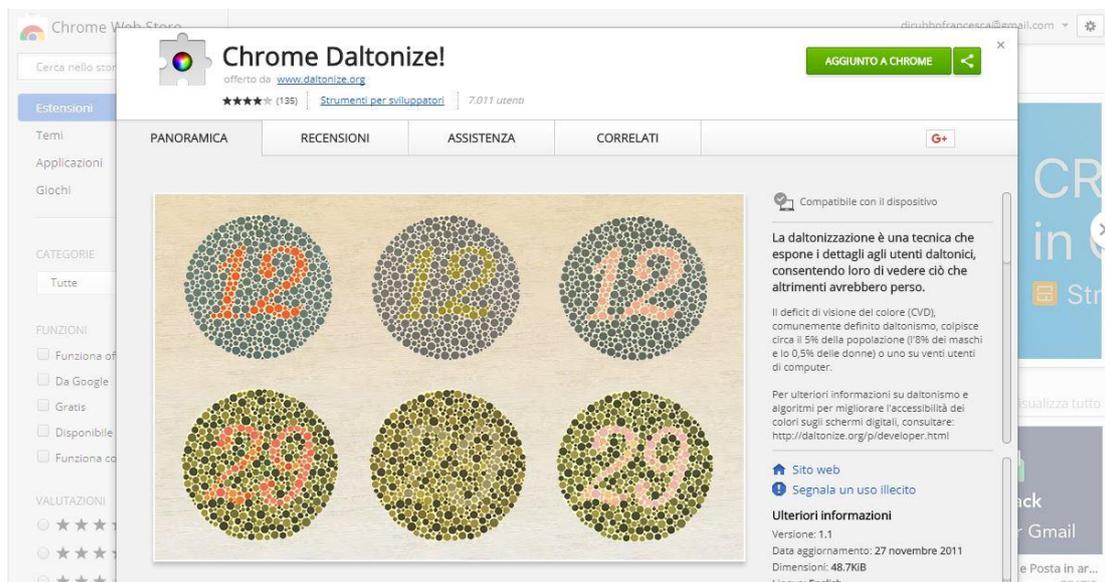
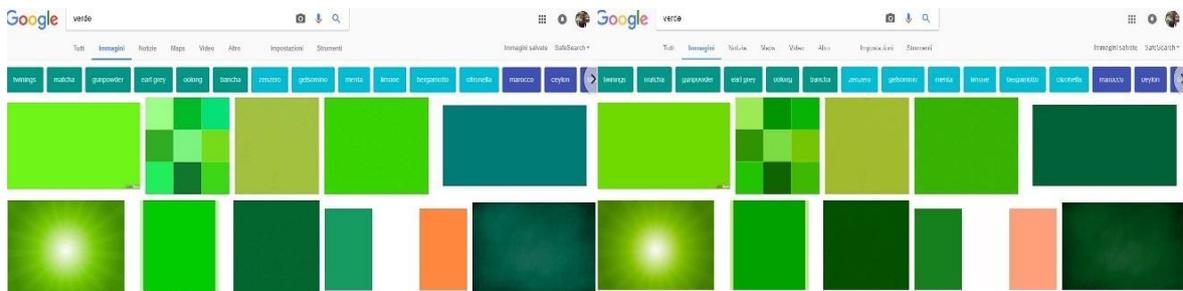


Fig. 5.1 Estensione Chrome Daltonize!



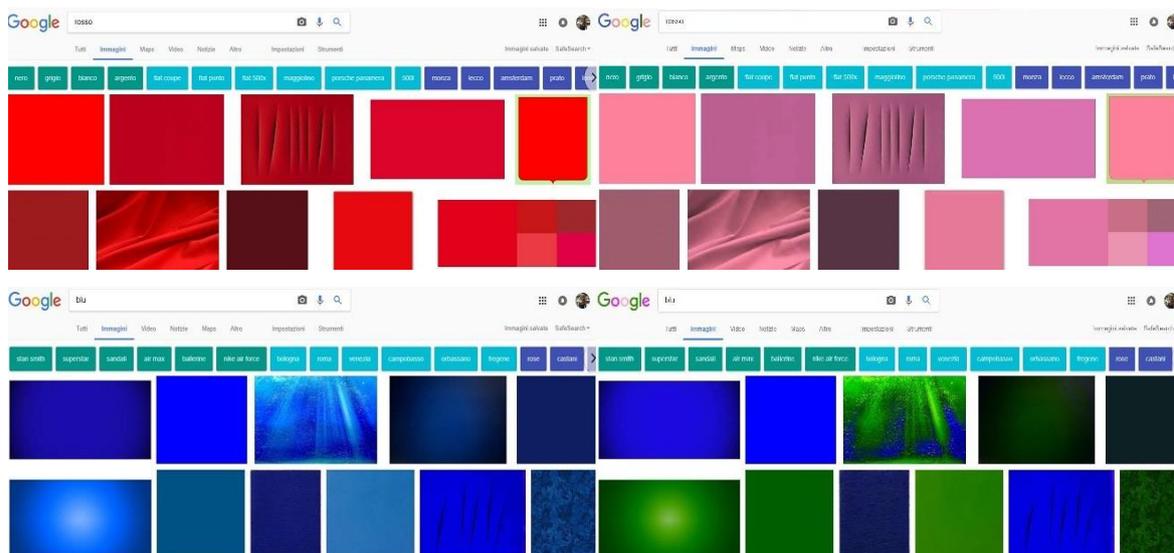


Fig. 5.2 Mostra come i colori verde, rosso e blu in figura a sinistra, appaiono modificati nelle figure a destra dopo l'aggiunta dell'estensione Chrome Daltonize! per rispettivamente soggetti deuteranopi, protanopi e tritanopi

Lo scopo di questo studio è di capire se nella vita reale i filtri della ColorLite possono riprodurre ciò che virtualmente fa il software di Chrome daltonize; ovvero modificare lo spettro dei colori in funzione della discromatopsia di cui è affetto un soggetto, rendendo la visione colori uguale a quella di un soggetto normale.

5.2. Studio dei filtri ColorLite con uno spettrofotometro

La spettrofotometria è una tecnica analitica, qualitativa e quantitativa che permette il riconoscimento e la quantizzazione di una sostanza in base al suo spettro di assorbimento della luce. In linea di principio uno spettrofotometro è costituito da:

- Una sorgente, cioè una lampada che emette radiazioni nell'intervallo spettrale di misura
- Un monocromatore, che seleziona le lunghezze d'onda in arrivo dalla sorgente
- Un compartimento celle o cuvette, in cui è posto il campione
- Un rivelatore, che misura l'intensità della radiazione
- Un elaboratore dati che fornisce i valori delle misure di assorbimento.

I campioni sottoposti a spettrofotometria sono stati tutti e 10 i filtri della ColorLite (P10-15-20-25-30, D10-15-20-25-30) che hanno prodotto curve di assorbimento osservabili in figura 5.3.

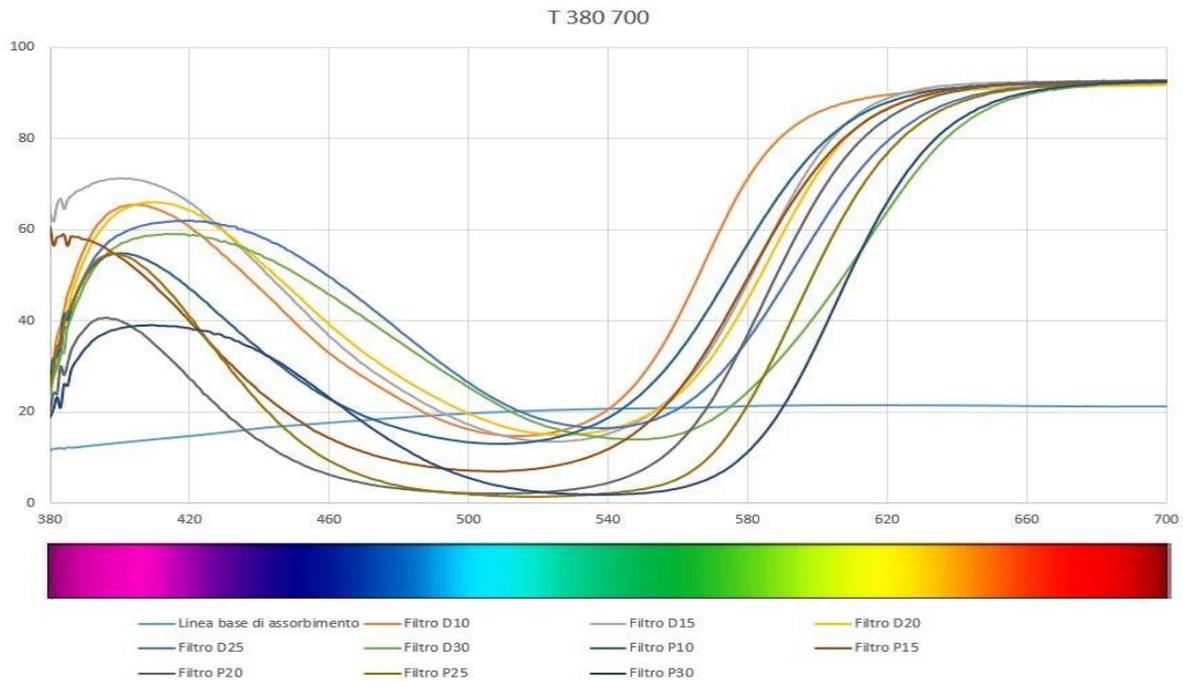


Fig. 5.3 curve di assorbimento filtri ColorLite

5.3. Strumenti e metodo

Come primo strumento di diagnosi è stato utilizzato un tablet su cui veniva proposto tramite il sito di Colblindor (<http://www.color-blindness.com/ishihara-38-plates-cvd-test/#prettyPhoto/1/>) il test online delle tavole di Ishihara. Il risultato veniva acquisito per un primo confronto con i dati provenienti dal test cartaceo delle Tavole di Ishihara, in assoluto il più diffuso (e datato) sistema di riconoscimento delle discromatopsie. Determinato il tipo di daltonismo, si procedeva utilizzando i filtri della ColorLite di tipo P o D, rispettivamente per i soggetti protan e deutan, per trovare la migliore lente compensatrice. Come terzo e ultimo test si utilizzava il libro della ColorLite con i suoi relativi filtri, effettivi oggetti del nostro studio, con i quali si procedeva nelle misurazioni analogamente al secondo test; ovvero venivano proposte ai soggetti le tre serie: rosso-verde, viola-blu e viola-verde senza filtri per determinare il tipo di daltonismo per poi procedere con la compensazione con i filtri.

5.4. Analisi dati dei soggetti

Sono stati reclutati 12 soggetti con deficit congenito della visione dei colori, di sesso maschile e di età compresa tra i 10 e i 60 anni, nella città di Benevento. Dopo aver sottoposto i 12 soggetti alla lettura dei tre test, rispettando i criteri di:

- Luce: parametro estremamente importante al fine di non alterare la visione dei colori. I tre test per tutti i soggetti in analisi sono stati eseguiti di mattina, nell'arco delle ore 10-14, quando gli ambienti sono illuminati da luce solare, classificata come luce naturale ed equivalente a circa 5500 °K.
- Distanza: 30-40 centimetri;
- Tempo di lettura: 10 secondi.

È emerso che:

7 soggetti sono affetti da deuteranopia;

2 soggetti sono affetti da deuteranomalia;

2 soggetti sono affetti da protanomalia;

1 soggetto è affetto da tritanopia riscontrata solo tramite test online.

In particolare la classificazione è stata possibile, oltre che dal chiaro risultato del test online, osservando le risposte date alle tavole 22-27 per le tavole di Ishihara e confermate dagli sbagli per il riconoscimento dell'apertura dell'anello nelle serie viola-blu o viola-verde per le tavole di ColorLite. Nelle pagine successive vengono riportate le risposte soggettive ai test sotto forma di tabelle, nonché il loro raggruppamento in base al deficit cromatico:

- Tabella 1: Risposte test online;
- Tabella 2.1: Risposte tavole di Ishihara cartacee senza filtro
- Tabella 2.2 Risposte tavole di Ishihara cartacee con miglior filtro correttivo;
- Tabella 3: Risposte tavole ColorLite e miglior filtro correttivo ottenuto.

Tabella 1.

DEFICIT VISIVO	SOGGETTO											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Protanopia												
Protanomalia					X		X					
Deuteranopia		X	X			X		X	X	X	X	
Deuteranomalia	X			X								
Tritanopia												
Tritanomalia												X

Tabella 2.1

N° TAVOLA	SOGG. NORMALE	DEFICIT VISIVO ROSSO-VERDE										
		LIEVE PROTAN		DEUTERANOPIA							LIEVE DEUTAN	
		SOGG. N°		SOGGETTO N°							SOGG. N°	
		5	7	2	3	6	8	9	10	11	1	4
1	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
2	8	3	X	X	X	X	3	X	X	X	X	8
3	6	5	X	X	6	X	6	(6)	X	6	X	8
4	29	70	X	X	10	X	10	X	X	76	X	20
5	57	15	3	X	66	X	36	X	X	X	X	31
6	5	2	2	2	X	2	2	2	2	8	2	6
7	3	5	5	5	5	6	6	5	3	5	8	8
8	15	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	15
9	74	21	21	X	21	21	21	21	21	21	81	81
10	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
11	6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12	97	X	X	X	X	15	X	X	29	X	X	X
13	45	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
14	5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	6
15	7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1
16	16	2	X	X	X	X	X	X	X	14	X	18
17	73	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
18	X	5	5	5	5	5	6	5	5	5	5	5
19	X	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	8
20	X	45	45	45	45	45	46	45	45	45	45	X
21	X	25	23	23	2()	75	26	23	29	21	73	X
22	26	(2)6	86	2	2	2(4)	2	2	2	2()	2(6)	2(8)
23	42	2	2	4	4	4	4	42	4	4	4(2)	4(2)
24	35	(3)5	(3)5	X	3()	3	3	35	X	3	3	35
25	96	(9)6	6	9	9	9	9	9	9	9	9(8)	96
26	Linea viola e rossa	> Linea viola	> Linea viola	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	> Linea rossa	> Linea rossa
27	Linea viola e rossa	> Linea viola	> Linea viola	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	Solo rossa	> Linea rossa	> Linea rossa
28	X	X	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	X	X	Linea	Linea	X
29	X	X	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	X	X	Linea	Linea	X
30	Linea blu-verde	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
31	Linea blu-verde	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
32	Linea arancio	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

33	Linea arancio	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
34	Linea blu-verde e giallo-verde	Linea blu-verde e viola	Linea blu-verde e viola	X	Linea blu-verde e viola							
35	Linea blu-verde e giallo-verde	Linea blu-verde e viola	Linea blu-verde e viola	X	Linea blu-verde e viola							
36	Linea viola e arancio	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde	X	Linea viola e blu-verde	X	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde			
37	Linea viola e arancio	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde	X	X	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde	X	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde	Linea viola e blu-verde
38	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea	Linea
Miglior lente compensatrice		P25	P15	D30	D20	D10	D30	D20	N	D25	D25	D25

Legenda:

X significa numeri non letti, per le tavole 30-37 significa numeri letti ma sbagliati

() significa numeri poco chiari

Tabella 2.2

N° TAVOLA	SOGG. NORMALE	DEFICIT VISIVO ROSSO-VERDE										
		LIEVE PROTAN		DEUTERANOPIA							LIEVE DEUTAN	
		SOGG. N°		SOGGETTO N°							SOGG. N°	
		5	7	2	3	6	8	9	10	11	1	4
Lente correttiva		P25	P15	D30	D20	D10	D30	D20	N	D25	D25	D25
22	26	26	23	2	26	28	26	26	/	26	26	26
23	42	42	42	4	42	42	4	42	/	42	42	42
24	35	35	35	35	35	35	36	35	/	35	35	35
25	96	96	93	96	96	96	96	96	/	96	96	96

Legenda:

N significa che nessuna lente è stata in grado di migliorare la percezione dei colori

Consideriamo solo le risposte alle tavole 22-25 in quanto sono sufficienti ai fini valutativi

Tabella 3.

SOGG. N°	SERIE ROSSO- VERDE	SERIE VIOLA- BLU	SERIE VIOLA- VERDE	DISCROMATOPSIA	MIGLIOR LENTE CORRETTIVA	LEGGE NELLA SERIE R-V
1	220	160	200	Deutan	D25	80
2	260	80	80	Deutan	Nessuna	
3	300	60	100	Deutan	D15	80
4	100	120	120	Deutan	P30	60
5	280	80	60	Protan	P25	60
6	220	60	60	Deutan	P25	40
7	X	100	60	Protan	P15	100
8	260	80	80	Deutan	Nessuna	
9	X	80	200	Deutan	D25	60
10	X	160	200	Deutan	Nessuna	
11	X	100	X	Deutan	D15/D20	100

Nei grafici sottostanti si ripropongono le curve di assorbimento dei filtri correttivi della ColorLite, in particolare dei soli filtri risultati utili alla compensazione della CVD, in relazione alle curve di assorbimento dei coni verde e rosso:

- Grafico 1, curve di assorbimento dei coni V e R con filtri P;
- Grafico 2, curve di assorbimento dei coni V e R con filtri D.

Grafico 1

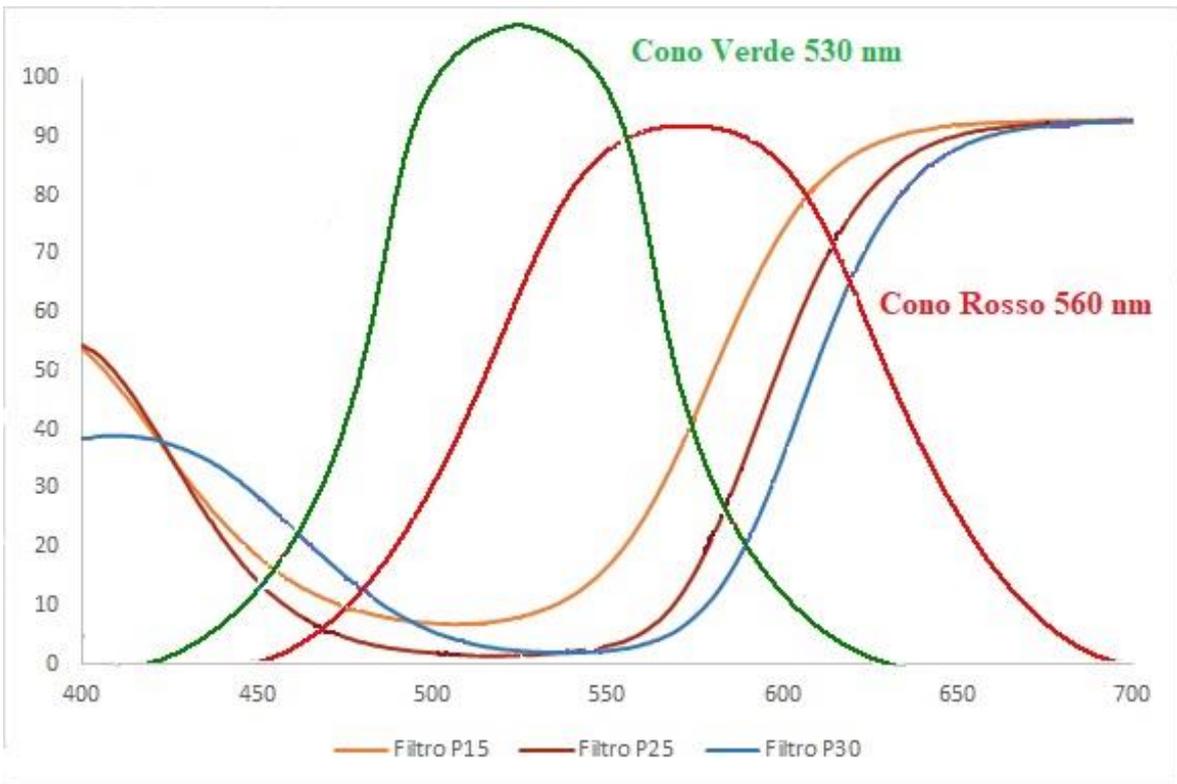
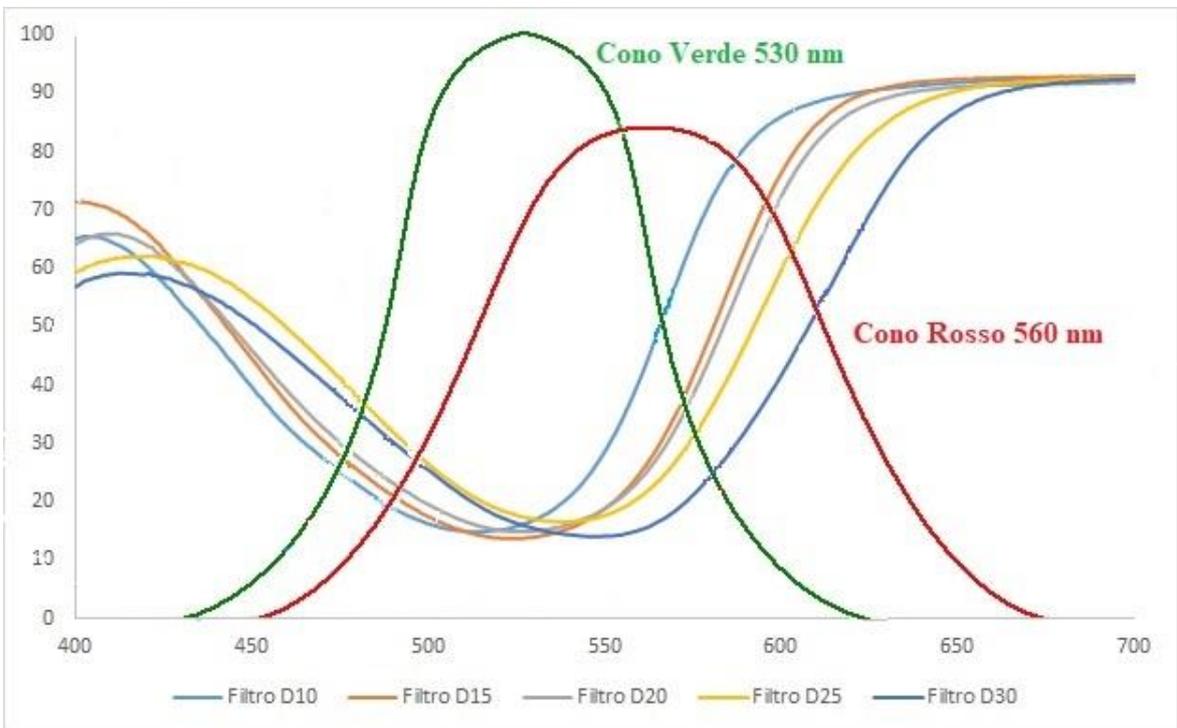


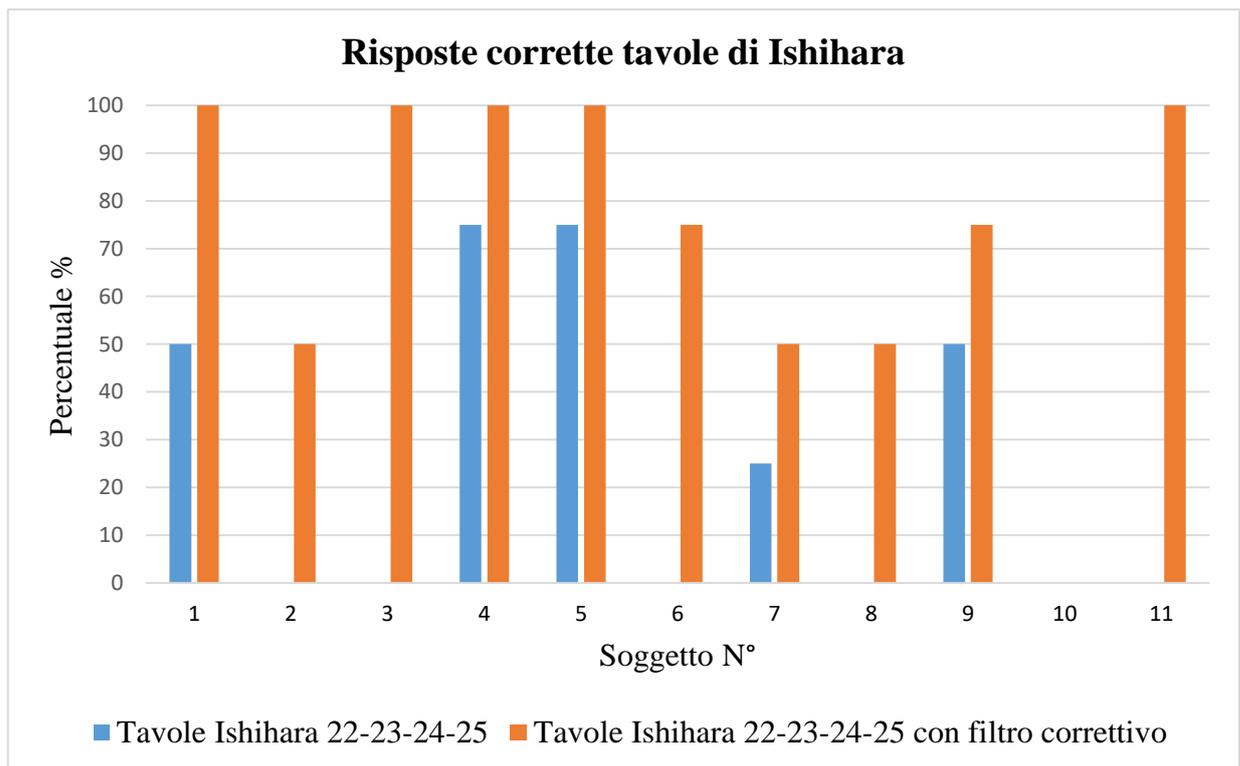
Grafico 2



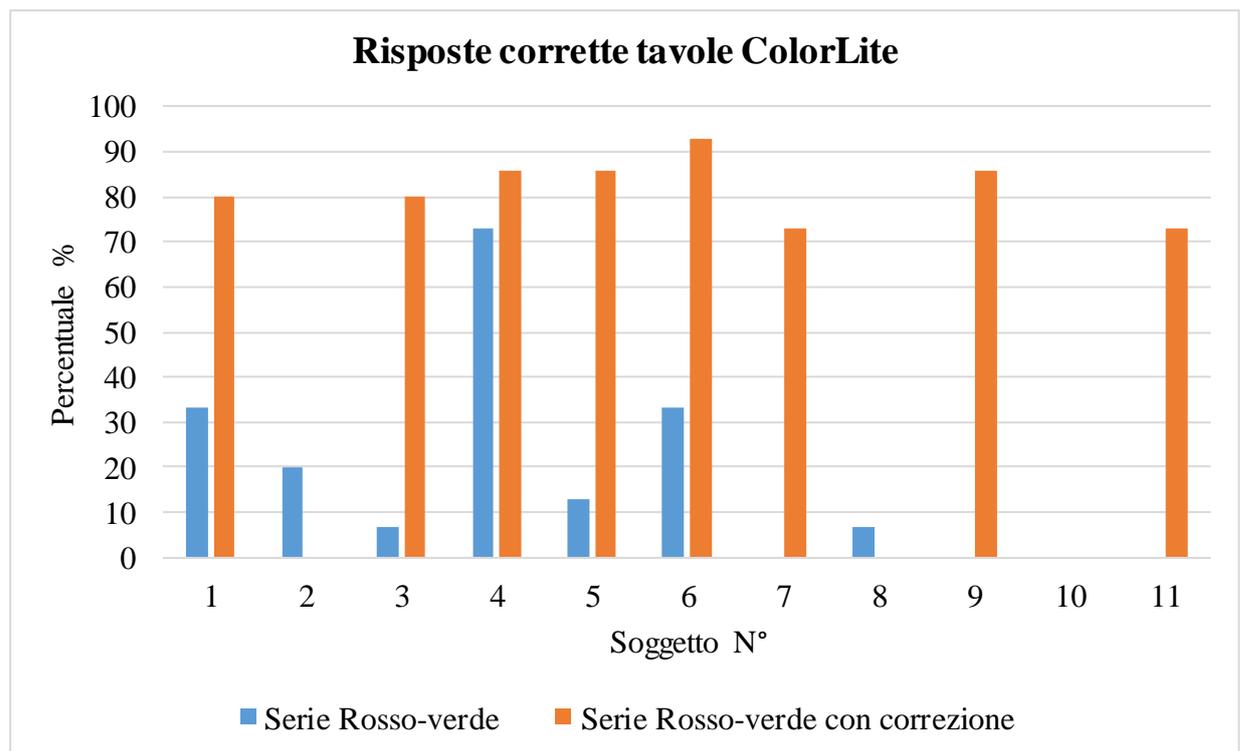
Nei seguenti istogrammi sono state messe in relazione le risposte degli 11 soggetti per entrambe le tavole, con e senza filtro, al fine di quantificare in modo percentuale il miglioramento della lettura delle tavole ottenuto con i filtri:

- Istogramma 1, risposte corrette tavole di Ishihara;
- Istogramma 2, risposte corrette tavole ColorLite.

Istogramma 1



Istogramma 2



5.5. Discussione risultati

Dallo studio è emerso che 7/12 soggetti sono affetti da deuteranopia, 2/12 soggetti sono affetti da deuteranomalia, 2/12 soggetti sono affetti da protanomalia e 1 solo soggetto è affetto da tritanomalia. Possiamo quindi ipotizzare che il difetto visivo dei colori con maggiore incidenza sulla popolazione è quello dei coni M (lunghezza d'onda media, sensibilità verde). I soggetti 3 e 4 (padre e figlio), 5 e 6 (fratelli), 8 e 12 (nonno e nipote), confermano la trasmissione genetica del difetto visivo dei colori ma evidenziano che la tipologia del difetto visivo non è la stessa. Dal confronto del test online delle tavole di Ishihara con quello cartaceo è emerso che:

- I test hanno prodotto i medesimi risultati per quanto riguarda l'individuazione della discromatopsia;
- Le risposte alle tavole sul tablet sono state più immediate, in quanto giocano un ruolo importante la luminosità, il contrasto e l'inclinazione dello schermo.

Dal confronto del test 2 con il test 3 è emerso che:

- I test hanno prodotto i medesimi risultati per quanto riguarda l'individuazione della discromatopsia;

- Con le tavole di Ishihara solo per un soggetto non è stata trovata la miglior lente compensatrice, mentre con le tavole della ColorLite il numero dei soggetti sale a 3.
- Per la maggior parte dei soggetti la lente compensatrice trovata nei due test era diversa;
- Il soggetto 6 nonostante fosse stato individuato di tipo deutan, con le tavole della Colorlite ha trovato come miglior lente compensatrice la P30.

5.6. Cure future

Fino a qualche anno fa, l'idea di una cura per il daltonismo era un sogno teorico che coinvolgeva la terapia genica, apparentemente al di là delle nostre capacità mediche. Tuttavia nel 2009 fu pubblicato online sul sito della rivista "Nature" un articolo che riportava i risultati positivi della terapia genica per la correzione del daltonismo in alcune scimmie scoiattolo, precedentemente addestrate a riconoscere e distinguere i diversi colori, condotto da un gruppo di ricerca dell'*University of Washington di Seattle* (USA) con a capo i docenti: Jay Neitz e Maureen Neitz. Le scimmie, denominate Dalton e Sam, mancavano entrambe di un gene noto come L-opsina che fornisce le informazioni per i coni L (lunghezza d'onda lunga, sensibile al rosso), stessa causa della cecità dei colori rosso-verde negli umani. La cura viene somministrata iniettando un virus contenente informazioni genetiche alterate che forniscono il gene dell'opsina L mancante direttamente nella retina. Per un periodo di 24 settimane, la sensibilità alla luce dei coni negli occhi delle scimmie si è spostata verso lo spettro rosso, un'area che in precedenza non erano in grado di distinguere chiaramente. In oltre due anni, l'iniezione della terapia genica alle scimmie adulte non ha mostrato effetti collaterali. Gli scienziati, visti gli entusiasmanti risultati, pensano che un trattamento simile in futuro possa essere utilizzato per curare discromatopsie più invalidanti come l'acromatopsia.

Conclusioni

La vista è il senso umano più importante: il 90% di tutte le informazioni ricevute infatti proviene da esso, il 5% dall'udito, il 2% dal tatto, il 2% dal sapore e l'1% dall'odore. La perdita di informazioni dovuta ad un'anomalia della visione del colore impedisce o rallenta la comprensione, aumenta il tempo di reazione e generalmente riduce la qualità della vita. Abbiamo visto che statisticamente l'8% degli uomini e lo 0,5% delle donne è affetto da una carenza di visione dei colori; in questa tesi infatti tutti i soggetti in esame sono di sesso maschile a conferma delle statistiche. I soggetti sono stati sottoposti a diversi test per l'evidenziazione della presenza delle discromatopsie; di questi si può dire che: il test digitale della visione dei colori (tavole di Ishihara) è il metodo più veloce e più facile, viene eseguito autonomamente dal soggetto e consente il calcolo automatico del punteggio ma i risultati non sono affidabili in quanto alterati dall'illuminazione dello schermo. Come prima conclusione della sperimentazione possiamo dire che, il test online delle tavole di Ishihara è utile al fine dell'individuazione della discromatopsia ma rimane uno strumento di diagnosi approssimativa del deficit della visione dei colori. Il test cartaceo delle tavole di Ishihara è il più preciso e datato metodo di evidenziazione del difetto visivo; da questa sperimentazione si evince che le recenti tavole della ColorLite possono essere delle valide concorrenti, in quanto con entrambi i metodi è stato possibile individuare lo stesso grado di difetto visivo dei colori. In ultima analisi, utilizzando i filtri della ColorLite su entrambe le tavole è emerso che la migliore lente compensatrice non risultava la stessa e che non in tutti i casi è stato possibile portare i soggetti al raggiungimento della normale visione dei colori.

Bibliografia

1. Ferdinando Catalano, *ELEMENTI DI OTTICA GENERALE*, Zanichelli
2. Paul A. Tipler - Gene Mosca, *Corso di fisica vol.2*, Zanichelli.
3. Frova A., *Luce colore e visione*, Rizzoli.
4. Anto Rossetti e Pietro Gheller, *manuale di optometria e contattologia*, Zanichelli
5. P. Palladino, *Lezioni di illuminotecnica*, Ed. Tecniche Nuove, 2002
6. Hunt, David M., “*the chemistry of John Dalton’s color blindness*”, Science, 1995
7. G. J. Chamberlin, *The CIE international colour system*. Traduzione italiana a cura di Volpones, C. Zanichelli Editore, Bologna, 1955.
8. http://www.federica.eu/l/la_natura_della_luce_e_le_sue_caratteristiche_fi70d65#6
9. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
10. https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_visibile
11. <https://it.wikipedia.org/wiki/Colore>
12. https://www.laleggepertutti.it/147698_da-samsung-la-tv-per-i-daltonici
13. <http://enchroma.com/test/instructions/>
14. <http://www.colourvision.info/>
15. http://web.taed.unifi.it/fisica_tecnica/dispense/fond_luce.pdf
16. http://web.mclink.it/MD4223/scritti/2002/g_colori/colori05.htm
17. <http://www.federica.unina.it/architettura/fisica-tecnica-ambientale-illuminotecnica/meccanismo-visione/>
18. <http://commons.pacificu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1026&context=opt>
19. <http://www.colour-blindness.com/>
20. http://www.colourvision.info/color_vision_deficiency_colour_blindness.php#informationen2d
21. <http://www.colblindor.com/>
22. <http://www.comevedonoidaltonici.com/wp-content/uploads/linee-guida-novembre-2016.pdf>

Elenco delle figure

	Pagina
Figura 1.1 Caratteristiche di un'onda e.m.	6
Figura 1.2 Modello spettro elettromagnetico	6
Figura 1.3 Composizione della luce bianca	8
Figura 1.4 Scala temperatura di colore	9
Figura 2.1 Strati della retina	11
Figura 2.2 Coefficienti di visibilità spettrale	12
Figura 2.3 Curve di assorbimento della luce da parte dei tre tipi di coni...	13
Figura 3.1. Sintesi sottrattiva e additiva	15
Figura 3.2. Opponenza cromatica	16
Figura 3.3. Contrasto simultaneo	17
Figura 3.4. Contrasto successivo	17
Figura 3.5. Costanza cromatica	17
Figura 3.6. Disco rotante di Newton	18
Figura 3.7. Diagramma CIE	19
Figura 4.1. Spettri di assorbimento semplificati per tricromia anomala	21
Figura 4.2. Tricromia anomala	21
Figura 4.3. Spettri di assorbimento rimanenti in deuteranopia e protanopia	22
Figura 4.4. Dicromie	22
Figura 4.5. Tavole di Ishihara	24
Figura 4.6. Test Farnsworth 15 Tinte	25
Figura 4.7. Grafici test Farnsworth	26
Figura 4.8. Anomaloscopio di Nagel	26
Figura 4.9. Test e Filtri ColorLite	27
Figura 4.10. Funzioni di sensibilità del cono di L, M e S	28
Figura 5.1. Estensione Chrome Daltonize!.....	29
Figura 5.2. Come appaiono i colori in Chrome.....	30
Figura 5.3. Curve di assorbimento filtri ColorLite.....	31

Ringraziamenti

Al Prof. Paolo Carelli, che mi ha dato la possibilità di approfondire con entusiasmo l'argomento di questa tesi che ho trovato davvero interessante, grazie per il tempo e la disponibilità dedicatami durante lo svolgimento della stessa.

Al Prof. Antonio Sasso, per l'aiuto e la gentilezza con cui mi ha accolto nel suo laboratorio.

Ai miei genitori, grazie per aver sempre creduto che ce la potessi fare anche quando non ero convinta neanche io. Grazie per avermi donato l'amore dei miei fratelli, Arianna, Matteo e Aurora, siete voi i miei colori della vita, vi voglio bene e voglio darvi il migliore augurio per i vostri futuri anni di studi.

A Francesco, sempre vicino in ogni traguardo. Grazie per la fiducia, la comprensione e l'amore.

Alla mia famiglia, zii, nonni e cugini, grazie per avermi sopportata e supportata in questi anni di studio.

Ad Erika, Lara e Graziella, le amiche di una vita, con voi al mio fianco è iniziato e si è concluso questo percorso di studi; mi avete consolato nei momenti di difficoltà e ricordato di avere anche una vita sociale 😊

A Laura, la migliore coinquilina che potessi avere; grazie per le grasse risate, le confidenze e i consigli, grazie per i risvegli amorevoli con i post-it, i regali e le passeggiate.

Agli amici degli scout, grazie per aver condiviso con me avventure fantastiche, senza la vostra pazienza non sarei riuscita a conciliare l'amore per lo scautismo e lo studio.

A Francesca, per essersi prodigata con tanta buona volontà alla ricerca dei soggetti per questa tesi.

A Sergio e la sua famiglia, per l'affetto, la disponibilità e gli insegnamenti datomi nei mesi di tirocinio passati nell'ottica.

A Tony, Alessandro, Loris, Gaspare, Bernardo e a tutti coloro che mi hanno aiutato prestandosi da soggetti per la mia ricerca.

A chi ha incrociato il mio cammino, lasciandomi qualcosa di sé e prendendo un po' di me.

Grazie di cuore a tutti.