

Colore e Colorimetria Contributi Multidisciplinari

Vol. XX B

A cura di Filippo Cherubini e Andrea Siniscalco



www.gruppodelcolore.org

*Regular Member
AIC Association Internationale de la Couleur*

Colore e Colorimetria. Contributi Multidisciplinari. Vol. XX B

A cura di Filippo Cherubini e Andrea Siniscalco

Pubblicato dal Gruppo del Colore - Associazione Italiana Colore

Research Culture and Science Books series (RCASB), ISSN: 2785-115X

ISBN 978-88-99513-31-3

DOI: 10.23738/RCASB.017

© Copyright 2025 by Gruppo del Colore - Associazione Italiana Colore

Piazza C. Caneva, 4

20154 Milano

C.F. 97619430156

P.IVA: 09003610962

www.gruppodelcolore.it

e-mail: segreteria@gruppodelcolore.org

Diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione
e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.

Pubblicato nel mese di Dicembre 2025

Colore e Colorimetria. Contributi Multidisciplinari Vol. XX B

*Atti della ventesima Conferenza del Colore.
Conferenza
4-5 Settembre 2025*

Chair

Francesca Fragliasso, Università degli Studi di Napoli Federico II

Giuliana Ramella, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per le Applicazioni del Calcolo “M. Picone”

Andrea Siniscalco, Politecnico di Milano

Comitato di Programma

Angelo Ciaramella, Università degli Studi di Napoli Parthenope

Laura Bellia, Università degli Studi di Napoli Federico II

Francesca Diglio, Università degli Studi di Napoli Federico II

Emanuel Di Nardo, Università degli Studi di Napoli Parthenope

Filippo Cherubini, IFAC CNR, GdC – Associazione Italiana Colore

Segreteria Organizzativa

Sofia Ceccarelli, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale

Valutazione della compatibilità tra algoritmi di daltonizzazione

Daniele Aurelio, Federica Baroni, Ester Cacciola, Federica Corda, Carlo Alberto Iocco,
Beatrice Sarti, Alessandro Rizzi

Dipartimento di Informatica “Giovanni Degli Antoni”, Università degli Studi di Milano, Via
Giovanni Celoria, 18, 20133 Milano MI
Contatto: daniela.aurelio@unimi.it

Abstract

Il daltonismo, condizione visiva che riduce la capacità di percepire correttamente i colori a causa di anomalie nei fotorecettori retinici, esiste in tre forme principali note come protanopia, deuteranopia e tritanopia, che derivano da mutazioni nei coni L, M e S, cellule specializzate poste sulla retina che agiscono come recettori fotosensibili e la cui risposta spettrale ha rispettivamente il massimo nelle lunghe (L), medie (M) e corte (S) lunghezze d'onda. Al fine di comprendere e simulare meglio queste condizioni, negli anni sono stati sviluppati diversi modelli e algoritmi di simulazione della visione daltonica, tramite i quali anche gli osservatori standard possono comprendere l'effetto della riduzione della gamma cromatica causata da questa condizione. Obiettivo di questo contributo è proprio l'analisi, l'implementazione e il confronto tra i principali algoritmi di daltonizzazione, per valutarne la compatibilità e i limiti attraverso dati iperspettrali e metriche percettive.

Keywords: daltonismo, daltonizzatori, algoritmi, colore

Daltonismo

La discromatopsia (Simunovic, 2009; Moreira, 2017), comunemente chiamata *daltonismo*, prende il nome dallo scienziato John Dalton, che per primo ne descrisse i sintomi nel 1794. Questa alterazione della visione cromatica colpisce circa il 5% della popolazione mondiale, con una forte prevalenza maschile (8% negli uomini, 0,5% nelle donne) dovuta al legame genetico con il cromosoma X. La forma più comune è ereditaria e bilaterale, ma con minore probabilità il disturbo può anche derivare da cause acquisite, come patologie (sclerosi multipla, cataratta), esposizione a sostanze tossiche, traumi cranici o oculari, malattie metaboliche (diabete), oltre che dal normale processo di invecchiamento. Esistono tre categorie principali di discromatopsia: la prima è la tricromia anomala – la forma più lieve, in cui tutti i coni retinici sono presenti, ma uno risulta malfunzionante; la seconda è la dicromia – caratterizzata dall'assenza totale di uno dei tre coni, che riduce drasticamente la gamma cromatica percepita dall'osservatore; l'ultima forma, la più grave, è la monocromia, caratterizzata dalla presenza di un solo tipo di cono funzionante; nei casi estremi di acromatopsia il soggetto vede solamente in scala di grigi. E' possibile procedere con le suddivisioni per qualificare in maniera più puntuale il cono mancante o malfunzionante; è infatti possibile distinguere tra protanopia/protanomalia, deficit dei coni L (*long wavelength*, con picco sulle lunghezze d'onda del rosso), con attenuazione o perdita della percezione del rosso; deuteranopia/deuteranomalia, con deficit dei coni M (*medium wavelength*, con picco nelle lunghezze d'onda del verde), simile alla protanopia ma focalizzata sul verde; tritanopia/tritanomalia, la più rara tra le forme, dovuta a un deficit dei coni S (*short wavelength*, piccati sulle lunghezze d'onda del blu), spesso acquisita da traumi o patologie. L'impatto del daltonismo sulla vita quotidiana è variabile (Stoianov, 2019; Viénot, 1995): l'incapacità – o la capacità ridotta – di distinguere colori può rendere più difficile molte attività di tutti i giorni come cucinare, scegliere vestiti, usare dispositivi elettronici o interpretare segnali visivi; oltre alle evidenti implicazioni psicologiche, non essere in grado di distinguere alcuni colori può rappresentare un limite professionale in ambiti che richiedono una discriminazione accurata di questi, come nelle scienze, nella comunicazione o nel design. Il daltonismo può venire diagnosticato da specialisti medici per mezzo di diversi test (Almustanyir, 2020). I più frequentemente usati sono il test di Ishihara, basato su tavole con numeri o figure codificate da piccoli cerchi colorati, ottimo

per deficit rosso-verde; il test di Farnsworth–Munsell, basato sull’ordinamento di tasselli colorati, che risulta più preciso del test di Ishihara, ma anche più lungo e impegnativo; il test con anomaloscopia, strumento nel quale viene mostrato un campo cromatico bipartito le cui metà vanno eguagliate con opportune mescolanze di luci: questo è considerato lo standard diagnostico più affidabile, seppur più costoso e specialistico.

Spazi colore

La disciplina della colorimetria, nata dall’esigenza di formalizzare scientificamente la percezione del colore, si colloca tra fisica e fisiologia, e permette di descrivere il colore con modelli matematici, pur sapendo che questi non possono riprodurre interamente l’esperienza soggettiva della visione (Oleari, 2008). Al fine di uniformare i dati sperimentali, nel 1931 la Commissione Internazionale dell’Illuminazione (CIE) ha introdotto il concetto di “*osservatore standard*”, che stabilisce curve di risposta medie del sistema visivo umano. Uno dei risultati più importanti di questa disciplina è l’introduzione di diversi *spazi colore*, sistemi di coordinate utili a descrivere le sensazioni cromatiche e in generale descrivere e manipolare la percezione cromatica. Ogni spazio è legato a una funzione di mappatura che trasforma uno spettro luminoso in una terna di valori numerici. I principali spazi colore analizzati in questo articolo sono i seguenti:

1. **LMS** – Questo spazio, che più direttamente trae origine dalla fisiologia visiva, si basa sulle risposte spettrali dei tre tipi di fotorecettori retinali noti come coni (L, M, S per long, medium e short, dalla lunghezza d’onda in cui la risposta di questi sensori raggiunge il massimo). Lo spazio LMS è utile nello studio della percezione visiva umana e per spiegare fenomeni come il metamerismo; tuttavia, risulta meno pratico per applicazioni tecniche poiché le curve recettoriali si sovrappongono e non è percettivamente uniforme, ovvero la distanza euclidea tra i colori corrisponde alla distanza tra i colori percepiti.
2. **CIE XYZ** – Ottenuto nel 1931 (Datacolor, 2019), è il primo modello standardizzato, derivato dagli esperimenti di Wright e Guild, e ha il vantaggio di essere indipendente dai dispositivi, riuscendo pertanto a fungere da riferimento per altri spazi. Le coordinate (X, Y, Z) rappresentano rispettivamente la componente spettrale e la luminanza (Y). Da esso si ottiene il diagramma di cromaticità, usato per rappresentare *gamut* e confrontare sistemi di riproduzione.
3. **CIELAB e CIELUV** – Nati per correggere i limiti percettivi del diagramma di cromaticità, lo spazio CIELAB è uno spazio opponente che rappresenta i colori tramite tre coordinate: L^* (luminosità), a^* (asse rosso-verde) e b^* (asse blu-giallo). È più coerente con la percezione umana e ampiamente usato nell’industria tessile e nella grafica per misurare differenze cromatiche.
4. **RGB** – Spazio standard dei dispositivi digitali, il modello RGB si basa sulla sintesi additiva dei tre colori primari (rosso, R, verde, G, e blu, B). È dispositivo-dipendente, poiché la stessa terna può produrre colori diversi su schermi differenti. Per questo motivo sono stati definiti standard come sRGB (HP e Microsoft, 1996) e AdobeRGB, con *gamut* più ampio per applicazioni professionali.

La scelta dello spazio in cui immergere simulazioni e calcoli dipende dunque dal contesto – dalla riproduzione tecnica sino alla ricerca percettiva, passando per la visualizzazione digitale. In funzione del contesto, può inoltre rendersi necessario convertire i dati da uno spazio colore ad un altro così da potere sfruttare i vantaggi specifici di ciascuno spazio; queste trasformazioni vengono spesso formalizzate algebricamente tramite conversioni lineari, rappresentate per mezzo di una matrice 3x3, o tramite formule empiriche non lineari.

In ultimo, va evidenziato come sia possibile tracciare sul diagramma di cromaticità CIE_{xy} le cosiddette *linee di confusione*, insiemi di colori percepiti come identici dal soggetto daltonico. Esse

convergono in punti specifici (definiti copunctal points) diversi per ogni dicromia, e permettono un raggruppamento intuitivo delle sensazioni cromatiche che risulteranno indistinguibile nella visione daltonica. Il fenomeno è però descrittivo, e non tiene conto di eventuali strategie neurali di compensazione.

 Immagine di Input (RGB)	Coblis V2 (XYZ-based) Conversione RGB-XYZ > Conversione 3D-2D > Linee di confusione > Conversioni inverse	 Immagine alterata (RGB)
	Coblis V1, Machado (RGB-based) Definizione trasformazioni > Applicazione > Correzione	
	Brettel, Viènot, Vischeck, Asada (LMS-based) Conversione RGB-LMS > Ancore spettrali > Calcolo risposte > Conversioni inverse	

I principali algoritmi di daltonizzazione

Con algoritmi di daltonizzazione si intende un metodo computazionale per simulare i difetti della percezione cromatica in soggetti daltonici. Esistono diversi algoritmi, che seguono diversi approcci teorici. Coblis-V2 (Coblis, 2006) parte, ad esempio, dalla conversione di un'immagine RGB nello spazio XYZ, alterandone i valori cromatici in base ai modelli di deficit visivo, ri-convertendo nello spazio RGB l'immagine risultante per una più facile visualizzazione. Algoritmi come Coblis-V1 e Machado (Machado, 2009) seguono invece un approccio “RGB-based”, applicando opportune trasformazioni matriciali sui canali RGB, inglobando dati sperimentali e modelli color-opponent. In ultimo, algoritmi come Brettel (Brettel, 1997), Viènot (Viènot, 1999), Vischeck (Dougherty, 2000) e Asada (Asada, 2010) partono dallo spazio LMS, alterando i valori in funzione delle risposte mancanti dei coni e convertendo a RGB per facilitare la visualizzazione dell'immagine daltonizzata.

Di seguito una breve disamina dei principali algoritmi analizzati.

1. Color Blindness Simulator (Coblis, 2006): Uno dei primi strumenti divulgativi disponibili online. Consente di applicare filtri per simulare le principali forme di daltonismo (protanopia, deuteranopia, tritanopia). La prima versione (Coblis-V1) si basa su un modello empirico, utilizzando trasformazioni nello spazio RGB. È veloce e semplice da implementare, ma ha scarsa fedeltà percettiva, con risultati simulati spesso approssimativi. Coblis-V2 (HCIRN Color Blind Simulation) introduce correzioni più complesse, basate su trasformazioni nello spazio LMS (legati quindi alla fisiologia visiva dei coni retinici): i colori vengono prima convertiti da RGB a LMS, alterati secondo le curve tipiche del deficit, e infine riconvertiti in RGB. Ciò migliora la fedeltà percettiva, ma aumenta il costo computazionale.
2. Algoritmo di Brettel (Brettel, 1997): Un approccio più rigoroso, molto usato in letteratura. Si fonda su modelli lineari nello spazio LMS: i valori di un cono mancante (ad esempio, L per la protanopia) vengono stimati come combinazione degli altri due. Viene individuata la linea di confusione sul diagramma di cromaticità e il colore originale viene proiettato su questa linea. Successivamente si riconverte il risultato nello spazio RGB. Punti di forza di questo algoritmo sono il realismo e la solidità teorica; tuttavia, il metodo può introdurre distorsioni e perdita di saturazione, specialmente nelle tonalità critiche (rosso-verde).
3. Algoritmo di Viènot (Viènot, 1999): Questo metodo consiste in un perfezionamento del modello di Brettel. Lo spazio di partenza è sempre quello LMS, ma viene introdotta una simulazione percettiva più accurata, in particolare tenendo conto del fatto che i soggetti daltonici non hanno una percezione “vuota” dei colori mancanti, ma rielaborano lo stimolo attraverso i recettori funzionanti. Il metodo, dunque, applica una trasformazione lineare adattata che ridistribuisce le informazioni cromatiche, preservando meglio le differenze tra tonalità. Questo approccio è spesso preferito per applicazioni interattive e didattiche, perché produce immagini più realistiche e meno “piatte” rispetto a Coblis.

4. Vischeck (Dougherty, 2000): Altro software molto diffuso per simulare il daltonismo, Vischeck si basa su un modello simile a quello di Viénot, ma ottimizzato per applicazioni web. Il sito, che consente di processare immagini, interfacce grafiche e persino pagine web, è stato utilizzato in studi di usabilità e accessibilità, diventando di fatto uno standard per valutare l'impatto delle scelte cromatiche nel design digitale.
5. Algoritmo di Machado (Machado, 2009): Questo metodo rappresenta uno degli sviluppi più avanzati ed è ancora oggi molto utilizzato. Introduce la possibilità di regolare il grado di deficit (da lieve a severo), simulando non solo le forme "pure" (protanopia, deuteranopia, tritanopia), ma anche le anomalie parziali. L'algoritmo si basa su matrici parametriche nello spazio LMS, costruite a partire da dati sperimentali sul comportamento dei fotorecettori. Oltre alla simulazione, include una modalità di compensazione, dove i colori vengono spostati in regioni più distinguibili senza alterare troppo l'estetica complessiva dell'immagine. Il modello è più complesso ma anche più fedele, ed è stato adottato in numerosi strumenti e librerie software per la grafica.
6. Algoritmo di Asada (Asada, 2010): Propone un approccio diverso, basato sulla teoria del colore opponente. Lavora nello spazio CIELAB, dove i colori sono rappresentati sugli assi rosso-verde (a^*) e blu-giallo (b^*). Le alterazioni cromatiche vengono simulate modificando selettivamente le componenti opponenti. Questo approccio è particolarmente interessante perché si avvicina a una descrizione più "perceptiva" del colore, modellando non solo i fotorecettori ma anche l'elaborazione neurale successiva. I risultati sono convincenti, ma l'algoritmo è computazionalmente dispendioso e meno diffuso rispetto a Brettel e Machado.

Metodologia di analisi e confronto tra i principali algoritmi

I principali algoritmi di daltonizzazione dianzi introdotti sono stati implementati e comparati con lo scopo di valutare le loro prestazioni. L'obiettivo è stato quello di valutare in un contesto controllato la capacità di ciascun algoritmo di riprodurre fedelmente la visione cromatica daltonica e di restituire simulazioni coerenti.

Lo strumento scelto per i test è stato il ColorChecker, una tavola standard composta da 24 patch cromatiche calibrate. Questa scelta è motivata dal fatto che rappresenta un riferimento consolidato nella valutazione del colore, dal momento che include tonalità primarie, secondarie, incarnati e sfumature naturali. Le immagini del ColorChecker sono state elaborate attraverso i diversi algoritmi analizzati (Coblis, Brettel, Viénot, Vischeck, Machado, Asada), e i risultati, pur provenienti da spazi colore differenti come RGB, LMS e CIELAB, sono stati successivamente convertiti e ricondotti nello spazio colore CIELAB, scelto perché percettivamente uniforme e quindi adatto a valutare distanze cromatiche in termini di differenze percepite.

Il confronto si è articolato su più livelli. Il primo step è consistito in un confronto diretto tra i valori CIELAB delle patch originali e quelli risultanti dopo la simulazione. A questo ha fatto seguito il calcolo delle differenze cromatiche medie tra i metodi, usando metriche come la differenza cromatica ΔE , per stabilire quali algoritmi producono trasformazioni più simili o divergenti: a partire dalle terne (L , M , S), sono state definite le rispettive coordinate nello spazio colore CIE $L^*a^*b^*$ e calcolate le distanze percettive tra ogni coppia di algoritmi; successivamente, per ogni tipologia di discromatopsia analizzata è stato possibile individuare pattern di variazione che hanno permesso di evidenziare le principali discrepanze tra le implementazioni. Come ulteriore figura di merito, è stata inoltre valutata la coerenza cromatica globale tramite il confronto tra il baricentro delle patch originali e quello delle patch trasformate: ottenuti i punti tridimensionali nello spazio colore CIE $L^*a^*b^*$, è stato infatti calcolato un baricentro che rappresentasse la media dei valori assegnati ai colori risultanti dall'applicazione dei diversi algoritmi analizzati. Così facendo, è stato possibile calcolare una nuova

distanza percettiva per valutare la variazione delle simulazioni nel completo, evidenziando in particolare quali si discostano maggiormente dall'andamento generale della daltonizzazione. In ultimo, un'analisi visiva basata sull'osservazione qualitativa dei ColorChecker daltonizzati ha permesso di verificare la fedeltà delle simulazioni anche a livello percettivo.

Risultati

Le variazioni cromatiche previste da ogni algoritmo risultano spesso molto differenti. Coblis V1 mostra forti semplificazioni, con risultati spesso troppo “piatti” e poco realistici; per questo motivo la condivisione dell'algoritmo è stata interrotta dagli autori, che suggeriscono di utilizzare il metodo Coblis-V2. Brettel e Viénot producono trasformazioni più coerenti, in linea con la teoria percettiva. Machado emerge come il più flessibile, poiché consente di simulare diversi gradi di deficit. Vischeck e Asada mostrano invece una variabilità notevole rispetto agli altri algoritmi per quanto riguarda il filtro della tritanopia.

A livello di distanze percettive, il confronto tra algoritmi evidenzia cluster di comportamenti simili: l'algoritmo di Viénot si discosta molto rispetto alle altre implementazioni di dicromia congenita, con molte variazioni rispetto ad Asada nelle simulazioni relative a protanopia e Vischeck nella deuteranopia. Le metodologie proposte da Asada e Vischeck, al contrario, mostrano comportamenti simili, evidenziati dalle minime variazioni riscontrate, indice di una maggiore congruenza nella modellazione della percezione cromatica.

Dal punto di vista delle distanze percettive e del baricentro, ciò che risulta sin dal primo impatto è la quantità di patch i cui ΔE risultano < 1 , indice di una differenza cromatica impercettibile. Unici outlier della simulazione sono l'algoritmo di Viénot, per quanto riguarda le simulazioni di protanopia e deuteranopia, e i metodi di Asada e Brettel per la tritanopia, lievemente sopra soglia. I risultati sono corroborati anche dall'osservazione visiva: Brettel e Asada restituiscono simulazioni convincenti, mantenendo differenze percettive attendibili per protanopia e deuteranopia, ma mostrano variazioni percepibili per quanto riguarda la tritanopia; al contrario, è l'algoritmo di Viénot a produrre variazioni sensibili dei colori delle patch per quanto riguarda le simulazioni di protanopia e deuteranopia.

Conclusioni

Nessun algoritmo risulta universalmente superiore: i diversi approcci, pur complessivamente coerenti tra loro, presentano vantaggi e limiti che vanno analizzati volta per volta. Gli algoritmi LMS-based garantiscono maggiore fedeltà scientifica alla fisiologia della visione, mentre gli approcci RGB-based sono più adatti a implementazioni pratiche e veloci. Questa analisi mette in evidenza l'importanza di scegliere l'algoritmo di daltonizzazione in funzione dell'applicazione specifica, che può privilegiare accuratezza percettiva o efficienza computazionale.

Referenze

Matthew Simunovic. «Color vision deficiency». In: Eye (London, England) 24 (nov. 2009), pp. 747–55. doi: 10.1038/eye.2009.251.

Humberto Moreira et al. «Colorimetry and Dichromatic Vision». In: Colorimetry and Image Processing. A cura di Carlos M. Travieso-Gonzalez. Rijeka: IntechOpen, 2017. Cap. 1. doi: 10.5772/intechopen.71563. url: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71563>.

M. Stoianov, M.S. de Oliveira, M.C.L. dos Santos Ribeiro Silva et al. «The impacts of abnormal color vision on people's life: an integrative review». In: Quality of Life Research 28 (2019), pp. 855–862. doi: 10.1007/s11136-018-2030-1. url: <https://doi.org/10.1007/s11136-018-2030-1>.

C. Oleari, “Misurare il colore”, Hoepli (2008), ISBN: 9788820341268.

Color-Blindness.com. Coblis — Color Blindness Simulator. 2006. url: <https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>.

Gustavo M. Machado, Manuel M. Oliveira e Leandro A. F. Fernandes. «A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency». In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 15.6 (nov. 2009), pp. 1291–1298. doi:10.1109/TVCG.2009.113.

Henri Brettel, Frédéric Viénot e John D. Mollon. «Computerized simulation of color appearance for dichromats». In: Journal of the Optical Society of America A 14.10 (1997), pp. 2647–2655. doi: 10.1364/JOSAA.14.002647.

Françoise Viénot, Hans Brettel e J. D. Mollon. «Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats». In: Color Research & Application 24.4(1999), pp. 243–252. doi: 10.1002/(SICI)1520-6378(199908)24:4<243::AIDCOL7>3.0.CO;2-0. url: <https://vision.psychol.cam.ac.uk/jdmollon/papers/colourmaps.pdf>.

Bob Dougherty, Alex Wade, “Vischeck - Simulating Color Blind Vision” (2000). url: <https://www.vischeck.com/vischeck/>.

Kazunori Asada. Chromatic Vision Simulator- About. Kazunori Asada. 2010. url: <https://asada.website/cvsimulator/e/about.html>.

Viénot, F., Brettel, H., Ott, L. *et al.* What do colour-blind people see?. *Nature* 376, 127–128 (1995). <https://doi.org/10.1038/376127a0>

Datacolor. Color Management– The CIE Color Space. E-book PDF, disponibile su Datacolor. Ott. 2019.

Almustanyir A. Almustanyir. «Review of the Color Vision Tests Currently in Use». In: Journal of Ophthalmology & Visual Sciences 5.1 (2020), p. id1036.