

APPROFONDIMENTI: IL COLORE DEGLI ALIMENTI E LA SUA MISURAZIONE

Marco Riva, DISTAM, Università di Milano, via Celoria 2 – 20133 Milano
marco.riva@unimi.it

Indice:

	pag.
1.1 Il colore;	2
1.2 Attributi percettivi del colore;	2
1.3 La luce;	4
1.4 La Colorimetria e l'importanza della scelta dell' illuminante;	6
1.5 Modelli di classificazione del colore;	7
1.5.1 Il sistema HSL;	9
1.5.2 Sistema di Munsell;	11
1.5.3 Lo spazio colore RGB;	11
1.5.4 Il modello CMYK;	12
1.5.5 Lo spazio colore XYZ;	12
1.5.6 Il sistema CIELab e la determinazione delle differenze di colore;	19
1.6 Strumenti per la misura del colore;	22
1.7 Il problema della riproduzione digitale del colore;	24
1.7.1 Un primo problema;	25
1.7.2 Un secondo problema;	26
1.7.3 Il monitor;	26
1.7.4 La Gamma;	27
1.7.5 Le trasformazioni per l'adattamento cromatico;	27
1.7.6 Lo standard ICC;	28
1.8 Le sostanze coloranti naturalmente presenti nei cibi;	29
1.9 L'aspetto degli alimenti e l'importanza del colore;	30
BIBLIOGRAFIA;	33

1.1 Il colore

Il colore è una percezione, una sensazione. Lo sapevano già i greci (*Platone, Timeo*) e i romani (*Lucrezio, De Rerum Natura*). Nei secoli successivi questa certezza era andata forse perduta e solo nel Seicento Isaac Newton ha definitivamente sistemato la questione: il colore (1) è una percezione soggettiva provocata da uno stimolo oggettivo, la luce, che, direttamente o indirettamente, colpisce il nostro occhio, in particolare la retina, e attraverso il nervo ottico arriva al cervello dove si crea la sensazione di colore.

Una informazione relativa al mondo fisico costituisce uno stimolo che perviene agli organi di senso. Essi producono una risposta che viene trasmessa al cervello dove si verifica la percezione dello stimolo. Gli stimoli sono quindi grandezze fisiche oggettivamente descrivibili e misurabili con precisione, mentre le percezioni sono grandezze soggettive, difficilmente descrivibili e misurabili.

Il colore può dunque essere studiato:

- dal punto di vista dello stimolo oggettivo che causa la percezione del colore (cioè la luce: siamo nel campo della fisica, in particolare nell'ottica), oppure,
- da quello della percezione oggettiva (siamo nella psicologia della percezione, come sempre quando ci si occupa del giudizio soggettivo su un certo aspetto dell'apparenza, e se ne cerca un ordinamento), o infine,
- cercando di costruire una relazione, definita con un modello matematico, tra grandezze fisiche e grandezza percettive, tenendo in considerazione la sensibilità dell'occhio "medio" (cioè costruendo un ponte tra luce e colore: è il compito della psicofisica, in particolare della fotometria e colorimetria).

1.2 Attributi percettivi del colore

E' abbastanza istintivo scomporre la percezione di colore in tre attributi che riguardano la nostra esperienza quotidiana; si tratta delle coordinate intuitive del colore:

- luminosità;
- tinta;
- saturazione.

Il primo è un attributo acromatico, gli altri due sono attributi cromatici.

La Tinta

Il principale attributo percettivo del colore è la tinta (inglese *hue*), cioè quella caratteristica del colore che si indica con i nomi rosso, giallo, verde, blu, viola, arancio e così via (quello che talvolta nel linguaggio comune si chiama semplicemente "colore"). Dicendo "rosso", o "verde" o "viola" comunichiamo ad altri l'idea di una particolare tinta. Il rosso poi, può essere chiaro o scuro, carico o debole, ma come tinta, sempre rosso è.

Una tinta non è un colore, ma una famiglia di colori. Quando si cita una tinta, per esempio "rosso", non si intende parlare di un colore rosso particolare, ma dell'intera famiglia di tutti i rossi, dai più saturi ai meno saturi e dai più luminosi ai meno luminosi. In questo senso, i colori rosso e rosa fanno parte della stessa famiglia, cioè hanno una tinta piuttosto simile.

Non tutti i colori hanno una tinta: bianco, nero e varie gradazioni di grigio sono colori senza una tinta, colori acromatici. I colori cromatici sono quelli che hanno una tinta (eventualmente mescolata con bianco, nero e grigio).

L'occhio umano distingue tra 200 e 300 tinte diverse. Di queste ce ne sono solo quattro che non vengono percepite come mescolanze di altre tinte: si tratta del rosso, del giallo, del verde e del blu che sono dette tinte unarie.

Giallo e blu sono tinte "opponenti", non è possibile pensare ad una loro mescolanza (non è possibile immaginare un giallo bluastrò o un blu giallastro). Anche rosso e verde sono tinte opposte. Le tinte non unarie (binarie) vengono percepite come mescolanza di due tinte unarie non opposte, ad esempio il turchese è percepito come mescolanza di blu e verde.

Rosso, giallo, verde e blu sono tinte "di base" anche in un altro senso. Una famosa ricerca fatta nel 1969 da Berlin e Kay (2) sui termini indicanti i colori in 98 lingue diverse ha portato alla conclusione che, per quanto riguarda il colore, non ci sono più di 11 termini di base universali in ogni lingua. Tutti i linguaggi hanno almeno due termini per indicare il bianco e il nero. Se esiste un terzo termine, è sempre il rosso. Se ne esistono quattro viene aggiunto o il verde o il giallo, e così via.

Dunque, oltre bianco e nero le quattro tinte che i linguaggi di tutto il mondo hanno sentito la necessità di nominare per prime sono appunto le tinte unarie.

Le quattro tinte unarie più il bianco e il nero (che non sono tinte, ma sono colori) sono considerati i colori primari psicologici: il bianco si oppone al nero, il rosso al verde e il giallo al blu.

La luminosità o brillantezza

La brillantezza (inglese *brightness*) è l'attributo percettivo assoluto del colore che si riferisce alla misura di quanto un'area appare luminosa, sia per luci che per oggetti isolati dal contesto (cioè tali che la luce arrivi all'occhio solo dall'oggetto e da nient'altro)..

Per oggetti (non per luci) inseriti in un contesto si può considerare il concetto di brillantezza relativa.

Il concetto di brillantezza relativa è così importante che ha un nome: chiarezza (inglese *lightness*); è la brillantezza di una superficie giudicata relativamente ad un'altra area similmente illuminata che appare bianca, e si esprime con le espressioni "chiaro" o "scuro".

La chiarezza è un concetto che si riferisce alle superfici e non alle luci, in quanto viene definita in termini di "simile illuminazione". L'occhio ha la capacità di giudicare differenze di chiarezza: vi è quindi la possibilità di costruire una scala uniforme di chiarezza, cioè un insieme ordinato di colori, in modo che la differenza percepita tra le chiarezze di due colori adiacenti sia costante. Se ci si limita ai grigi, la scala così sviluppata è detta appunto scala di grigi.

Cromaticità e saturazione

Nell'osservare un colore cromatico si percepisce una componente di tinta e una componente acromatica (cioè di bianco nel caso di luce o di grigio nel caso di oggetti). La brillantezza viene quindi percepita come generata da una parte cromatica e da una parte acromatica.

La quantità di parte cromatica rispetto a quella acromatica viene detta genericamente saturazione. Ma in realtà sono necessari tre termini diversi: pienezza, croma e saturazione per descrivere in maniera completa questo concetto. Prima che ci si rendesse conto di questo, tutte e tre questi attributi venivano spesso chiamati semplicemente "saturazione".

La pienezza (inglese *colorfulness, chromaticness*), detta anche aromaticità, descrive la quantità assoluta della parte cromatica percepita. Si riferisce sia alle luci che agli oggetti ed esprime la quantità relativa della componente cromatica rispetto a quella bianca, cioè la concentrazione della componente cromatica. Blu e celeste hanno la stessa tinta, ma il blu ha una pienezza maggiore del celeste, è più ricco, e lo stesso si può dire di viola e lilla, rosso e rosa.

Se si varia il livello di illuminazione a cui un osservatore è adattato varia non solo la brillantezza di un oggetto ma anche la pienezza.

Si considerano allora due tipi di pienezza "relative":

- Il croma (inglese *chroma*) è la pienezza di un'area in proporzione alla brillantezza di un oggetto similmente illuminato che appare bianco (o molto trasmittente, nel caso di oggetti trasparenti).
- La saturazione (inglese *saturation*) che descrive la pienezza di un'area in proporzione alla brillantezza del colore dell'oggetto stesso (prodotta dalla parte cromatica e dalla parte acromatica).

La saturazione descrive quella che nel linguaggio comune si chiama pienezza e ricchezza del colore: un colore molto saturo si dice "vivo", "pieno", "carico", mentre uno poco saturo è un colore "pallido", "pastello".

1.3 La luce

Lo stimolo fisico che causa la percezione del colore, cioè la luce, può essere descritto con precisione.

Oggi sappiamo che la luce è un particolare tipo di energia elettromagnetica e che si trasmette mediante radiazioni ondulatorie. Una radiazione elettromagnetica può essere costituita da una singola lunghezza d'onda (monocromatica), ma normalmente è composta da radiazioni di diverse lunghezze d'onda.

La facoltà di vedere gli oggetti è dovuta ad una capacità che ha l'occhio umano di rispondere allo stimolo di una porzione limitata dello spettro elettromagnetico, lo spazio in cui si raggruppano, dalle onde radio ai raggi cosmici, tutte le radiazioni che giungono a noi.

Le lunghezze d'onda (3) variano da circa 100 metri, per le onde radio, ad una minuta frazione di una unità Angstrom per i raggi cosmici ($1\text{\AA} = 10^{-7}\text{ nm}$).

La regione conosciuta come lo spettro visibile non è precisamente definita all'interno delle due regioni che le fanno da confine. Con l'avanzare dell'età infatti il nostro occhio diventa meno sensibile alla percezione di alcuni colori come il viola e questo sembra dovuto alla tendenza della cornea ad ingiallire. I limiti, che furono inizialmente fissati a lunghezze d'onda di 380 nm nella regione dell'ultravioletto fino a 760 nm dell'infrarosso, subirono variazioni sensibili nel corso degli anni in seguito a numerose ricerche spostandosi fino a 376 e 788 nm rispettivamente. Oggi per comodità si tende a limitare lo spazio visivo tra i valori di 380 e 780 nm mentre per ciascuno dei metodi utilizzati dalla Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)(4)(5)(6) per la determinazione dei colori, si vedrà di seguito che non si effettuano misurazioni a lunghezze d'onda maggiori di 673,5 nm o minori di 414,1 nm, tanto che i limiti che si trovano nei tabulati e nelle tabelle sono sempre 700 e 400 nm.

L'occhio umano percepisce le singole radiazioni monocromatiche (grandezze fisiche) come singoli colori (percezioni soggettive): per esempio, la radiazione più corta, quella di 400 nm viene percepita come violetto, quella intermedia di 550 nm come verde e quella di 700 nm come rosso.

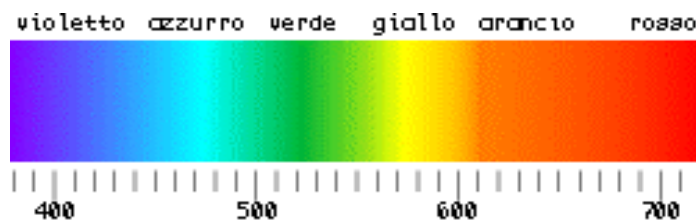


Figura 1.1 : Rappresentazione dei colori dello spettro visibili all'occhio umano su di una scala rappresentante il valore della lunghezza d'onda in nm.

Ad ogni lunghezza d'onda corrisponde una determinata sensazione di colore. Se mettiamo in sequenza tutte le radiazioni monocromatiche visibili, indicate con la loro lunghezza d'onda, e i rispettivi colori percepiti (vedi figura 1.1), possiamo costruire lo spettro dei colori. Un colore di spettro (percepito) è dunque in corrispondenza biunivoca con una radiazione monocromatica (stimolo).

Possiamo notare l'assenza del bianco tra i colori dello spettro. Non sono presenti anche altri colori: il nero, i vari grigi, il rosa, il lilla, il marrone, il porpora e tanti altri. La ragione è nel fatto che un colore spettrale costituisce la percezione di una radiazione monocromatica di determinata lunghezza, e la luce del sole, come tutte le luci esistenti in natura, è una miscela di radiazioni monocromatiche di diverse lunghezze.

Infatti, in natura, le radiazioni monocromatiche non esistono: le radiazioni visibili naturali sono sempre una mescolanza di radiazioni monocromatiche in concentrazioni diverse che arrivano contemporaneamente al nostro occhio.

Ogni radiazione monocromatica, se vista isolatamente, viene percepita come un certo colore spettrale. L'occhio tuttavia non è in grado di percepire individualmente i singoli colori spettrali di una radiazione non monocromatica, ma un altro colore, non di spettro, per così dire complessivo. Si tratta dei colori non spettrali. Per esempio, come si è visto, la luce solare contiene tutte le lunghezze d'onda visibili (e anche componenti infrarosse e ultraviolette) ma l'occhio non ne distingue individualmente i colori e ne determina una sensazione complessiva di bianco.

Il funzionamento di altri organi del nostro corpo è differente. L'orecchio per esempio è in grado di distinguere due note diverse suonate contemporaneamente sul pianoforte. Il loro suono in contemporanea non ci dà la sensazione risultante di qualche nota intermedia. L'orecchio è analitico, mentre l'occhio è sintetico. Se l'occhio fosse analitico come l'orecchio, vedrebbe i singoli colori di una sorgente luminosa corrispondenti alle diverse lunghezze d'onda che compongono la luce emessa. La luce invece provoca una sensazione globale nell'occhio.

La curva spettrale

La curva spettrale indica la quantità di ogni colore presente in una determinata luce, ed in questo senso è la specifica più obiettiva della cromaticità di una luce, specifica che dipende solo dalle caratteristiche della luce stessa e non dalla sensazione soggettiva di qualche osservatore. Se si mescolano le luci di due sorgenti, la curva spettrale risultante è la somma delle due curve spettrali. Ogni colore può quindi essere definito come una mescolanza di colori puri.

Curva di visibilità

La sensibilità dell'apparato visivo alle radiazioni non è la stessa per tutte le loro lunghezze d'onda. L'occhio umano risponde alle sollecitazioni provocate dalle radiazioni le cui lunghezze sono comprese in un intervallo ristretto e che decresce man mano che ci si porta ai bordi di questo intervallo.

Fisicamente la potenza emessa per ogni singola lunghezza d'onda deve essere "pesata" secondo lo stimolo che fornisce all'apparato visivo, in modo da tenere conto della sensibilità dell'occhio umano.

A tale scopo è stata studiata la risposta dell'organo alle radiazioni di varie lunghezze d'onda sia in condizioni di luce diurna (visione fotopica) sia in condizioni di minore intensità luminosa (visione mesopica e scotopica).

La CIE (4) ha codificato un occhio che ha una sensibilità media, risultato di una elaborazione statistica condotta su un gran numero di campioni. La maggiore sensibilità dell'occhio è alla lunghezza d'onda di 555 nm (verde-giallo).

Il colore degli oggetti

Quando la luce raggiunge un oggetto, viene assorbita, riflessa o trasmessa, La quantità di luce che viene riflessa o trasmessa dipende dalla lunghezza d'onda ed è descritta dalla funzione spettrale di riflettanza o trasmittanza. Si tratta della funzione che, per ogni lunghezza d'onda descrive la frazione di intensità luminosa che viene riflessa o trasmessa.

1.4 La Colorimetria e l'importanza della scelta dell'illuminante

La Colorimetria (7) è una branca di studio che si occupa della misurazione del colore e trova applicazione in molti campi della ricerca scientifica, nei settori del controllo di prodotti e di processi industriali, ovunque sia richiesta la riproduzione del colore. Il suo compito è di associare alla radiazione riflessa dai corpi che non emettono autonomamente radiazione elettromagnetica una serie di variabili quantitative che ne definiscano il colore. Per fare ciò, la colorimetria si limita a considerare l'attività del sistema visivo dell'uomo in quelle situazioni in cui il colore, detto colore psicofisico, è isolato dalle altre proprietà dell'oggetto colorato osservato, per esempio la levigatezza, la tessitura, etc.

Il colore psicofisico di una scena è riconducibile allo spettro di potenza della luce proveniente dalla scena e che colpisce la retina dell'occhio umano. Quasi tutto l'interno della sfera oculare è infatti interessata da cellule fotosensibili conosciute complessivamente sotto il nome di retina, che è quindi l'organo di senso della vista.

La luce giunge all'occhio attraverso la cornea e l'iride, e, prima di raggiungere la retina, attraversa le lenti oculari. Si riceve una piccola immagine invertita attraverso la retina: lenti e cornea la mettono poi a fuoco. Le cellule fotosensibili responsabili dell'assorbimento della luce sono dette coni e bastoncelli (3) e svolgono la loro funzione grazie ai pigmenti visivi, con i quali riescono ad assorbire la luce a determinate lunghezze d'onda.

I bastoncelli sono sensibili a livelli di illuminazione molto bassi. Contengono infatti un pigmento con la massima sensibilità a circa 510 nm (zona del verde dello spettro). Questo pigmento permette quindi una visione monocromatica con la mancanza totale di colore. I coni sono invece responsabili della visione del colore. Sono formati da tre distinte classi, ciascuna delle quali contiene un differente pigmento fotosensibile che presentano massimi di assorbimento intorno a 430, 530, e 560 nm, permettendo di distinguere la luce alle differenti lunghezze d'onda ed ottenendo così anche la visione cromatica.

La luce assorbita è quindi convertita in segnali, i quali, dopo aver subito varie trasformazioni, giungono al cervello che li traduce in sensazione di colore.

Alla luce di quanto detto precedentemente, la fonte di illuminazione che colpisce la superficie dell'oggetto di cui vogliamo misurare il colore appare una variabile assolutamente non trascurabile.

Diversi illuminanti producono una visione cromatica differente dell'oggetto. Esistono varie categorie di illuminanti, classificati in base alla distribuzione energetica relativa corrispondente alla radiazione emessa da un corpo nero ad una determinata temperatura misurata in gradi Kelvin (vedi tabella 1.1). L'industria della stampa utilizza altri tipi di illuminanti, solitamente il D50, mentre quella fotografica il D55. Questi due illuminanti rappresentano il compromesso tra la vista in interno e la vista alla luce del giorno. La CIE (4)(6) ha descritto l'illuminante A come rappresentante della luce al tungsteno (la luce prodotta da lampade ad incandescenza), mentre l'illuminante C come rappresentante della luce naturale. Vista l'insufficiente energia alle basse lunghezze d'onda, quest'ultimo venne poi sostituito dalla classe di illuminanti D.

L'illuminante D65 rappresenta ciò che si avvicina di più alla distribuzione spettrale di energia della luce nelle zone del Nord Europa ed è corrispondente alla radiazione del corpo nero a 6500° K. Questo illuminante è generalmente adottato come standard per tutte le operazioni che implicano l'uso di strumenti per la determinazione del colore.

Tabella 1.1 : Principali caratteristiche di alcuni illuminanti

Illuminante	Definizione	Calore
F	Lampada a filamento (incandescenza). Normale lampada domestica in uso in Europa.	2300 - 2800 K
A	Illuminante A (incandescenza). Simula l'illuminazione rilevata in uffici e negozi, nonché quella di una comune abitazione, secondo il sistema statunitense.	2856 K
TL84	Luce bianca da magazzino (fluorescenza). E' utilizzata dai dettaglianti europei, in contrapposizione con l'Ultralume 30 in uso negli Stati Uniti.	4000 K
D50	Luce calda tendente al giallo, standard americano per i lavori grafici Industria della stampa	5000 K
D55	Luce del sole più luce del cielo Industria fotografica	5500 K
D65	Luce diurna artificiale 65 (fluorescenza). E' la base per la valutazione cromatica, sia a livello di colorimetria strumentale che visiva, è proposta negli standard europei ed internazionali di misura del colore	6500 K
D75	Luce diurna artificiale 75 (fluorescenza). Base per la valutazione cromatica secondo gli standard statunitensi.	7500 K
UV	Luce ultravioletta	

1.5 Modelli di classificazione del colore

Lo studio volto alla misurazione e rappresentazione del colore ha portato allo sviluppo di numerosi modelli per la classificazione e la qualificazione di ciascun colore in base ad alcuni attributi come la tinta, la saturazione, la cromaticità, la lucentezza o la brillantezza. La maggior parte dei modelli utilizzati si rifà ad un principio di additività (8) del colore, ma sono utilizzati in alcuni settori tra cui la stampa anche sistemi che si rifanno a modelli di sintesi sottrattivi (8)(9).

Il principio di miscelazione additiva di colori è facilmente dimostrabile grazie alla sovrapposizione di luci primarie su di uno schermo bianco.

Quando si effettua questa operazione utilizzando i colori primari rosso, verde e blu, nelle aree interessate dalla sovrapposizione di due dei primari si ricompone uno dei colori tra giallo, indaco e violetto (vedi figura 1.2).

Se invece si osserva l'area dove i tre colori si sovrappongono, si avrà la possibilità di osservare un'area di colore bianco.

In realtà la proprietà additiva non è prerogativa di uno speciale set di colori primari. La gamma di colori che può essere miscelata con un set di primari viene denominata come gamma di questi colori primari. Non è possibile però scegliere tre colori primari che includano nella loro gamma tutti i colori. Scegliendo però come tali il rosso, il verde, ed il blu, si riesce ad ottenere una gamma di colori sufficientemente ampia.

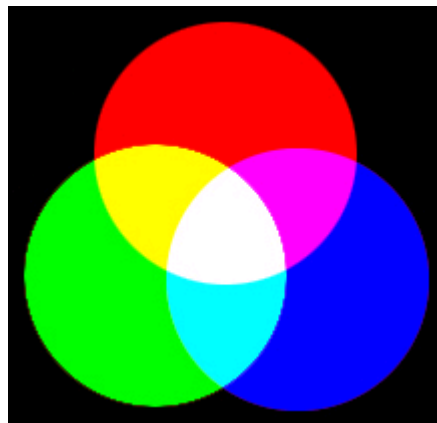


Figura 1.2 : Rappresentazione della proprietà additiva del colore attraverso un esperimento di sovrapposizione di luci colorate.

Per la sintesi sottrattiva invece vengono scelti altri tre colori di base dai quali originare gli altri. I tre colori utilizzati sono il ciano, il giallo e il magenta. Tali colori non sono stati scelti casualmente. Ciascuno di essi ha la proprietà di bloccare, cioè di sottrarre alla vista, uno dei colori primari della sintesi additiva e di riflettere gli altri due. Ciano, giallo e magenta sono perciò considerati i colori primari della sintesi o mescolanza sottrattiva, cioè di quella mescolanza di pigmenti che genera la visione di colori in dipendenza del modo in cui essi riflettono la luce bianca. Come abbiamo avuto modo di constatare poco sopra, la mescolanza di due primari qualsiasi della sintesi sottrattiva genera uno dei primari della sintesi additiva. Gli effetti della combinazione parziale o totale dei colori primari della sintesi sottrattiva sono illustrati in figura 1.3.

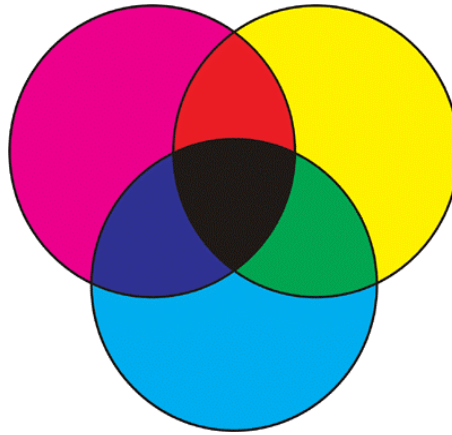


Figura 1.3 : Esempio di sintesi o mescolanza sottrattiva.

È da notare che, mentre nella sintesi additiva il colore ottenuto dalla combinazione dei tre primari è il bianco, nella sintesi sottrattiva il colore risultante è il nero. Ciò si spiega facilmente: se ognuno dei primari della sintesi sottrattiva ha il potere di assorbire un terzo differente della radiazione visibile, mescolandoli tutti e tre l'intero spettro visibile verrà assorbito e nessuna luce sarà riflessa verso l'osservatore.

1.5.1 Il sistema HSL

Tra i modelli di rappresentazione dei colori sviluppati sulla base del complesso percettivo tonalità-luminosità-saturazione, sono da citare il sistema di notazione creato da Alfred H. Munsell (3)(10), e i modelli di rappresentazione digitale noti coi nomi HLS e HSB (5)(11) (dalle iniziali delle parole inglesi *hue, lightness e saturation, hue, saturation e brightness* rispettivamente). I modelli rappresentano due variazioni di uno sistema utilizzato oggi come standard per la rappresentazione digitale del colore.

Entrambi i modelli individuano il colore in tre coordinate chiamate i tre assi ed in particolare nel modello HSL sono così rappresentati:

L'asse corrispondente alla tonalità va da 0° a 360°, comincia e finisce con il colore rosso e comprende verde, blu e tutti i colori intermedi (vedi figura 1.4).

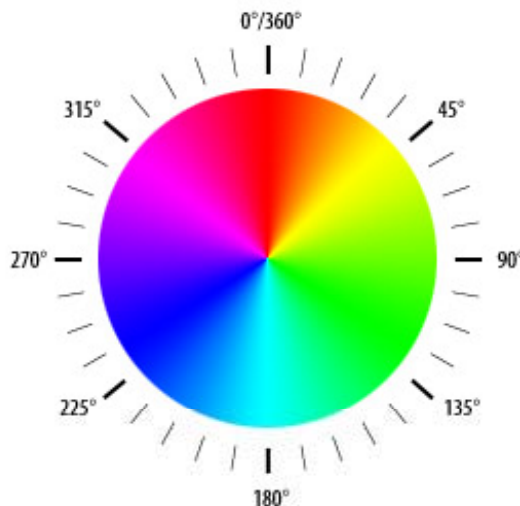


Figura 1.4: Ruota dei colori della tonalità in scala graduata (0-360°) nel sistema HSL.

Il secondo asse (vedi figura 1.5) individua la saturazione e viene rappresentato in scala percentuale da 0 (colore privo di saturazione) a 100 (colore con il più alto grado di saturazione a un certo grado di tonalità e una certa percentuale di illuminazione).



Figura 1.5: Variazione di colore al crescere della saturazione in scala percentuale (0-100%).

Il terzo asse (vedi figura 1.6), rappresentativo della luminosità, è anch'esso espresso in scala percentuale e va da 0 (nero) a 100 (bianco).



Figura 1.6 : Variazione di colore in toni di grigio al decrescere della luminosità in scala percentuale (100-0%).

1.5.2 Sistema di Munsell

Il sistema di Munsell (3)(10) venne proposto dalla American A.H. Munsell nel 1905 e poi riveduto nel 1943; viene tuttora utilizzato soprattutto come ausilio nella scelta dei colori per la pittura.

Munsell ordinò le tonalità (*Hues*) della luce spettrale più le porpore lungo un cerchio, suddividendole arbitrariamente in 100 intervalli equidistanti e designando le principali con le iniziali dei nomi dei colori nella lingua inglese: rosso (R), giallo (Y), verde (G), blu (B) e porpora (P), con una seconda dimensione tra ciascun colore a 10 gradazioni (vedi figura). Il valore (*Value*) di questa gradazione, una misurazione del livello di luminosità o oscurità di un colore, viene definito in 11 incrementi da bianco a nero e la saturazione (*Chroma*) è suddivisa in 15 gradazioni progressive designate con multipli di 2. I colori meno saturi sono i grigi nella scala da nero a bianco, con valore di croma 2; i colori più saturi, che possono raggiungere valore di croma 18 o 20, si trovano lungo l'equatore del solido pseudo-sferico utilizzato per rappresentare spazialmente il sistema, solido il cui asse verticale rappresenta la dimensione della luminosità. In questo modo ogni colore appartenente al modello viene univocamente identificato per mezzo di una sigla e di tre parametri numerici: ad esempio 5R 6/4 identifica un rosso (R = *red*) di luminosità 6 e saturazione 4.



Figura 1.7 : Rappresentazione dei colori e della simbologia della ruota di Munsell.

1.5.3 Lo spazio colore RGB

Lo studio della visione umana del colore ha messo in evidenza che la specificazione colorimetrica si può ottenere associando ad ogni colore una terna di numeri. La specificazione del colore è pertanto rappresentabile in uno spazio tridimensionale i cui assi di riferimento possono essere definiti da tre colori fondamentali. Ciò è tipico del riferimento noto come RGB (5)(12). Le terne di numeri che specificano il colore sono dette coordinate colorimetriche in analogia con le coordinate dei punti nello spazio geometrico.

Il modello di colore RGB miscela in diverse proporzioni ed intensità i tre colori primari rosso, verde, blu, per ricreare il ciano, il magenta, il giallo ed il bianco. Le coordinate cromatiche RGB possono essere pensate come un cubo con 3 assi fra loro perpendicolari, che rappresentano appunto i tre colori primari. Come appare in figura 1.8, quando tutti i 3 colori valgono 0, il colore dell'oggetto è nero; quando tutti i 3 colori sono al valore massimo, il colore dell'oggetto è bianco. Livelli uguali di R, G e B generano il grigio.

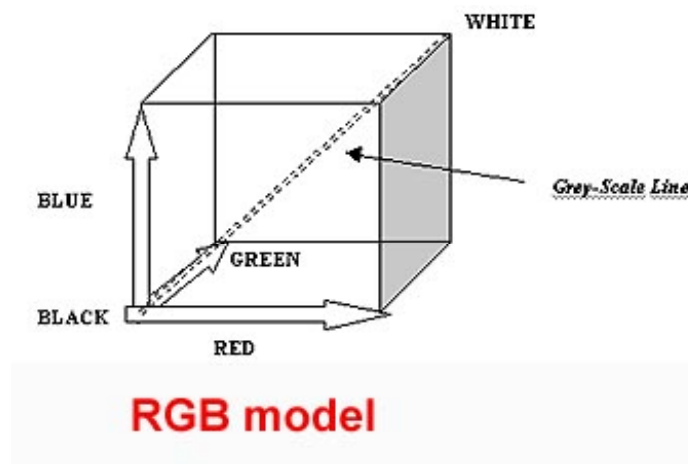


Figura 1.8 : Rappresentazione dei colori nel sistema RGB

Il modello RGB viene utilizzato con i dispositivi a emissione diretta come i tubi catodici degli apparecchi televisivi e i monitor dei computer ed è alla base dei sistemi di riproduzione digitale del colore. Miscelando il 100% dei tre colori si produce il bianco e con lo 0% si produce il nero.

La rappresentazione RGB è ampiamente usata, ma è un modello a variabile dipendente e i valori dipendono quindi dalle caratteristiche del dispositivo di rappresentazione del colore. Esso non è adatto per la riproduzione dei colori quando si devono usare, insieme, vari dispositivi come scanner, monitor e stampanti, a meno di una loro precisa intercalibrazione (vedi paragrafo 1.7) .

1.5.4 Il modello CMYK

Il modello CMYK (5)(13) è un modello sottrattivo in grado di riprodurre una gamma di colori inferiore al modello RGB. I colori nei dispositivi a emissione diretta, come televisioni e monitor di computer, vengono riprodotti miscelando i tre colori RGB primari. Tuttavia, la riproduzione dei colori nella stampa o nella fabbricazione di vernici funziona per assorbimento di alcune lunghezze d'onda e per riflessione di altre: si preferisce allora il sistema CMYK.

I tre colori primari RGB, quando sono miscelati, producono il bianco, mentre i tre colori primari CMY producono il nero. Poiché gli attuali inchiostri non produrranno colori puri, è stato incluso il nero (K) come colore separato, e il modello è stato chiamato CMYK.

1.5.5 Lo spazio colore XYZ

Quali leggi regolano la percezione del colore? Il primo a dare una risposta a questa domanda è stato Isaac Newton (1642-1727) che nel 1666 ha tracciato un famoso diagramma, ottenuto dall'unione degli estremi dello spettro, ottenendo un cerchio. I colori spettrali, in questo modello, stanno sulla circonferenza, mentre i colori non spettrali stanno all'interno. Nel centro c'è il bianco. È implicita una terza dimensione che esce perpendicolarmente al piano: la luminosità.

Dopo che Newton pubblicò il diagramma cromatico, numerosi scienziati iniziarono a studiarlo a fondo e a modificarlo per renderlo più aderente alla realtà.

Il diagramma cromatico CIE XYZ o tristimolo 1931(5) è il diagramma di Newton modificato, attualizzato e standardizzato, basato sulla capacità di riconoscimento e misura del colore da parte dell'occhio umano.

Il sistema CIE descrive gli stimoli colorimetrici sulla base dei valori tristimolo di tre colori primari immaginari. La base di questo sistema è l'Osservatore Standard della CIE (4)(14).

Lo spazio del tristimolo si basa sulla visione umana, quindi sull'attivazione dei coni, che a sua volta dipende dalla radiazione elettromagnetica che entra nell'occhio: per comprendere lo spazio tristimolo occorre quindi introdurre le proprietà fondamentali delle radiazioni elettromagnetiche che riguardano la colorimetria.

La radiazione elettromagnetica è costituita da un campo elettrico ed un campo magnetico tra loro ortogonali ed insieme ortogonali alla direzione di propagazione. Il comportamento della propagazione è ondulatorio, caratterizzato dalla lunghezza d'onda λ , dalla velocità di propagazione $c=299793 \text{ km/s}$ (nel vuoto) e quindi frequenza $\nu = c/\lambda$. La radiazione visibile ha una lunghezza d'onda compresa nell'intervallo 360-830 nm. Nell'atto in cui la radiazione viene prodotta o assorbita (da un atomo, da una molecola, da un cristallo, ecc.), è necessaria una descrizione corpuscolare e al posto delle onde si considerano "quanti di luce", detti fotoni, aventi energia $E=h\nu$ proporzionale alla frequenza. Per gli scopi colorimetrici la radiazione luminosa che entra nell'occhio è definita dalla distribuzione spettrale della potenza raggiante proveniente da una superficie unitaria (m^2) nell'unità di angolo solido (steradiante sr) lungo una direzione (esprimibile in $\text{watt} \cdot \text{m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$). Tale grandezza indicata con $L_e(\lambda)$ è detta distribuzione spettrale della Radianza. Fissata $L_e(\lambda)$, ogni elemento della superficie retinica è colpito da una definita radiazione elettromagnetica.

I quanti di luce, una volta raggiunta la retina, hanno una probabilità di essere assorbiti che dipende dalla sensibilità spettrale dei fotorecettori. Siano $s(\lambda)$, $m(\lambda)$ e $l(\lambda)$ le sensibilità spettrali rispettivamente dei coni con maggiore sensibilità alle corte lunghezze d'onda (coni S), alle medie (coni M) ed alle lunghe (coni L). Un fotone, una volta assorbito dal pigmento di un cono, innesca un processo fotochimico che non dipende dalla sua energia. Ciò comporta che la sensazione di colore dipende solo dal numero di fotoni N_S , N_M e N_L assorbiti dai tre diversi tipi di fotorecettori nell'unità di tempo. Si suole considerare una terna di numeri proporzionali ai numeri di fotoni assorbiti (S,M,L) e $(n_S N_S, n_M N_M, n_L N_L)$, detti valori di tristimolo, dove n_S , n_M e n_L sono costanti di proporzionalità. Per una radiazione luminosa avente radianza spettrale $L_e(\lambda)$ tale terna vale

$$\begin{aligned} S &\equiv k_S \int_{\nu_S} s(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \equiv \int_{\nu_S} \mathbf{S}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \\ M &\equiv k_M \int_{\nu_S} m(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \equiv \int_{\nu_S} \mathbf{M}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \\ L &\equiv k_L \int_{\nu_S} l(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \equiv \int_{\nu_S} \mathbf{L}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

Dove:

1. le costanti k_S , k_M e k_L definiscono le unità di misura della terna (S,M,L) ed in generale sono scelte in modo che $S=M=L$ per la radiazione luminosa avente $L_e(\lambda)=1$ (lo stimolo di colore associato a tale terna viene chiamato stimolo equienergetico o "Equal Energy Stimulus"),

2. le funzioni: $\mathbf{S}(\lambda) \equiv k_S s(\lambda)$, $\mathbf{M}(\lambda) \equiv k_M m(\lambda)$ e $\mathbf{L}(\lambda) \equiv k_L l(\lambda)$ sono dette Funzioni Colorimetriche e furono introdotte e misurate per la prima volta da Maxwell nel 1860 (in pratica vengono molto frequentemente indicate col nome inglese "Color Matching Functions" (CMF)),
3. gli integrali sono estesi allo spettro visibile (vs), cioè per lunghezze d'onda λ appartenenti all'intervallo 360-830 nm.

Le relazioni (1) mostrano che alla somma di più radiazioni corrisponde la somma delle rispettive terne. Ciò porta a considerare le terne (S,M,L) come vettori \mathbf{Q} appartenenti ad uno spazio lineare tridimensionale. Essi sono detti rispettivamente Vettori Tristimolo e Spazio del Tristimolo. Questo sistema di riferimento definito nello spazio del tristimolo è noto come fondamentale.

Dalle definizioni (1) si ottiene il vettore relativo ai contributi monocromatici dell'Equal Energy Stimulus

$$\mathbf{E}(\lambda) \equiv (\mathbf{S}(\lambda), \mathbf{M}(\lambda), \mathbf{L}(\lambda)),$$

le cui componenti sono proprio le CMF.

Ancora dalle definizioni (1) risulta che possono esistere radiazioni luminose caratterizzate da differenti distribuzioni spettrali della radianza $L_e(\lambda)$, alle quali corrisponde una unica terna (S,M,L). Quindi la corrispondenza tra sensazioni di colore e radiazioni luminose provenienti dagli oggetti è solo univoca, vale a dire che ad una sensazione di colore corrispondono infinite radiazioni luminose differenti per spettro, purchè tale sensazione di colore non sia dovuta ad una radiazione monocromatica. Il fenomeno è noto come metamerismo ed è grazie a questo che la riproduzione dei colori degli oggetti non autoluminosi (stampa, televisione, fotografia, ...) è possibile con tecniche semplici.

La sensazione di luminosità è generalmente funzione della Luminanza L_v (espressa in candele/m²), che consiste nella densità di flusso luminoso nell'unità di superficie e nell'unità di angolo solido lungo una direzione. Si osserva che la definizione di luminanza si ottiene da quello di radianza sostituendo le parole "flusso di potenza raggiante" con "flusso luminoso", infatti la luminanza L_v si ottiene moltiplicando la distribuzione spettrale della radianza $L_e(\lambda)$ per la sensibilità spettrale del sistema visivo dell'uomo $k_M V(\lambda)$ (la funzione $V(\lambda)$ è la Sensibilità Spettrale Relativa e la costante $k_M=680$ lumen/watt serve a definire l'unità di misura della luminanza) ed integrando sullo spettro visibile:

$$L_v = k_M \int_{vs} V(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

La legge di Abney afferma che la luminanza può essere ottenuta anche dal vettore tristimolo $\mathbf{Q}=(S,M,L)$ corrispondente alla radianza spettrale $L_e(\lambda)$ mediante combinazione lineare delle componenti del vettore tristimolo:

$$L_v(\mathbf{Q}) \equiv (L_S S + L_M M + L_L L)$$

Tale relazione può essere riscritta nel formalismo vettoriale mediante la introduzione di un vettore L_v (L_S, L_M, L_L), le cui componenti sono i coefficienti della combinazione lineare:

$$L_v(\mathbf{Q}) = k_M (\mathbf{L} \cdot \mathbf{Q}) = k_M \int_{vs} \mathbf{L} \cdot \mathbf{E}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Dal confronto delle equazioni (2) e (3) risulta che la Sensibilità Spettrale Relativa può essere scritta mediante relazione vettoriale

$$V(\lambda) \equiv \mathbf{L} \cdot \mathbf{E}(\lambda)$$

La somma tra radiazioni comporta l'operazione di somma tra i corrispondenti vettori tristimolo e l'operazione di somma tra le corrispondenti luminanze. Tali proprietà di linearità sono tipiche della attivazione dei fotorecettori e sono sufficienti per gli scopi prefissati nella presente trattazione.

Il riferimento CIE '31, ottenibile mediante trasformazione lineare dal riferimento fondamentale (S,M,L), è definito da una terna ortogonale (X, Y, Z) dove l'asse Y risulta ortogonale ai piani a luminanza costante e gli assi X e Z sono scelti in modo che:

1. i piani $X=0$ e $Z=0$ siano tangenti alla superficie descritta dai vettori relativi a radiazioni monocromatiche;
2. il vettore L risulta parallelo all'asse Y ;
3. le componenti dell' "equal energy stimulus" siano uguali tra loro.

Nel riferimento CIE 1931 le componenti del vettore tristimolo si ottengono in modo analogo al riferimento fondamentale

$$\begin{aligned} X &\equiv \int_{vs} X(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \\ Y &\equiv \int_{vs} Y(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \\ Z &\equiv \int_{vs} Z(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

e le CMF sono indicate con $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$ e $Z(\lambda)$ e vale $Y(\lambda) \equiv V(\lambda)$.

Nella pratica la funzione $L_e(\lambda)$ non è nota e le corrispondenti misure $L_e(\lambda_i)$ sono il risultato di una operazione di convoluzione fatta sulla funzione $L_e(\lambda)$ a lunghezze d'onda definite, secondo un certo passo in λ e mediante una funzione di banda passante tipica dello spettroradiometro impiegato e del suo modo d'uso. Ciò comporta che gli integrali (4) sono sostituiti da altrettante sommatorie:

$$\begin{aligned} X &\equiv \sum_i X(\lambda_i) L_e(\lambda_i) \Delta \lambda_i \\ Y &\equiv \sum_i Y(\lambda_i) L_e(\lambda_i) \Delta \lambda_i \\ Z &\equiv \sum_i Z(\lambda_i) L_e(\lambda_i) \Delta \lambda_i \end{aligned} \quad (5)$$

L'operazione di calcolo dei valori di tristimolo (X, Y, Z) è solo apparentemente semplice e può ritenersi corretta per $L_e(\lambda_i)$ definita con passo di 1 nm e con banda passante di 1 nm, mentre per passo e banda passanti maggiori il calcolo richiede un processo di deconvoluzione complesso, la cui trattazione esula dai nostri scopi.

Ogni stimolo di colore $Q=(X, Y, Z)$ contiene due informazioni, delle quali una è la luminanza, rappresentata dalla componente Y , e l'altra è la cromaticità, definita dalla direzione del vettore tristimolo. I punti intersezione tra i vettori (o il loro prolungamento sulle rette su cui giacciono) ed un prefissato piano (si è soliti considerare il piano dato dall'equazione $X+Y+Z=1$) sono in corrispondenza biunivoca con le direzioni dei vettori e quindi con le cromaticità.

La figura che si ottiene su tale piano mediante le intersezioni di questo con i vettori tristimolo prende il nome di Diagramma di Aromaticità (vedi figura 1.11).

Su questo diagramma la cromaticità di un vettore $Q=(X, Y, Z)$ risulta definita dal punto $q=(x, y)$, le cui componenti sono definite da:

$$x = X/(X+Y+Z), \quad y = Y/(X+Y+Z) \quad (6)$$

e la terza componente, pleonastica, è automaticamente data da $z = Z/(X+Y+Z)$.

Il bordo della figura, noto col nome di spectrum locus, rappresenta le cromaticità delle radiazioni monocromatiche e, nel tratto rettilineo, delle radiazioni di tinta porpora (miscele di radiazioni di corte e lunghe lunghezze d'onda).

Lo spazio X, Y, Z CIE 1931 definisce dunque il colore a partire dalla percezione dell'Osservatore Standard. Esso venne in pratica definito sulla base di esperimenti nei quali alcuni osservatori furono chiamati a comporre luci di lunghezza d'onda monocromatica miscelando tre colori primari. L'esperimento dimostrava come molti dei colori primari potevano essere miscelati da un osservatore occasionale per ottenere una luce di qualsiasi lunghezza d'onda.

Il grafico in figura 1.9 mostra le funzioni di riproduzione del colore con le coordinate CIE XYZ. I colori scelti per mettere a punto il metodo CIE furono accuratamente selezionati, in modo tale che le coordinate XYZ risultassero sempre positive per qualsiasi stimolo di colore reale, mentre il valore Y doveva risultare direttamente proporzionale alla luminosità della miscela additiva.

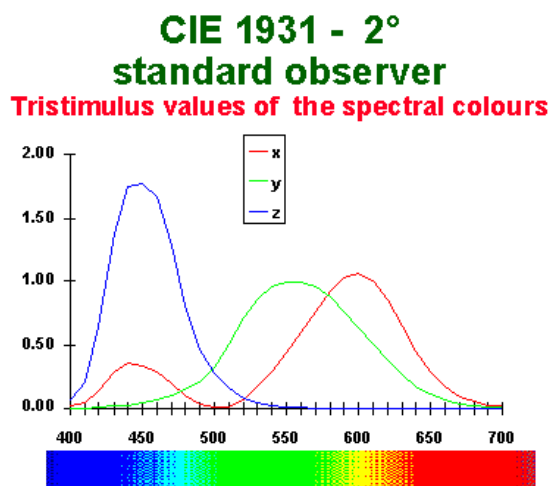


Figura 1.9 : Rappresentazione grafica a due dimensioni delle curve corrispondenti ai valori tristimolo (in ordinata) al variare della lunghezza d'onda riportata in nm (in ascissa).

La definizione dell'Osservatore Standard presenta comunque diverse difficoltà, che richiedono qualche precisazione.

L'abilità umana nell'interpretare e descrivere un colore mostra differenze al cambiare delle modalità di osservazione. L'osservazione a piccolo angolo è diversa da quella a grande angolo. Inoltre, l'osservazione in presenza di un contesto introduce altri fattori tra i quali l'adattamento al contorno di ogni punto osservato, lo sfondo, il tipo di illuminazione ecc. Tutte variabili che modificano la sensazione del colore.

Le diverse modalità di osservazione permettono di distinguere la specificazione del colore in psicofisica, in senso stretto, e in psicometria. La specificazione psicofisica del colore si ottiene quando il colore è osservato isolatamente attraverso un diaframma che impedisca il condizionamento degli altri punti della scena, mentre quella psicometrica tiene conto anche dei fattori del contesto quale l'adattamento all'illuminante.

La CIE ha associato alla specificazione psicofisica del colore due osservatori:

- 1) l'Osservatore standard CIE 1931 per la visione foveale, cioè limitata a quella porzione della retina destinata alla visione ad acuità massima (visione a piccolo angolo; 2°);
- 2) l'Osservatore standard supplementare CIE 1964 (14) per la visione extrafoveale, ossia per la visione di grandi superfici (visione a grande angolo; 10°).

La scelta tra gli Osservatori CIE 1931 e CIE 1964 (vedi figura 1.10) è tipica di ogni settore applicativo: televisione, tessile, inchiostri, vernici,

standard observers

- **CIE 1931 2°**
- **Viewing angle of 2 degrees.**
- **CIE 1964 10°**
- **Viewing angle of 10 degrees.**



Figura 1.10 : Rappresentazione degli angoli di riflessione utilizzati nei due diversi sistemi CIE.

Contemporaneamente alla creazione dell'osservatore standard del 1931, la CIE, come già detto, definì una rappresentazione di tutti i colori visibili all'uomo su di un diagramma bidimensionale denominato diagramma CIE 1931 (13) (vedi figura 1.11).

Su di esso sono rappresentati solamente i colori visibili dall'occhio umano, a prescindere però dalla luminosità.

In altre parole, un determinato colore all'interno del diagramma può avere una qualunque luminosità, dal nero al bianco.

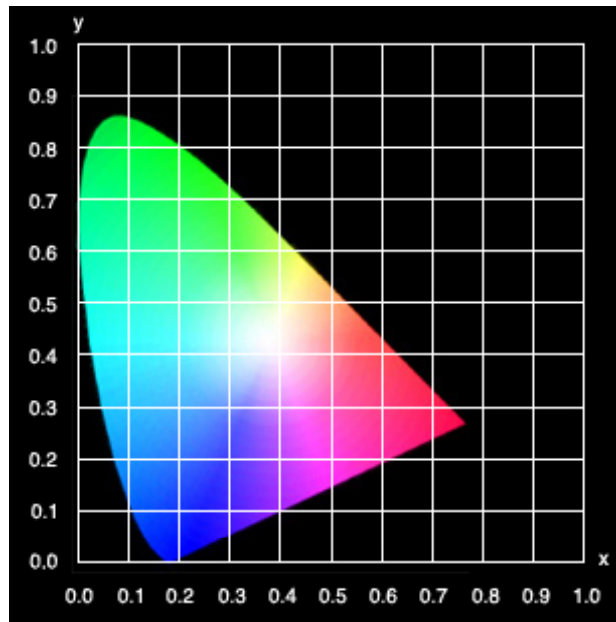


Figura 1.11 : Rappresentazione cromatica a due dimensioni di tutti i colori visibili all'occhio umano in un sistema di coordinate cartesiane xy.

Il diagramma CIE 1931 è a due dimensioni, ma aggiungendo la luminosità può essere rappresentato tridimensionalmente. Il diagramma appare così suddiviso: al centro c'è il bianco (o il grigio-nero) e lungo la parte curva del perimetro ci sono i colori saturi dello spettro luminoso (in senso antiorario, rosso, giallo, verde, blu, viola). I colori centrali sono insaturi (il bianco è il più insaturo di tutti) e i colori periferici sono saturi. Il diagramma rappresenta quindi le tinte (lungo il perimetro) e le saturazioni (dal perimetro verso il centro).

Ogni colore del diagramma può inoltre avere una diversa luminosità (per esempio un certo verde esiste anche in una versione più scura) e quindi al diagramma va aggiunta una terza dimensione, appunto quella della luminosità. A luminosità zero, tutto il diagramma è nero, a luminosità ridotta il centro non sarà bianco ma grigio, e anche tutti gli altri colori saranno più scuri, a luminosità altissima tutto il diagramma sarà bianco.

Nel diagramma cromatico CIE 1931 ogni punto rappresenta un colore ed ogni colore è rappresentato da un punto all'interno dell'area a ferro di cavallo. L'intera area è compresa in un sistema di coordinate cartesiane (rettangolari e ortogonali) x , y , definite dal rapporto relativo del valore tristimolo X o Y rispetto alla somma dei valori tristimolo $(X+Y+Z)$.

Entrambe le coordinate x e y assumono, ovviamente, valori compresi fra 0 a 1. Non a tutte le coppie di coordinate in questo intervallo corrisponde un colore, ma ad ogni colore corrisponde una coppia di coordinate x,y .

Per esempio c'è un determinato rosso definito dalle coordinate $x=0.6$ e $y=0.3$. Il colore di coordinate $(x=0.4, y=0.2)$ è un lilla mentre il colore $(x=0.1, Y=0.6)$ è un verde.

Prendendo colori equidistanziati sul perimetro è evidente che si possono generare, anche se non tutti, gran parte degli altri colori in linea con il principio additivo sul quale si basa questo modello di rappresentazione del colore. Mescolando infatti additivamente due colori, rappresentati sul diagramma da due punti si ottengono, variando le proporzioni dei due colori iniziali, tutti i colori che stanno sul segmento che unisce i due punti, ovvero le mescolanze additive di due colori stanno sempre su un segmento retto.

In particolare, fissati due colori di determinate luminosità, nelle loro mescolanze additive le luminosità si sommano e il colore risultante viene collocato nel baricentro delle luminosità. Se le luminosità sono uguali, il colore è in centro. Così, se si mescola un verde con luminosità 1 e un rosso con luminosità 1 si otterrà un giallo con luminosità 2. Questo giallo sarà a metà strada tra verde e rosso.

Da questo deriva che eseguendo le stesse operazioni su tre colori, rappresentati sul diagramma da tre punti (come in figura 1.12), si ottengono tutti i colori che stanno all'interno del triangolo di cui i tre punti sono i vertici.

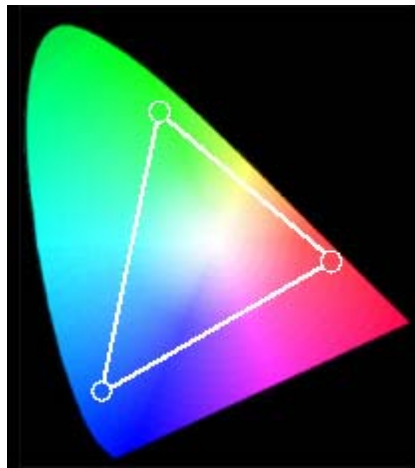


Figura 1.12 : Rappresentazione di una area formata dal congiungimento di tre punti individuati sul diagramma CIE 1931.

Il diagramma di cromaticità CIE 1931, è solo una "fetta" di uno spazio più completo, lo spazio dei colori CIE 1931 (12)(3) al quale si assegnano le coordinate XYZ. Questo spazio ha la forma indicata nell'immagine in figura 1.13, nella quale si individua il diagramma di cromaticità (in una forma un po' diversa da quella qui considerata).

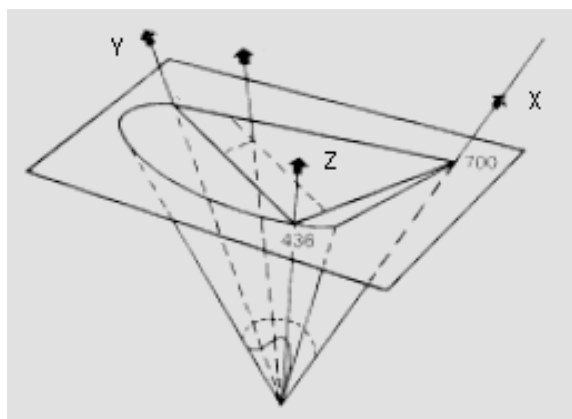


Figura 1.13 : Rappresentazione grafica tridimensionale dello spazio CIE 1931.

La coordinata Y dello spazio XYZ, per come questo spazio è costruito, esprime la luminosità del colore considerato.

Per aggiungere la terza dimensione al diagramma xy, si considera la coordinata Y, costruendo dunque lo spazio xyY.

I due sistemi x,y,Y e X,Y,Z sono due diversi sistemi di coordinate per il diagramma cromatico CIE 1931 collegati matematicamente tra di loro, e se si conoscono le coordinate di un colore date con il sistema x,y,Y si conoscono anche le sue coordinate date con il sistema X,Y,Z e viceversa.

I sistemi di coordinate x, y, Y e X, Y, Z permettono quindi di esprimere gli stessi colori nello stesso diagramma cromatico CIE 1931 con due sistemi di coordinate diversi ma collegati. Si sceglie uno dei due sistemi secondo l'uso e la comodità di trattamento dei dati.

1.5.6 Il sistema CIELab e la determinazione delle differenze di colore

Dopo il 1931, la CIE ha apportato modifiche alle definizioni iniziali, per tenere conto, nei limiti del possibile, anche dei fattori implicati nella visione psicometrica. Nel 1976 sono così stati definiti i sistemi CIELuv (5)(7) e CIELab (5), i quali tengono conto dell'adattamento all'illuminante e consentono la quantificazione delle differenze di colore, seppure approssimativamente.

Gli illuminanti sono stati descritti in termini di energia relativa tabulata a ciascuna lunghezza d'onda.

Questi due sistemi sono stati definiti sia per l'osservatore CIE 1931 che per l'osservatore CIE 1964 e la loro scelta, ancora una volta, è tipica per ogni settore d'impiego.

La ragione di questa evoluzione attiene innanzitutto alla necessità di individuare un sistema in grado di tenere conto della necessità di esprimere correttamente le differenze di colore.

Infatti, se si prendono due punti (e cioè due colori) ad una certa distanza d nel diagramma CIE 1931 si può giudicare visivamente quanto i due colori siano "diversi" o "distanti". Se si prendono altri due punti (e quindi altri due colori) alla stessa distanza, i due colori non è detto che siano diversi quanto i primi.

Questo è un problema significativo del diagramma CIE 1931 (con coordinate x, y): ad uguali distanze metriche non corrispondono uguali distanze percettive. Quindi su questo diagramma è difficile collocare dei colori in modo che siano ugualmente differenziati percettivamente.

In termini tecnici, si dice che non c'è uniformità tra le differenze percepite di colore e le distanze misurate di colore. La non uniformità della scala cromatica è stata misurata da D.MacAdam (5) nel 1942 ed è graficamente rappresentata sul diagramma di cromaticità da ellissi (vedi figura 1.14).

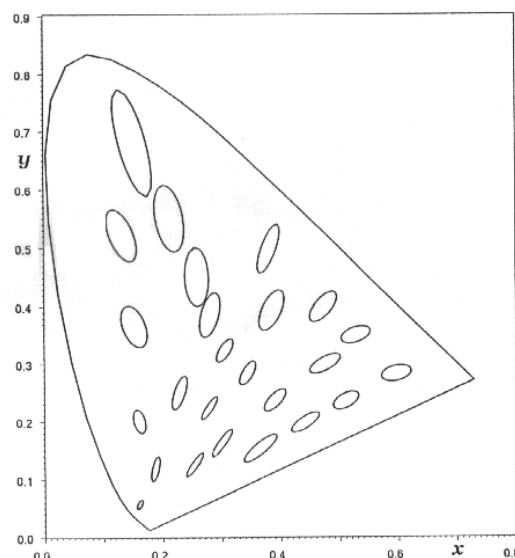


Figura 1.14: Ellissi di MacAdam sul diagramma CIE 1931 ingrandite 10 volte.

Queste ellissi nascono nelle operazioni di "color matching", cioè nel rappresentare una sensazione di colore con un vettore nello spazio del tristimolo. Infatti ripetendo tale operazione si genera un insieme di vettori, la cui differenza rispetto al vettore medio è una quantità non percettibile. La cromaticità di tali vettori è rappresentata da punti sul diagramma di cromaticità, il cui baricentro è il centro dell'ellisse e l'ellisse racchiude una zona entro la quale si trova il 68% dei punti, cioè rappresenta una deviazione standard nella operazione di "color matching". L'esperienza ha poi mostrato che una deviazione standard equivale ad 1/3 della variazione appena percettibile.

La non uniformità delle scale cromatiche sul diagramma CIE 31 è evidente, basta osservare che il rapporto tra il minore dei semiassi minori delle varie ellissi e il maggiore dei semiassi maggiori vale 1/30. Appare evidente che si dovrebbe "stirare" in qualche modo il diagramma, come se fosse su un foglio di gomma, in modo che le varie ellissi diventino tutti cerchi con lo stesso diametro.

Per risolvere il problema, il diagramma cromatico CIE 1931 è stato modificato e il risultato è lo spazio Lab. Anche questo spazio è stato messo a punto sotto il coordinamento della CIE nel 1976 e viene chiamato "spazio cromatico CIE Lab 1976" o in breve "spazio $L^*a^*b^*$ ": le tre coordinate che descrivono lo spazio si indicano appunto con le lettere L^* (luminosità), a^* (prima coordinata cromatica) e b^* (seconda coordinata cromatica).

Anche nello spazio Lab un colore viene definito specificando tre coordinate: la luminosità L che va da 0 a 100, la coordinata a (che esprime il rosso quando è positiva e il verde quando è negativa) e la coordinata b (che esprime il giallo quando è positiva e il blu quando è negativa).

La trasformazione dello spazio CIE del 1931 nello spazio Lab del 1976 si effettua con una relazione matematica abbastanza semplice, ma non lineare, e ciò significa che lo spazio non viene semplicemente allungato o ruotato, ma cambia intrinsecamente.

Infatti lo spazio Lab non è limitato come il diagramma CIE, ma si estende, per ogni luminosità, su tutto il piano. La terza dimensione è ancora la luminosità. Tra le coordinate XYZ e Lab esiste una relazione matematica, proprio come tra le coordinate XYZ e xyY . Quindi è possibile dare le coordinate di colore in uno qualunque dei tre sistemi e risalire alle coordinate in un altro sistema.

Fissato un bianco di riferimento (X_n, Y_n, Z_n) le tre coordinate (L^*, a^*, b^*) di un colore (X, Y, Z) nello spazio CIE 1931, si calcolano così:

Si effettuano i seguenti rapporti:

- $p = X / X_n$
se $p \leq 0.008856$, $p_1 = p/3$, altrimenti $p_1 = 7.787 p + 16/116$
- $q = Y / Y_n$
se $q \leq 0.008856$, $q_1 = q/3$ e $L^* = 116q_1 - 16$, altrimenti $q_1 = 7.787q + 16/116$ e $L^* = 903.3q_1$
- $r = Z / Z_n$
se $r \leq 0.008856$, $r_1 = r/3$, altrimenti $r_1 = 7.787r + 16/116$

Si calcolano le altre due coordinate a e b :

- $a^* = 500 (p_1 - q_1)$
- $b^* = 500 (q_1 - r_1)$

La definizione è valida sia per l'osservatore 2° (CIE 1931) che per l'osservatore 10° (CIE 1964).

È importante ricordare che lo spazio CIE XYZ 1931 e lo spazio CIE Lab 1976 non sono due spazi diversi, ma l'uno è una deformazione dell'altro. In realtà sono un unico spazio, lo spazio dei colori che l'occhio umano percepisce (vedi figura 1.15).

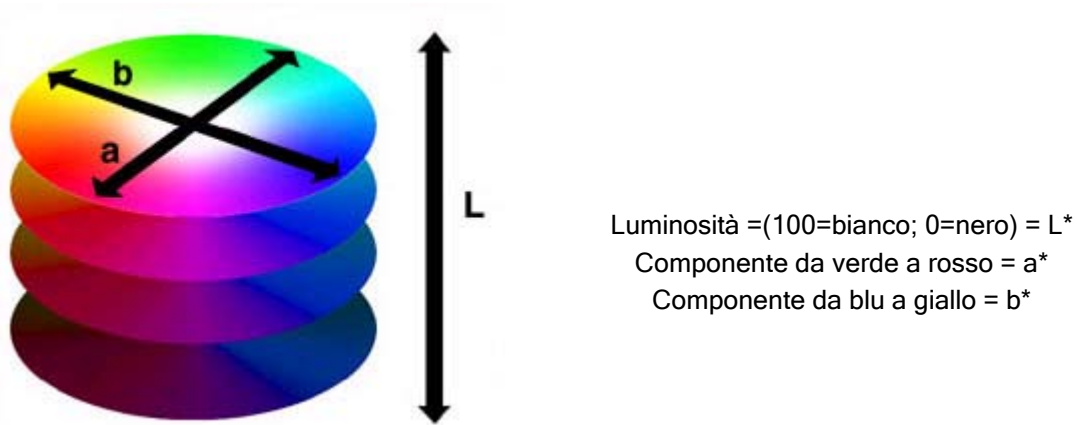


Figura 1.15 : Rappresentazione dei limiti e degli intervalli cromatici delle coordinate del sistema Lab.

La coordinata L^* (luminosità, perpendicolare al piano della figura) va, per convenzione, da 0 (luminosità nulla) a 100 (luminosità massima, è un particolare bianco scelto come riferimento). Le coordinate a^* e b^* possono variare ognuna da meno a più infinito, ma per $L^* = 0$ e $L^* = 100$, a^* e b^* possono assumere solo il valore 0.

Nello spazio Lab, la tinta è sovente rappresentata dal semplice rapporto a/b ; mentre la saturazione è ottenuta dalla relazione:

$$s = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

Anche se è stato concepito come spazio uniforme, Lab non è completamente uniforme. Per esempio nella zona dei gialli la distanza di minima variazione è più alta, e nei blu è più bassa.

Lo spazio Lab è ampiamente utilizzato nella misura del colore (colorimetri) e nella riproduzione del colore (fotografia), anche in forma digitale (la maggior parte dei programmi di fotoritocco include, accanto alla rappresentazione RGB, anche la definizione Lab).

Esso, fra l'altro, consente di definire la differenza (visiva) tra due colori. Come si è detto il diagramma Lab è tridimensionale, quindi la distanza fra le coordinate cromatiche può essere calcolata con il teorema di Pitagora:

$$\Delta = \sqrt{(\text{differenza tra i valori } L)^2 + (\text{differenza tra i valori } a)^2 + (\text{differenza tra i valori } b)^2}$$

Questa differenza visiva di colore che, grazie al diagramma CIELab, è possibile esprimere anche numericamente (cosa impossibile in un diagramma non uniforme come il diagramma CIE 1931) viene indicata con ΔE .

In pratica, i valori ΔE costituiscono un modo per comunicare la differenza tra due colori. Per esempio, in un contratto di stampa, si può stabilire che la differenza tra il colore richiesto e quello stampato sia inferiore a $5 \Delta E$.

Questo elenco di vari valori di ΔE può servire come guida per interpretare il significato psicometrico delle differenze di colore:

- $< 0,2$: la differenza non è percepibile;
- tra $0,2$ e $0,5$: la differenza è molto piccola;

- tra 0,5 e 1,5: la differenza è piccola;
- da 2 a 3: esiste una variazione di colore distinguibile;
- da 3 a 6: la differenza è abbastanza distinguibile;
- tra 6 e 12 : significa una forte differenza di colore, tipica di sistemi di scarsa qualità;
- >12: significa colori diversi

In confronto al modello XYZ, i colori CIE Lab sono più compatibili con i colori percepiti dall'occhio umano. Con il modello CIE Lab, la luminanza di colore (L), tonalità e saturazione (a, b) possono essere rivisti singolarmente; come risultato, il colore complessivo dell'immagine può essere modificato senza cambiare l'immagine o la sua luminanza. Il modello Lab ha inoltre una gamma di colori più vasta dei modelli comunemente utilizzati nel settore (RGB e CMYK) e rispetto a questi è a variabile indipendente dallo strumento utilizzato per l'acquisizione del dato. Questo significa che utilizzando questo spazio colore i valori di lettura di un prodotto non cambieranno in funzione delle caratteristiche del sistema operativo del nostro calcolatore (lo spazio RGB di Windows risulta per esempio essere più scuro di quello adottato da Mac OS (15)) o del monitor del computer da noi utilizzato. I dati rilevati saranno confrontabili a priori.

1.6 Strumenti per la misura del colore

Alla luce di quanto detto finora appare doveroso presentare una descrizione degli strumenti oggi in uso impiegati nelle operazioni pratiche di misura del colore.

La normale procedura di misura del colore fa uso di strumenti dedicati, come colorimetri a riflessione, strumenti derivati dagli spettrofotometri di assorbimento nel visibile per misure in riflessione (16)(17)(18) (vedi figura 1.16).



Figura 1.16 : Immagine di un colorimetro a riflessione

La strumentazione è costituita da una sorgente di luce, un compartimento di misura, un monocromatore, un rivelatore, montati su banchi ottici appropriati, e da un sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Buona parte degli spettrofotometri d'assorbimento commerciali dispongono di accessori per la misura del colore. Anche per essi, come per gli strumenti specifici per la misura del colore, dovendo misurare una proprietà psicofisica, devono essere soddisfatte alcune condizioni indispensabili. L'intensità, il tipo e la geometria della sorgente luminosa dovranno essere scelte accuratamente con riguardo alle notazioni proposte da enti specializzati (es. CIE(4)). Deve essere studiata con cura la collocazione del campione alla finestra d'illuminazione in base al tipo di strumento utilizzato e alla posizione della finestra stessa.

Negli apparecchi da banco con finestra orizzontale sulla superficie superiore i materiali sono appoggiati sopra il foro, i solidi rigidi tal quali, le polveri e le paste in contenitori col fondo trasparente, mentre in quelli con la finestra posta su un lato verticale i campioni sono premuti contro il foro da morsetti a molla. Negli apparecchi portatili il foro di misura e' appoggiato direttamente sulla superficie del campione, se rigido, o protetto da un coperchio trasparente ,se in polvere o pastoso.

Il vantaggio principale degli strumenti portatili è la possibilità di misurare sul posto il colore di superfici non trasportabili. La testata ottica può inoltre essere incorporata o esterna e collegata all'unita' di misura da un cavo a fibre ottiche.

Quando si effettua una misura, la luce riflessa o trasmessa dal campione viene trasportata al sensore costituito da un analizzatore spettrale e dal rivelatore (vedi figura 1.17).

L'analisi spettrale puo' essere effettuata con filtri tristimolo, che selezionano le bande dei colori primari, rosso (x1e x2), verde (y) e azzurro (z) dell'osservatore standard, equivalenti ai tre colori che stimolano i fotoricettori specifici dell'occhio: si ricavano poi direttamente i valori tristimolo o funzioni tricromatiche X, Y, Z trasformabili nelle coordinate di cromaticita' CIE 1931 e nelle scale di colore derivate.

In altri casi la luce può essere risolta nel suo spettro con monocromatori a filtri o a reticolo con differenti tipi di montaggi. Si produce una scansione sequenziale dello spettro della luce proveniente dal campione, i cui valori percentuali di riflessione o trasmissione vengono poi trasformati per calcolo in X, Y, Z.

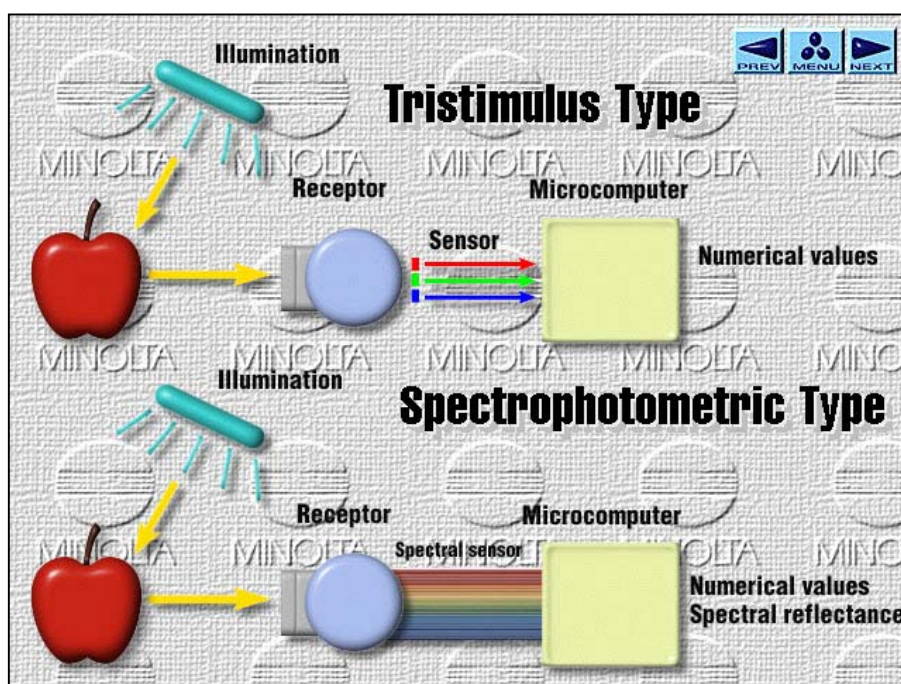


Figura 1.17 : Immagine rappresentativa delle fasi di misura del colore di un oggetto con filtri tristimolo o spettrofotometrici.

Nella strumentazione moderna i filtri tristimolo sono applicati su alcuni colorimetri portatili con tre o quattro fotodiodi rivelatori. Non sono quasi mai usati su quelli da banco perchè hanno bassa risoluzione e sono soggetti a degradazione nel tempo.

Per quanto concerne invece il sistema di acquisizione e di elaborazione dei dati, la moderna elettronica a microprocessori ha consentito, oltre al controllo strumentale e all'acquisizione dati, la loro presentazione ed elaborazione in tempo reale, anche in strumenti portatili di dimensioni ridotte.

Gli strumenti da banco sono in generale interfacciati con un microcomputer, con la conseguente versatilità di utilizzazione di spazi di memoria, di software e periferiche; quelli portatili incorporano nello strumento l'intero sistema di gestione comprendente il microprocessore con software, memoria propria, tastiera ridotta e schermo di presentazione dei dati, di solito a LCD.

Anche gli strumenti portatili hanno la possibilità di presentare i risultati sotto forma grafica o numerica, espressi nelle più note scale di colore e delle differenze relative, oltre alle valutazioni di "accettazione" nel controllo di qualità e sono in massima parte dotati d'uscita seriale per il collegamento ad una stampante, o al computer per il controllo e l'espansione delle funzioni ed ulteriori trattamenti dei dati con software supplementari, come quelli di ricettazione del colore.

Tutti questi strumenti generalmente operano mediante il principio della misura "puntuale", ovvero limitata ad una regione molto circoscritta del materiale in esame. Questo approccio è sovente limitante nel caso dei prodotti alimentari, ove le caratteristiche cromatiche presentano una certa disomogeneità locale (si pensi alla variegatura del colore superficiale di un frutto).

Tecniche di digitalizzazione dell'immagine mediante telecamera, fotocamera o altri dispositivi di acquisizione elettronica consentono una quantificazione delle caratteristiche cromatiche in termini di colore "medio" di una superficie anche estesa e di indici di omogeneità e realizzano la misura in modo rapido, semplice e ormai poco dispendioso.

Ci si avvarrà presumibilmente di un programma di fotoritocco di uso comune per selezionare le aree sulle quali poi applicare le opzioni di misura del colore. Le applicazioni dei programmi di fotoritocco consentono di effettuare le misure nelle coordinate di rappresentazione del colore desiderate (tra le più note RGB, Lab e CMYK) e sulla superficie selezionata mediante la strumentazione di lavoro in dotazione. E' possibile scegliere tra i profili standard per la rappresentazione del colore sul monitor e le regolazioni di gamma, punto bianco e primari vengono automaticamente impostate di conseguenza.

La misura effettiva del colore con tali sistemi offre una misura sufficientemente accurata agli scopi ricercati.

Purtroppo, in queste tecniche e come discusso nel successivo paragrafo, la geometria di illuminazione, le caratteristiche della luce illuminante e la sensibilità dei sensori di acquisizione / digitalizzazione / riproduzione non corrispondono agli standard CIE, cosicché è difficilmente proponibile una misura equivalente delle caratteristiche cromatiche.

Comunque, la notazione di colore RGB (utilizzata dalle attrezzature digitali) è parzialmente convertibile in notazione x, y, Y oppure CIELab ed anche le altre caratteristiche relative a sensibilità ed illuminante sono parzialmente calibrabili, addivenendo a misure confrontabili con i requisiti CIE.

1.7 Il problema della riproduzione digitale del colore

Con l'avvento degli strumenti informatici, il problema della misura e rappresentazione del colore ha assunto un forte rilievo applicativo legato alle potenzialità delle tecniche di image analysis.

Le immagini di un oggetto possono essere acquisite con differenti devices. Nel caso dello studio di proprietà macroscopiche si utilizzano scanner, fotocamere, videocamere; mentre per lo studio di caratteristiche microscopiche l'immagine può derivare da microfotografia o da interfacce collegate ad attrezzature LM, SEM, TEM (19). Per la loro riproduzione, sono invece coinvolti altri dispositivi, quali i monitor e le stampanti. Tutti i dispositivi di acquisizione e riproduzione sono originariamente basati sulla rappresentazione RGB del colore.

L'immagine è acquisita in forma digitalizzata ed in differenti formati di interscambio.

L'elemento caratteristico è la risoluzione di acquisizione o visualizzazione (densità, espressa in pixel per inch.) ed il tipo (B/N, scala di 16 o 256 grigi o colori, milioni di colori), che identifica la quantità di informazioni associata ad ogni pixel (es.: 8 bit per pixel = 256 colori).

L'unità base (pixel) è identificato in una immagine dalla sua posizione relativa (x,y) e dalle sue caratteristiche di colore/intensità (R,G,B o Gray Level) (vedi figura 1.18).

Se consideriamo per esempio una immagine digitale RGB di 100 x 200 pixel sarà composta in tutto da $100 \times 200 = 20.000$ pixel e ogni pixel avrà tre componenti (una per ogni primario RGB). In memoria questa immagine è dunque una serie di $20.000 \times 3 = 60.000$ numeri interi, ognuno dei quali può andare da 0 a 255.

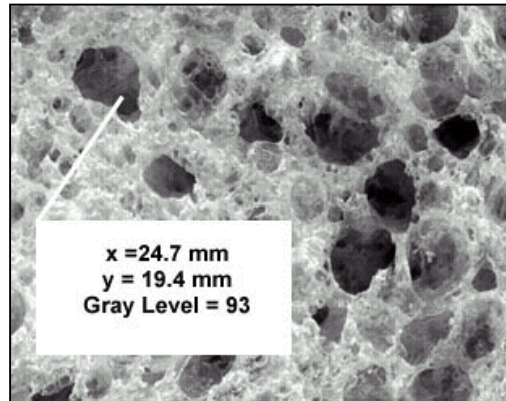


Figura 1.18 : Alveolatura di una fetta di pane (Immagine in scala di grigi, acquisizione mediante scanner piano, risoluzione 600 pixel x inch).

1.7.1 Un primo problema

Un primo problema nel caso di immagini digitali è rappresentato dal sistema di riproduzione del colore in dotazione. Non si deve pensare che un colore identificato per esempio da una terna di numeri (R= 153, G=255, B=204), venga rappresentato su di un monitor sempre nello stesso modo. I monitor sono uno diverso dall'altro (diversi fosfori, diversa gamma e diversi bianchi) e le stesse coordinate, su monitor diversi, producono colori diversi. Questo è dovuto al fatto che ciascun monitor è in grado di riprodurre una serie di colori (*gamut* del monitor) e che questi sono diversi da quelli di ogni altro monitor.

In figura 1.19 sono rappresentati i gamut di due diversi monitor (due triangoli bianchi) ed è evidente che essi non coprono la stessa area. Le medesime coordinate identificherebbero quindi colori in realtà differenti.

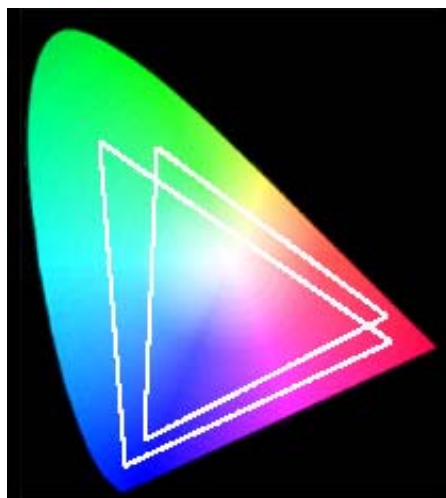


Figura 1.19 : Rappresentazione dei gamut di due monitor nell'area dei colori visibili all'occhio umano.

1.7.2 Un secondo problema

Il secondo problema è rappresentato dalle caratteristiche intrinseche dei vari strumenti, in particolare dagli illuminanti, che si utilizzano in fase di acquisizione. Gli scanner hanno una sorgente luminosa fluorescente con temperatura da 4200 a 4800 K. Le fotocamere digitali hanno una sorgente luminosa che dipende dall'ambiente. Il monitor può avere un punto bianco tra D50 e D93. Una stampa viene normalmente esaminata con una luce D50 o D65. Inoltre diversi strumenti per la visualizzazione di immagini lette con lo scanner o catturati con la fotocamera digitale hanno diverse sorgenti luminose. Per riprodurre l'aspetto di una immagine a colori, tutti questi sistemi devono applicare una trasformazione al colore di input (catturato con un certo illuminante) per convertirlo nel colore di output (visto sotto un altro illuminante).

La gestione del colore digitale si può riassumere così:

- l'immagine è identificata da una serie di dati numerici;
- i numeri devono avere un riferimento;
- il riferimento dà il significato (cioè il colore) ai numeri;
- quando l'immagine viene trasferita da una periferica ad un'altra il riferimento cambia;
- affinché non cambi il colore è necessario reimpostare i dati numerici.

L'operazione indicata da quest'ultimo punto è la cosiddetta conversione di colore (in realtà si tratta di una conversione di numeri) che può essere invocata dall'applicazione di elaborazione dell'immagine e viene effettivamente eseguita da un motore di colore (o profilo di colore), cioè un software specializzato che può operare a livello di sistema operativo che di applicazione.

1.7.3 Il monitor

Lo strumento principale di visualizzazione delle immagini digitali è il monitor. Il monitor CRT (20) si basa sulla mescolanza additiva (che avviene sulla retina di chi osserva lo schermo del monitor) di tre colori primari, che sono sempre il primo nella zona del rosso (R), il secondo del verde (G) e il terzo del blu (B). Questi tre colori, le cui precise cromaticità variano da monitor a monitor, costituiscono la base di un sistema di riferimento chiamato RGB in cui ogni colore è rappresentato da un terna di numeri (R,G,B) normalizzati in modo che il rosso sia rappresentato con (1,0,0), il verde (0,1,0) e il blu (0,0,1).

I tre colori primari sono ottenuti utilizzando tre fosfori, cioè tre sostanze chimiche (da non confondere con l'elemento chimico fosforo) depositate sulla parte interna dello schermo: un fosforo rosso, uno verde e uno blu (base tricromatica) per ogni pixel.

I tre fosfori RGB, bombardati da tre fasci elettronici (prodotti tra tre cannoni elettronici), diventano tre sorgenti di luce (fosforo deriva dal greco e significa apportatore di luce) i cui spettri di emissione sono centrati rispettivamente sul rosso, verde e blu.

La riproduzione di un colore si ottiene mescolando (additivamente) in varie proporzioni la luce emessa dai tre fosfori, controllando la loro intensità luminosa, mediante l'intensità dei fasci elettronici a loro volta controllate da tre distinte tensioni.

Queste tensioni sono digitalizzate. Per esempio in un monitor a 8 bit per primario (come la stragrande maggioranza di quelli oggi prodotti) le tre tensioni di controllo possono assumere ognuna valori tra 0 e 255, per un totale di $256 \times 256 \times 256 = 16.777.216$ valori, cioè oltre 16 milioni di colori riproducibili.

La terna (0,0,0) corrisponde al nero, quella (255,255,255) al bianco. Le altre terne con uguali valori corrispondono a vari livelli di grigio. La terna (255,0,0) corrisponde al rosso; la terna (100, 0 ,0) è lo stesso rosso con minore luminosità, e così via. Nei calcoli colorimetrici normalizzeremo questi valori tra 0 e 1.

1.7.4 La Gamma

L'intensità della luce emessa (luminanza) da ciascuno fosforo dipende dalla tensione di controllo in modo non lineare, ma secondo questa legge di potenza:

$$L/L_{\max} = (V/V_{\max})^{\gamma}$$

dove γ è un numero positivo che dipende dal monitor (normalmente attorno a 2.5), L_{\max} è la massima luminanza del fosforo, cioè quella ottenuta quando si applica la massima tensione di controllo V_{\max} . Anche se γ in teoria non dipende dal fosforo, i difetti costruttivi dei rispettivi cannoni elettronici, fanno sì che tale dipendenza esista.

Questa dipendenza non lineare della luminanza dalla tensione viene compensata modificando le tensioni RGB (correzione gamma) prima che pilotino i cannoni elettronici. La correzione si ottiene mediante una tabella di conversione (lookup table) memorizzata nella scheda video del computer che consente di utilizzare $(V/V_{\max})^{1/\gamma}$ al posto di V/V_{\max} per il controllo dei cannoni elettronici (21).

1.7.5 Le trasformazioni per l'adattamento cromatico

Come si è già detto, per riprodurre l'aspetto di una immagine a colori, tutti i sistemi coinvolti devono applicare una trasformazione al colore di input (catturato con un certo illuminante) per convertirlo nel colore di output (visto sotto un altro illuminante).

E' questo lo scopo delle trasformazioni per l'adattamento cromatico. Queste trasformazioni agiscono tutte nello spazio della risposta dei coni. Se si desidera lavorare nello spazio XYZ occorre:

- trasformare le coordinate XYZ nei valori di tristimolo della risposta dei coni;
- modificare queste risposte;
- ritrasformare questi valori in XYZ.

Applicando una trasformazione ai valori X' Y' Z' di un colore sotto un dato illuminante si può calcolare una nuova terna di coordinate X" Y" Z" relativa ad un diverso illuminante. Un colore che ha queste coordinate visto sotto il nuovo illuminante apparirà uguale al colore precedente sotto l'illuminante precedente.

Tutte le trasformazioni naturalmente trasformano il bianco di origine (per esempio D65) nel bianco di destinazione (per esempio D50).

Le trasformazioni più usate sono:

- trasformazione di von Kries (Johannes von Kries, 1878) converte da XYZ alle funzioni di risposta dei coni e produce sempre gli stessi valori Lab per un dato insieme di valori RGB, indipendentemente dal punto bianco utilizzato nelle definizioni di Lab.
- trasformazione di Bradford (Lam and Rigg, Ph.D. thesis, University of Bradford, 1985) dipende dal punto bianco, che va indicato.
- scalamento XYZ lineare (detta anche wrong von Kries perché è un metodo approssimato che non agisce nello spazio di risposta dei coni)

1.7.6 Lo standard ICC

Ai fini di risolvere il problema della fedeltà di riproduzione del colore nei diversi dispositivi digitali, un passo importante è stata la definizione di un "profilo" standard, attraverso l'azione dell'International Color Consortium, abbreviato ICC (22), un organismo fondato nel 1993 da Adobe, Agfa, Apple, Kodak,

Microsoft, Silicon Graphics e Sun, alle quali nel frattempo si sono unite circa altre 60 società produttrici di software e di hardware.

La versione più recente delle specifiche ICC è del dicembre 2001, ed i profili conformi a questa specifica hanno il numero di versione 4.0.

I profili sono basati su tabelle (implementate in files che vengono utilizzati nella configurazione delle periferiche) che convertono da coordinate di periferica a coordinate assolute e viceversa.

Lo standard ICC è basato sul paradigma "profilo intelligente motore stupido". Ciò significa che le tabelle inverse (da assoluto a periferica) devono essere tante quanti gli intenti di "rendering" che il profilo supporta.

Lo standard ICC prevede inoltre che lo stesso profilo possa essere utilizzato sia quando è l'origine che quando è la destinazione della conversione di colore. Questo significa che il profilo deve contenere sia la tabella che va da coordinate di periferica a coordinate assolute (usata quando il profilo è l'origine della conversione), sia le tabelle che vanno da coordinate assolute a coordinate di periferica (usate quando il profilo è la destinazione della conversione).

Come spazio assoluto di un profilo (che ICC chiama Profile Connection Space, PCS), deve essere utilizzato uno di questi due spazi

- CIE 1931 con coordinate XYZ
- CIE 1976 con coordinate Lab e bianco D50

Nessun altro PCS è supportato da ICC (negli esempi precedenti, per esempio, abbiamo usato xyY, che non è supportato da ICC). Ogni profilo deve essere basato su uno di questi PCS e ogni motore di colore deve supportarli entrambi.

Lo standard ICC prevede che il profilo, oltre che a tabella, possa essere ad algoritmo (per tutte le periferiche esclusa la stampante). Se il profilo è ad algoritmo (o, come si dice, a matrice), questo implementa una conversione da coordinate di periferica a coordinate XYZ (le uniche consentite in questo caso) e viceversa, con un unico intento di "rendering".

Lo standard ICC prevede sette classi di profili. Le prime tre classi riguardano i profili di maggior utilizzo, cioè i profili di periferiche (tra parentesi la cosiddetta segnatura):

- input (scnr), profili di scanner e fotocamere digitali;
- display (mnr), profili di monitor, sia CRT che LCD;
- output (prtr), profili di macchine da stampa, stampanti e film recorders.

Altre quattro classi raggruppano profili speciali utilizzati per scopi particolari:

- device link (link), profili che collegano direttamente due periferiche;
- color space conversion (spac), profili per conversione tra spazi colore;
- abstract (abst), profili di spazi astratti;
- named color (nmcl), profili di colori spot, per esempio Pantone.

Un profilo può esistere come file indipendente; può anche (esclusi i profili di classe abst e link) essere incorporato in un file salvato in un formato compatibile (TIFF, EPS, JPEG, GIF, PICT, Scitex CT, PNG) e può essere inserito nel flusso di stampa (non PostScript) creato da una applicazione e diretto verso il driver di stampa.

In pratica, i profili ICC possono essere creati (con opportuni ausili) oppure (ed è il caso più frequente) possono essere distribuiti insieme al dispositivo digitale ed implementati all'atto della sua configurazione, ottenendosi così la sicurezza di una opportuna interconversione delle coordinate cromatiche.

1.8 Le sostanze coloranti naturalmente presenti nei cibi

Responsabili della colorazione dei cibi sono un gruppo di composti chimici (3)(6) conosciuti e studiati da decenni. Parziali modifiche alla struttura molecolare o interazione con agenti chimici o fisici genera variazioni sensibili e spesso anche connotabili ad occhio nudo nel corso di processi di lavorazione e stoccaggio dei prodotti. Come queste variazioni di colore vengano rilevate e, se siano desiderate o meno nel processo produttivo, sono due argomenti che destano molto interesse anche in relazione ai metodi di analisi di nuova concezione.

Le sostanze che determinano la colorazione di un prodotto possono essere di origine naturale o artificiale. Fare distinzione tra queste due classi è talvolta semplice se si considerano due prodotti come lo spinacio e le ciliegie allo sciroppo, dove, nel primo le clorofille naturalmente presenti conferiscono le caratteristiche cromatiche al prodotto, mentre nel secondo è una sostanza denominata Eritrosina che viene aggiunta in fase di lavorazione. Ugualmente potrebbe risultare in altri casi molto complesso cercare di riconoscere quali sostanze coloranti, naturali o sintetiche, siano presenti nel prodotto, perché sviluppatasi nel corso della lavorazione a partire per esempio da precursori originariamente presenti o meno nel prodotto.

A parte alcune eccezioni, le sostanze coloranti dei cibi possono essere raggruppate in quattro grandi categorie.

Nella prima categoria possiamo collocare i pigmenti del gruppo eme e le clorofille. Sono tutti derivati tetrapirolici che si differenziano per i legami all'interno dell'anello porfirinico o in altre caratteristiche di struttura. Tra i pigmenti eme troviamo l'emoglobina, Hb, pigmento del sangue, e la mioglobina, Mb, presente nei muscoli che nel pesce e nelle carni danno luogo a fenomeni di scolorimento fino all'imbrunimento.

Nella seconda categoria si collocano i derivati isoprenoidi quali i carotenoidi. Si ritrovano nelle foglie delle piante, nella maggior parte dei frutti gialli e rossi, nelle verdure, e, per quanto concerne il mondo animale, ne sono ricchi crostacei, pesci rossi, salmoni e i tuorli delle loro uova e quelle degli altri animali. Sono anch'essi divisi in due sottogruppi: basati sull' α e β carotene oppure sul licopene, pigmento presente in particolare nel pomodoro. I carotenoidi sono dotati di alti gradi di insaturazioni e quindi sono anche particolarmente soggetti all'ossidazione. Le perdite di colore dei carotenoidi sono imputabili spesso alla isomerizzazione da parte di luce, calore o di ambiente acido delle forme trans a cis.

Nella terza categoria ci sono i composti antocianici e flavonodici, che appartengono alla classe dei derivati benzopirani. Frutti rossi, radici vegetali e cereali ne sono ricchi. Il loro colore vira verso il blu in particolari condizioni: il fenomeno, dovuto ad una anormale concentrazione di antocianine e a favorevoli condizioni di pH, è però piuttosto raro e normalmente superato su scala industriale. Ci sono invece particolari pigmenti coloranti della barbabietola classificati come nitro antocianine in grado di mutare la propria colorazione da viola a giallo a pH decisamente alcalini.

All'ultima classe di coloranti appartengono composti come il caramello e le melanoidine. Possono in realtà considerarsi composti prodotti volontariamente in corso di lavorazione, ma in alcuni casi compaiono nei cibi senza l'intervento umano. Li ritroviamo negli sciroppi e nei prodotti derivati dai cereali, e sono in particolar modo soggetti ad azione di imbrunimento non enzimatico.

1.9 L'aspetto degli alimenti e l'importanza del colore

La prima impressione sensoriale che un alimento suscita è quella visiva e la maggior parte della nostra disponibilità nell'accettarne il consumo dipende dalla sua apparenza, ovvero dall'informazione percepita attraverso l'occhio e riguardante la sua forma, la sua struttura, il suo colore e le loro relazioni con l'ambiente circostante. Questa informazione è generalmente confrontata con archetipi presenti nella nostra memoria, determinando la nostra eventuale predisposizione ad attivare gli altri apparati sensoriali. Un aspetto inusuale scatena immediatamente un allarme di altri organi di senso: se un pomodoro si presenta raggrinzito, di colore troppo cupo, con aree a differente consistenza visiva, si cercherà immediatamente di saggiarne la consistenza tattile, di verificare eventuali odori di marciume e sicuramente tale prodotto risulterà anche poco allettante al consumo. Lo stesso si dica per un prodotto con colore non convenzionale, istintivamente si avrà la predisposizione ad avvicinare il naso al prodotto per individuare eventuali odori molesti.

Due esperti del settore, Kramer e Szczesniak (23), in forma sintetica, hanno proposto di interpretare la qualità sensoriale di un alimento sotto forma di un cerchio, la cui circonferenza è divisa in tre zone definite dagli organi di senso maggiori: l'apparenza, percepita con gli occhi, il *flavour*, interpretato con le papille della lingua e le cellule olfattive dell'epitelio del naso e la testura o cinestesia, apprezzata con le terminazioni muscolari.

Anche qualora questi tre sistemi sensoriali possano essere descritti come separati ed individuali, la percezione sensoriale in realtà coinvolge l'apprezzamento contemporaneo di più caratteristiche ed il loro confine non è affatto definito.

Nel cerchio di Kramer e Szczesniak la più importante regione di sovrapposizione delle caratteristiche sensoriali è appunto quella dell' "anticipazione del flavour e della testura associata con l'apparenza".

A questa impressione anticipata, segue poi la valutazione di una serie di attributi definiti "partecipatori". Benchè gli attributi percepiti nella fase partecipatoria siano quelli definitivi, non v'è dubbio che la predisposizione esercitata nella fase anticipatoria sia fondamentale. Ed occorre ancora sottolineare che le proprietà di apparenza non riguardano soltanto caratteristiche intrinseche dell'alimento, ma anche le proprietà dell'ambiente che lo circonda.

Il modello proposto si suddivide le proprietà di apparenza in tre gruppi: proprietà ottiche, forma fisica e modo di presentazione ed è ovvio che oggi ci sia una spiccata propensione ad una loro valutazione oggettiva e strumentale (24). Questi parametri, d'altronde, sono sovente elemento di controllo in-line delle tecnologie alimentari: un sistema di valutazione dell'immagine mediante digitalizzazione da telecamera può regolare il tempo di sosta o la temperatura dei forni di cottura di un biscotto, piuttosto che rendere possibile la selezione automatica delle mele in fase di confezionamento (eliminando quelle immature, o quelle marce). Altrettanto, la qualità visiva di una birra o di un vino, più che da giudizi soggettivi, può essere misurata da parametri indiscutibili (tinta, saturazione, luminosità, torbidità, schiumosità, dimensioni e persistenza del perlage), anche in relazione a fattori ambientali.

Sono tutte applicazioni di grande interesse che da anni ormai sono entrate a far parte della quotidianità della realtà industriale. Le telecamere sostituiscono gli occhi del personale nella cernita automatica dei prodotti in collaborazione con macchinari di espulsione automatica e tutto questo non fa altro che incrementare l'efficienza dei sistemi e la costanza della qualità.

Le proprietà ottiche (colore, lucentezza, traslucenza o torbidità) dipendono dalle modalità (assorbimento, trasmissione, riflessione speculare, riflessione diffusa) con cui il raggio luminoso interagisce col materiale alimentare. Queste proprietà risentono anche delle caratteristiche della luce incidente e dalla percezione dell'osservatore. L'illuminazione deve essere in grado di far risaltare la componente cromatica fondamentale del prodotto per effettuare una cernita che sia a tutti gli effetti efficace. Oggi la colorimetria degli alimenti è ormai un settore ben definito, anche perchè le variazioni di colore sono un

importante segnale delle modificazioni qualitative (si pensi ad un succo di frutta appena spremuto che imbrunisce, ad un pesce che invecchiando perde la sua lucentezza, etc.).

Il colore viene descritto come abbiamo già ampiamente documentato sul piano oggettivo in termini di tinta, luminosità e saturazione e può essere misurato con particolari strumenti, oppure in relazione ad opportuni "atlanti". Da questo punto di vista, l'insistenza in una valutazione sensoriale professata in alcuni settori (come quello del vino) è un vezzo incomprensibile: dire che un Chianti ha un colore rubino, concentrato e vivo sarà linguisticamente attraente, ma molto meno preciso che identificare il suo colore (in coordinate cromatiche CIE) con il tritico lunghezza d'onda dominante = 675 nm, brillantezza = 35%, purezza = 73%.

E lo stesso si può dire per la lucentezza, un'altra proprietà ottica importante, meno influenzata dalle condizioni ambientali e di sensibilità dell'osservatore: essa dipende unicamente dalla quantità di luce specularmente riflessa dalla superficie del materiale. Più precisamente, questa proprietà dipende dalla struttura superficiale del materiale: quanto più è levigato, tanto più è lucente. Dal punto di vista qualitativo, la perdita di lucentezza può essere conseguenza di una parziale disidratazione superficiale (avvizzimento di un vegetale, "bruciature" da freddo nel pesce surgelato). Il controllo oggettivo di questo parametro garantisce una rivalutazione dei prodotti e conferisce maggiore apprezzabilità agli occhi del consumatore.

La traslucenza è invece legata alla riflessione interna (diffusa) al materiale (soprattutto per i liquidi) e presuppone una scala descrittiva del tipo trasparente-opaco, passando per successivi livelli di torbidità. Anche in questo caso, la misurazione può avvenire in modo oggettivo con strumenti del tipo dei nefelometri. La traslucenza, dal punto di vista qualitativo, è legata alla omogeneità delle fasi che costituiscono il prodotto: una birra perde di traslucenza con il manifestarsi di una eccessiva ossidazione (precipitazione di proteine e/o tannini) o di uno sviluppo eccessivo di cellule di lievito.

Le proprietà ottiche sono comunque proprietà locali ed un parametro importante è la loro uniformità nello spazio: il colore di una fetta di formaggio nella direzione crosta-cuore ci informa sulla regolarità della maturazione; quello di una fetta di prosciutto (nella sua complessità) ci propone un giudizio qualitativo fondamentale, ovvero quanto grasso di contorno, quanto muscolo più o meno chiaro e quante scollature sono presenti. Questa caratteristica di uniformità delle proprietà ottiche è più difficilmente indagabile con sistemi oggettivi, benchè le applicazioni di image-analysis potrebbero in futuro essere risolutive.

Le proprietà ottiche giocano un ruolo fondamentale anche nell'anticipazione del flavour: si può dimostrare che assaggiatori standard attribuiscono in modo significativo una corrispondenza differente a caramelle miste alla frutta differentemente colorate. Ed il colore gioca un ruolo anche nella quantità di flavour percepito, come è il caso di bibite alla cola chiare e brune, che assaggiate allo scuro sono giudicate analogamente amaricate, ma sorbite alla luce ricevono differenti punteggi quantitativi nel carattere di amaro.

Le tecniche innovative di image-analysis estendono il loro settore di applicazione alle geometrie dei prodotti riferendosi a parametri oggettivi come il volume, la superficie, i rapporti tra dimensioni e i fattori di forma. Rappresentano una alternativa per la velocizzazione delle operazioni e spesso realizzano progetti di controllo di qualità a costi anche contenuti.

La standardizzazione delle caratteristiche alimentari appartiene alle esigenze della moderna produzione e commercializzazione degli alimenti. Risulta spontaneo pensare che questo controllo quasi esasperato delle innumerevoli caratteristiche dei prodotti, la continua ricerca della standardizzazione per forma, aspetto, risulti in realtà deleteria per la categoria di sensi che dovrebbe invece essere più interessata. Così guardare un cibo oggi appare paradossalmente più importante che saggiarne la consistenza masticandolo, o riconoscerne gli attributi personali di gusto attraverso l'olfatto e l'assaggio. Ciò che percepiamo attraverso il solo senso della vista diventa spesso discriminatorio per gusto ed olfatto. Si spiega quindi la grande importanza che oggi viene attribuita al colore ed alla sua determinazione.

BIBLIOGRAFIA

1. Boscarol, M.. "Scienza del colore: Colorimetria". Internet: www.boscarol.com.
2. Berlin, B. and Kay, P.. "Basic Color Terms: Their Universality and Evolution". Berkeley: University of California 1969, reprinted 1991.
3. Mackinney, G and C.Little, A.. "Color of foods". The AVI Publishing Company, Westport Connecticut. 1962. Pag 1-35.
4. Sito ufficiale CIE. Internet: www.cie.co.at/cie/index.html.
5. Ford, A. and Roberts, A. "Color space conversions". Internet: http://www.zenger.informatik.tu-muenchen.de/lehre/vorlesungen/graphik/info/csc/COL_2.htm#topic1. 1998.
6. Walford, J.. "Developments in food colours-1:Food Colorimetry". Applied Science Publishers, LTD London. 1980. Pag 29-32, 189-217.
7. Oleari, C.. "Spazio del colore, diagrammi di cromaticità e problemi di non uniformità di scala". Notizen n.154. 1996. Pag 31-36.
8. Poynton, C.. "A guided tour of color space". Online. Internet: www.inforamp.net/~poynton/Poynton-colour.html.
9. Anonimo. "Appunti sul colore". Internet: www.cierrenet.it/colori.htm.
10. Anonimo. "The Munsell System of Color Notation". Settembre 2002. Internet: www.munsell.com.
11. Luong Chi Mai. "Introduction to computer vision and image processing: Color representation". Internet: www.netnam.vn/unescocourse/computervision/12.htm.
12. Gelmetti, S. "Teoria degli spazi di colore". (2.1), pag 5. Internet: www.liveatcanon.it/pdf/talk/spazicolor.pdf.
13. Anonimo. Internet www.techcolor.com/help/cmyk.html.
14. Oleari, C.. "Osservatore standard CIE". Internet:www.fis.unipr.it/~fermi/GCA_Prato_1.htm.
15. Papadakis, S.E., Malek, S.A., Tandem, R.E., and Yam, K.L. "A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods". 2000, Food Technol. 54 (12) : 48..
16. Hunter, R.S. and Wiles, J. & Sons. "The measurement of appearance". New York. 1975.
17. Anonimo. "Spettrocolorimetri e glossmetri strumenti per la misura del colore". Internet:<http://www.lab2000.com/lab04-96/GUI04-96.TXT>.
18. Toyotsu-cho and Suita-shi." Radiometric Instruments operations 2-30:Precise colour communication". CD-ROM. Minolta.Co.Ltd, Osaka 564. 1997.
19. Russ J.C. "The Image Processing Handbook, 2a Ed", CRC Press, London, 1994.
20. Boscarol, M.. "Gamma del monitor". Internet: www.boscarol.com/pages/cg/059-mon_col.html.
21. Oleari, C. "Introduzione alla misurazione del colore". Internet: http://www.fis.unipr.it/~fermi/GCA_Colorimetria_Introduzione.html.
22. Anonimo. "Specification ICC". File Format for Color Profiles (PDF file - 1.7mb) ". 2001-04. Ottenibile all'indirizzo: www.color.org.
23. Kramer, A. and Szczesniak, A.S.. "Texture Measurement of foods". D. Reidel, Dordrecht Ed., Boston, 1973.
24. Riva, M. "Radicchio vecchio e giovane:Il ruolo dell'apparenza nell'apprezzamento dei cibi". 1999. Slow (14), pag 76-87.