

Sensibilità allo spettro dei sensori Nikon FX e DX: sulla via del colore

Nikon
EXPERIENCE

www.nital.it



Dalla acquisizione di immagini in laboratorio alla misura di qualità del colore restituito dalla gamma Reflex DSLR Nikon secondo gli standard ICC. Un viaggio dalle sensibilità spettrali dei sensori Nikon FX e DX alla colorimetria standard.

OTTOBRE 2013

A cura di: MATTEO MICCOLI, DONATO QUARTA e MARCELLO MELIS

SOMMARIO

Introduzione

Luce e luce bianca

Il colore delle cose

Bastoncelli e coni dell'occhio umano

Sensibilità dell'occhio e colorimetria standard: le Color Matching Functions

Sensibilità dei sensori CMOS, Color Filter Array di Bayer e demosaicizzazione

La carta di identità di una fotocamera: le curve di sensibilità spettrale

Curve di sensibilità standar (CMF) e diagramma di cromaticità nello spazio x, y

Metamerismo ed immagini sintetiche

Curve di sensibilità delle fotocamere e diagrammi di cromaticità nello spazio r, g

Da RGB ad XYZ: profili di colore. Misura della qualità del colore

Confronto risultati e misurazioni Profilocore con quelle DxO Mark

Conclusioni

Riproduzione fedele di opere d'arte

Bibliografia

Link correlati

Tutti i diritti sono riservati.

Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta senza l'autorizzazione scritta dell'autore e dell'editore (Nital S.p.A.) con qualsiasi mezzo di riproduzione, meccanico o elettronico.

Nomi e marchi citati nel testo sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive aziende.

Questo documento PDF è un articolo (eXperience) della newsletter Feel Nikon, edita da Nital S.p.A.

Comitato di redazione

Giuseppe Maio, Marco Rovere

Progettazione e impaginazione

Advision srl Verona. | www.ad-vision.it

Introduzione

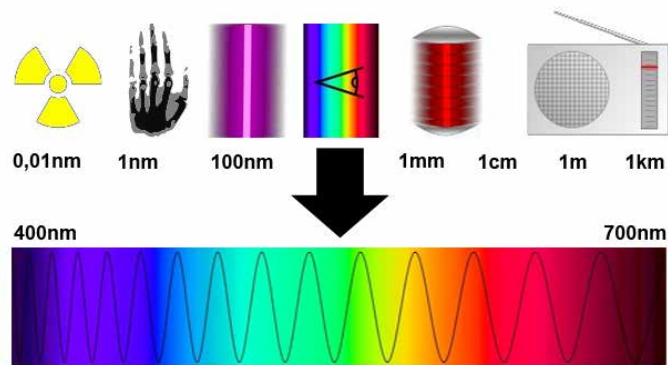


Sulla cattura e riproduzione del colore è possibile trovare letteratura di ogni genere, da libri di testo estremamente autorevoli come “Misurare il colore” del Prof. Claudio Oleari ad articoli dove il colore viene trattato come una sensazione emotiva, in modo qualitativo. Il colore può essere catturato come elemento isolato attraverso uno strumento di misura, oppure come immagine a colori attraverso una fotocamera. Anche la letteratura sui sensori è vasta ed offre approfondimenti a qualunque livello. Per i più intrepidi citiamo un secondo testo sacro dedicato a questo tema: “Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras” di Junichi Nakamura. Le nostre copie di questi libri hanno ormai le pagine consumate, perché non si finisce mai di imparare e capire fino in fondo la strada che percorrono i colori in natura prima di arrivare a noi attraverso mezzi di ripresa (fotocamere, videocamere, scanner) e mezzi di riproduzione (monitor, stampa, videoproiettore etc.). Il percorso è complesso, con molti passaggi, e se non compreso in modo rigoroso può presentare insidie in grado di alterare il risultato finale, anche in modo significativo, rispetto a quanto percepito all'origine. In questa pubblicazione [eXperience](#) seguiremo passo passo le trasformazioni che subisce il colore, o meglio la sua rappresentazione, nel suo percorso dalla scena reale alla scena rappresentata, soprattutto nella fase più delicata, quella della ripresa. Faremo questo viaggio confrontando quanto avviene quantitativamente e qualitativamente sui principali modelli di fotocamere [DSLR Reflex Nikon](#), ma anche su compatte prendendo in esame la [COOLPIX P7800](#). Scopriremo quindi le ragioni fisiche della tecnologia colore hardware adottata da Nikon grazie alla quale i suoi modelli vengono oggi classificati nelle prime posizioni dell'intera offerta di mercato, cominciando il percorso dalla natura di quello che nel mondo della fotografia sta all'origine di tutto: la luce.

Luce e luce bianca

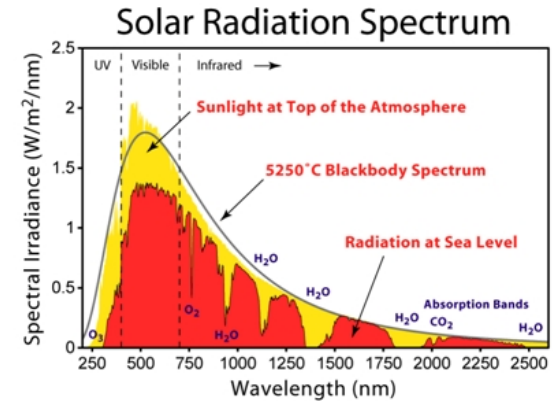
Quante volte ci siamo soffermati a chiederci cosa fosse la luce? È un elemento talmente pervasivo e presente nella nostra vita, come l'aria, che lo percepiamo continuamente senza averne coscienza. In realtà la luce è una radiazione elettromagnetica, come lo sono le onde radio, le microonde ed i raggi X, ma composta da quel ristretto intervallo di lunghezze d'onda che noi chiamiamo, non a caso, spettro visibile. I nostri occhi sono in grado di captare, cioè percepire, una radiazione elettromagnetica (luce) le cui lunghezze d'onda siano comprese tra circa 400nm (zona del blu) e circa 700nm (zona del rosso). Un nm (nanometro) è pari ad un milionesimo di metro.

SPETTRO ELETTROMAGNETICO



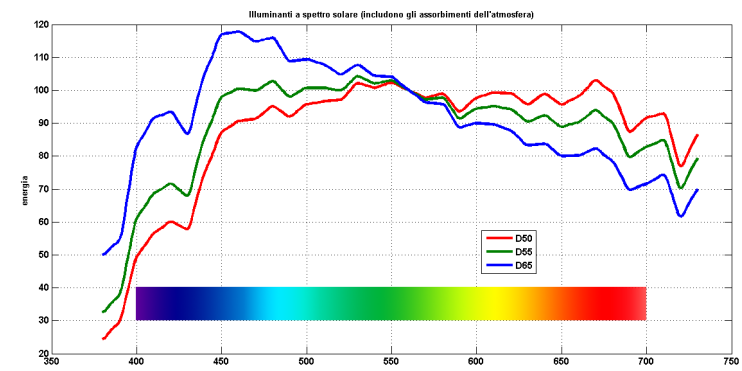
Spettro elettromagnetico e porzione di spettro della luce visibile compresa tra circa 400nm (zona del blu) e circa 700nm (zona del rosso).

SPETTRO RADIAZIONI SOLARI



Spettro emesso dal Sole (giallo), spettro a terra (rosso, dopo assorbimenti atmosferici) e spettro da corpo nero a 5.500 Kelvin (linea nera).

SPETTRO LUCE BIANCA D50, D55, D65



Spettro luce bianca: illuminanti solari D50, D55, D65.

La luce più comune che conosciamo è quella del Sole, ed è anche quella che noi chiamiamo luce naturale, luce bianca. La luce del Sole è costituita da una miscela (o una distribuzione, per usare termine più appropriato) di lunghezze d'onda in un intervallo molto ampio, che va da circa 250nm a circa 2.500nm, cioè un intervallo ben più ampio della luce visibile. In accordo alla teoria del corpo nero di Plank, la distribuzione di energia non è uniforme e presenta la zona di massima emissione che coincide con lo spettro della luce visibile. Questo non è un caso né un colpo di fortuna, ma il frutto della evoluzione e dell'adattamento all'ambiente delle specie viventi. Dunque la luce bianca è proprio questo. Una ben precisa distribuzione di lunghezze d'onda a forma di gobba che presenta un massimo in corrispondenza del verde e valori leggermente inferiori per blu e rosso.

Il colore delle cose

E quindi cosa è il colore?

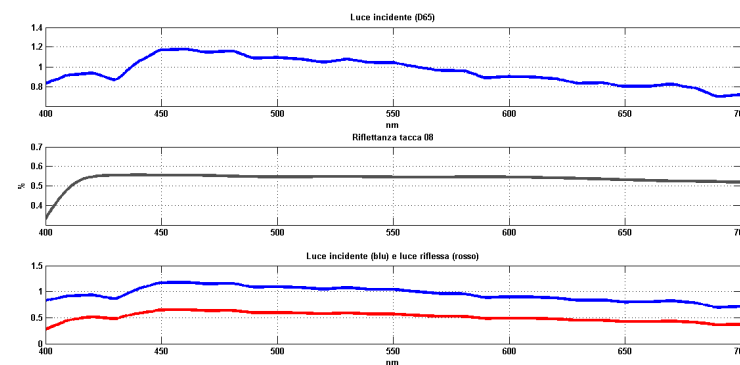
Ogni volta che i nostri occhi percepiscono una radiazione nel visibile con una distribuzione diversa da quella della luce bianca, diciamo di vedere qualcosa di colorato. Qualche esempio ci aiuterà a chiarire il concetto. Se esponiamo alla luce del sole un cartoncino e questo ci appare bianco, vuol dire che i nostri occhi sono raggiunti da uno spettro che nel visibile è uguale a quello della luce che colpisce il cartoncino, e quindi questo sta riflettendo in uguale misura tutte le componenti spettrali. Si dice allora che il cartoncino ha una riflettanza costante nello spettro del visibile e diciamo che il cartoncino non è colorato.

SCALA COLORI X-RITE COLOR CHECKER



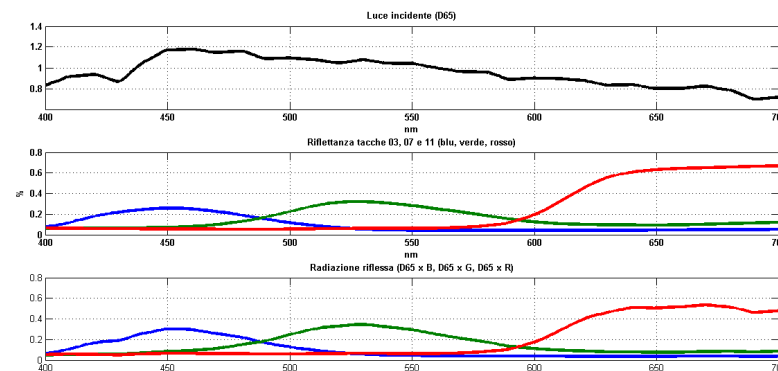
Rappresentazione della x-rite Color Checker dove sono stati sovrapposti i numeri per identificare le tacche usate nei grafici e nelle descrizioni di testo.

SPETTRO INCIDENTE, RIFLESSO E RIFLETTANZA SU NEUTRO.



Spettro illuminante D65 riflesso da tacca neutra 08.

SPETTRO INCIDENTE E RIFLESSO DALLE VARIE SUPERFICI



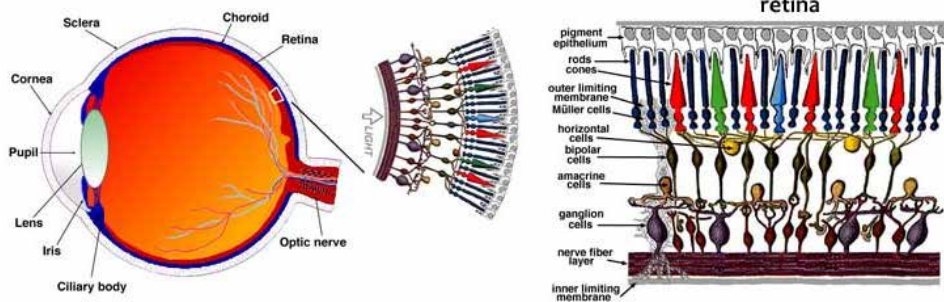
Spettro D65 riflesso da tacche 03, 07, 11.

Se esponiamo alla luce del sole uno o più cartoncini (o le tacche di una scacchiera di colori), e sotto la stessa luce ciascuno ci appare di un colore diverso, vuol dire che ciascuno riflette lo spettro della luce bianca in modo diverso alterandone la distribuzione. Vale la pena puntualizzare la differenza tra luce bianca e superficie bianca. Una luce ci appare bianca quando la sua distribuzione spettrale somiglia a quella del Sole. Una superficie ci appare bianca (o neutra) quando non altera lo spettro della luce che riflette, ovvero quando la sua riflettanza è costante per ogni lunghezza d'onda. Da tutto questo quindi è chiaro come l'occhio sia in grado di distinguere tra di loro i colori grazie al fatto che questi presentano distribuzioni spettrali diverse. Ma allora questo vuol dire che l'occhio è, in qualche modo, in grado di distinguere uno spettro da un altro. Come?

Bastoncelli e coni dell'occhio umano

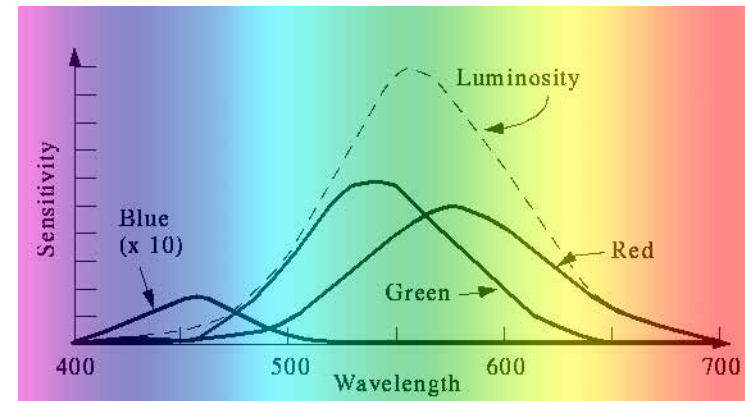
Il funzionamento del nostro occhio ricorda quello di una fotocamera costituita da un'ottica, con diaframma, e da un sensore. L'occhio raccoglie (e trasforma) il flusso luminoso che lo colpisce in immagini in bianco e nero ed a colori. La parte ottica dell'occhio è costituita dall'insieme della superficie esterna della cornea che con la sua curvatura rappresenta la prima lente, del cristallino (lente variabile che ci permette di mettere a fuoco) e dell'umore acqueo che conduce la luce sul fondo dell'occhio.

ANATOMIA DELL'OCCHIO E DETTAGLI DELLA RETINA



Sensibilità spettrali dei bastoncelli e dei tre tipi di coni

SPETTRO RADIAZIONI SOLARI



Curve di sensibilità dell'occhio umano

La parte sensibile è costituita dalla retina dove trovano posto in elevatissimo numero (e con densità spaziale variabile) due categorie di sensori: bastoncelli (Rods) e coni (Cones). I primi hanno una sensibilità elevata (per la visione notturna) che si estende per tutto lo spettro visibile, e quindi, non essendo selettivi rispetto alla lunghezza d'onda, forniscono sostanzialmente una versione monocromatica della scena. I secondi (i coni) sono divisi a loro volta in tre tipologie, ciascuna con una sensibilità specifica ad una zona dello spettro visibile (blu, verde, rosso). I tre tipi di coni presentano quindi sensibilità selettive rispetto alle diverse porzioni dello spettro visibile.

Sensibilità dell'occhio e colorimetria standard: le Color Matching Functions

Abbiamo visto che la retina dell'occhio è dotata di sensori in grado di distinguere selettivamente le tre zone dello spettro del visibile (blu, verde e rosso) e questo è descritto dalle curve di sensibilità mostrate. Nel 1931 il Comitato Internazionale per l'Illuminazione (CIE) ha standardizzato le curve di sensibilità dell'osservatore medio con campo di vista di 2°, imponendo a queste curve alcune caratteristiche fisiche, come ad esempio quella di fornire tre stimoli uguali a fronte di uno spettro equienergia, ovvero costante su tutta la banda visibile. Ne sono risultate le così dette Color Matching Functions (CMF) che vengo utilizzate come riferimento standard per assegnare a qualsiasi spettro nel visibile tre coordinate colorimetriche: X, Y, e Z. Uno dei vincoli imposti alle CMF è che il canale Y rappresenti anche il valore fotometrico dello spettro analizzato, cioè il valore Y fornisce il valore di luminanza della sorgente.

COLOR MATCHING FUNCTIONS - CMF

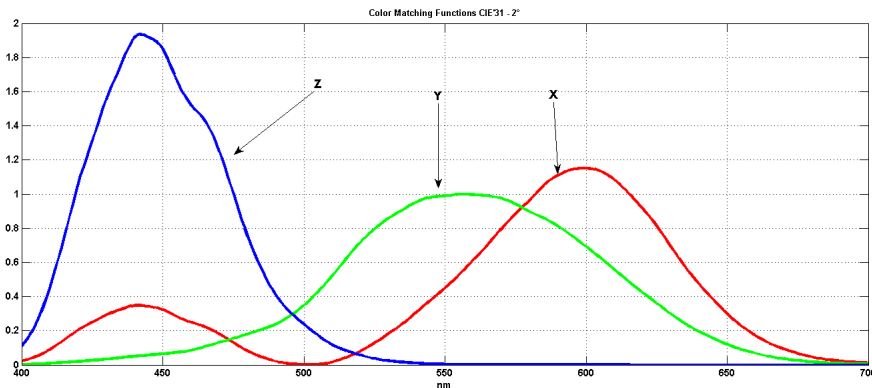


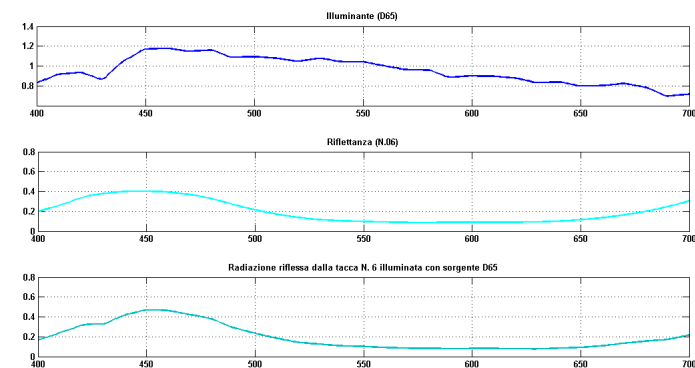
Grafico CMF

RADIANZA RIFLESSA



Illuminante D65 riflesso da tacca 06

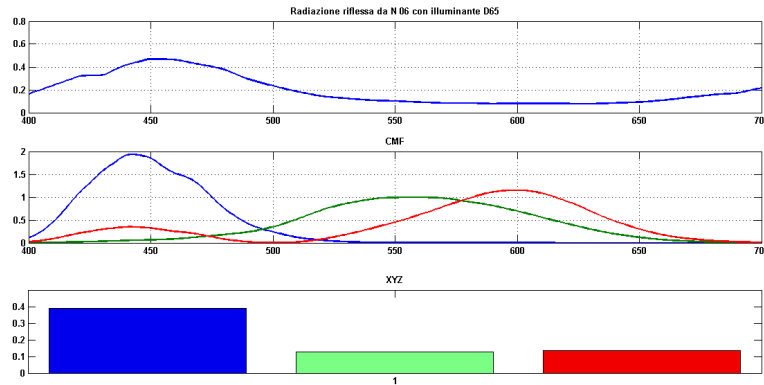
RADIANZA RIFLESSA CMF XYZ



Conversione in XYZ della radianza riflessa da tacca 06 illuminata con D65

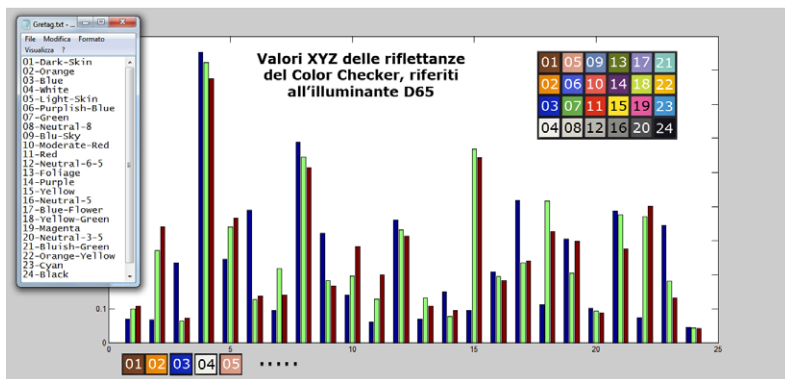
Le componenti XYZ (ad esempio di una sorgente luminosa) si ottengono moltiplicando lo spettro della luce per ciascuna delle CMF (lunghezza d'onda per lunghezza d'onda) e calcolando le somme delle tre serie di valori ottenuti (somma integrale).

RADIANZA RIFLESSA CMF XYZ



Conversione in XYZ della radianza riflessa da tacca 06 illuminata con D65

FIGURA COLOR CHECKER CON BARRE XYZ



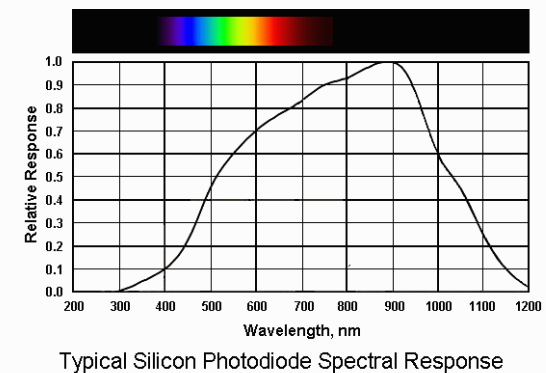
Illuminante D65 riflesso da tacca 06

Se lo spettro è di emissione, ovvero di una sorgente di luce, questo viene pesato direttamente con le CMF per ottenere le coordinate XYZ, se lo spettro è di riflessione, allora le coordinate XYZ includono (e variano) a seconda della sorgente (illuminante) utilizzata.

Sensibilità dei sensori CMOS, Color Filter Array di Bayer e demosaicizzazione

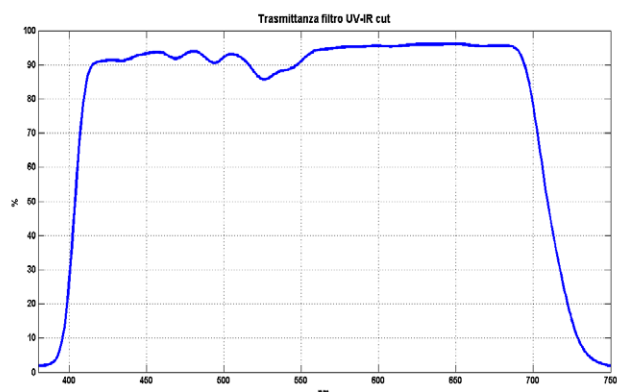
La colorimetria è quindi, come ci si doveva aspettare, completamente basata sulla fisiologia dell'occhio umano. Ma come reagiscono invece i sensori delle fotocamere quando vengono raggiunti da una radiazione luminosa? Va subito detto che qualsiasi sensore al silicio (come i CMOS ed i CCD, la sigla differente indica solo una diversa elettronica) ha la funzione di convertire i fotoni di energia elettromagnetica in cariche elettriche, e che la quantità di carica elettrica prodotta per fotone (cioè per onda) dipende dalla lunghezza d'onda stessa. Inoltre le lunghezze d'onda alle quali il silicio è sensibile coprono solo una parte dello spettro elettromagnetico superiore allo spettro visibile.

SENSIBILITÀ SPETTRALE SILICIO



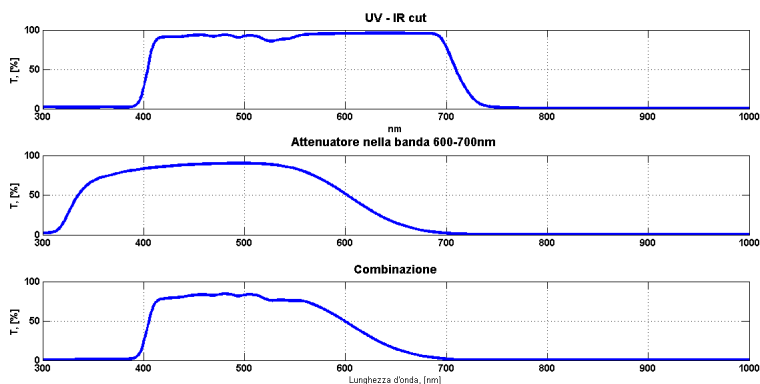
Sensibilità spettrale di un sensore al silicio senza alcun filtro

FILTRO UV-IR CUT



Trasmissione di un tipico filtro UV-IR cut

FILTRO COMBINATO DI RIPRISTINO



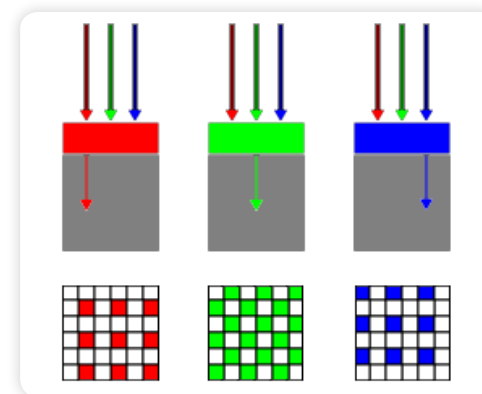
Combinazione di filtri equivalente al filtro posto davanti al sensore al silicio per il visibile

Dal grafico è evidente quindi che i sensori al silicio sono sensibili a lunghezze d'onda da poco più di 300nm fino a circa 1.200nm, ed all'interno di questo intervallo non hanno modo di distinguere spettri di forme diverse, quindi i colori (nella banda del visibile). Per poter quindi utilizzare questi sensori per la fotografia a colori sono necessari due accorgimenti.

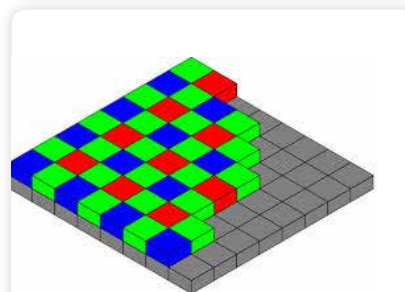
Prima di tutto è necessario eliminare le radiazioni che cadono al di fuori della banda del visibile. Questa operazione può essere realizzata antepoendo al sensore un filtro UV-IR cut che lasci passare inalterata solo la luce visibile. Nella realtà conviene adottare un filtro con una trasmittanza diversa che attenui l'eccesso di sensibilità nella banda del rosso per ottenere, nel complesso una sensibilità più uniforme su tutto il visibile. La seconda operazione da fare è rendere i pixel del sensore selettivamente sensibili a tre zone dello spettro visibile parzialmente sovrapposte, grosso modo identificate come blu, verde e rosso. Questo equivale al meccanismo di visione della retina dove, punto per punto sono presenti coni con sensibilità nel blu, nel verde o nel rosso. Questo sistema, inventato da Bryce Bayer, un ricercatore della Eastman Kodak, brevettato negli USA nel 1976, prende il nome di Matrice di Bayer, o Filtro di Bayer, o Color Filter Array (CFA).



Bryce Bayer della Eastman Kodak



Separazione dei colori con matrice di Bayer



Matrice Bayer CFA

A volte troviamo utile sfruttare la compensazione dell'esposizione della luce dei flash per ottenere illuminazioni d'effetto: abbassiamo volutamente di $-0,7$ EV il flash secondario gestendo al meglio la fonte di illuminazione secondaria. Diventa veramente divertente giocare con le varie impostazioni e sperimentare sul campo differenti illuminazioni. Grazie ai pulsanti delle custodie è possibile agire rapidamente e cambiare le impostazioni del flash principale o di quello secondario a necessità.

La matrice di Bayer consiste in una scacchiera di filtri apposti su ogni singolo pixel del sensore, con una ripetizione ordinata dei colori rosso, verde e blu. Va detto e sottolineato subito che l'esatta sequenza dei colori e lo spettro di trasmittanza di ogni micro filtro non sono fissate ed ogni costruttore adotta una propria versione della matrice di Bayer. A parità di sensore, diverse forme nelle trasmittanze dei filtri della matrice di Bayer portano a qualità di immagini diverse e soprattutto a diverse qualità nella riproduzione dei colori.

La carta di identità di una fotocamera: le curve di sensibilità spettrale

SENSIBILITÀ ALLO SPETTRO DEL SENSORE NIKON D800



Dunque così come la retina è dotata di sensori specializzati nei tre colori che rappresentano una suddivisione dello spettro visibile in tre bande di larghezza simile, in un sensore al silicio (es. CMOS), i pixel del sensore stesso sono specializzati nella cattura selettiva del colore attraverso micro filtri ottici che nel loro complesso formano la matrice di Bayer. Continuando l'analogia vediamo ora come varia la sensibilità dei pixel nel rosso, verde e blu, al variare della lunghezza d'onda tra i 400 ed i 700 nanometri: le curve di sensibilità spettrale.

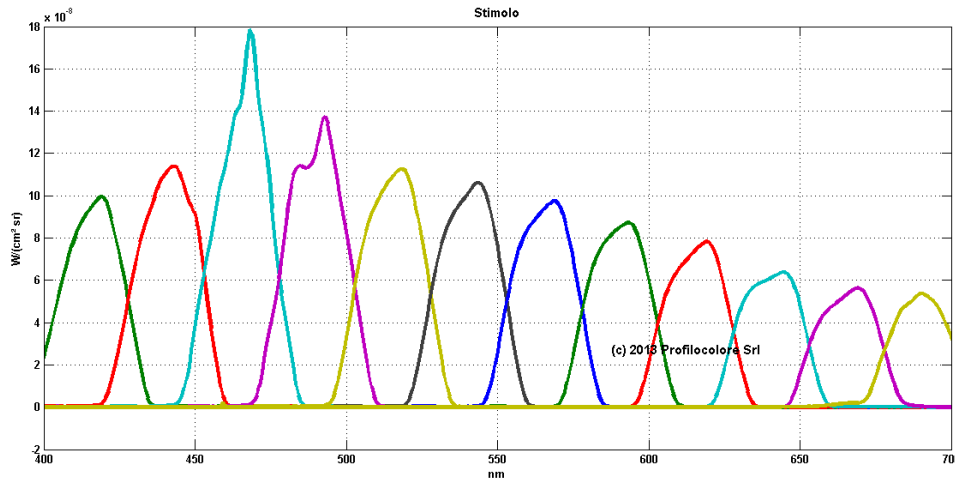
La misura della sensibilità spettrale di una fotocamera

La misura della sensibilità di un dispositivo (nel nostro caso la fotocamera) si ottiene sempre inviando al dispositivo un segnale di cui sia nota l'energia, e rilevando la risposta del dispositivo stesso. Il rapporto tra i due valori fornisce la sensibilità del dispositivo, ovvero come e quanto il dispositivo reagisce ad uno stimolo esterno variabile. Semplificando, nel caso delle fotocamere queste vengono esposte ad una luce con spettro di emissione noto, si fa uno scatto e si leggono i valori digitali nell'immagine ottenuta. Se vogliamo misurare la sensibilità della fotocamera alle varie lunghezze d'onda, sarà sufficiente esporre il sensore ad una serie di illuminazioni a banda stretta centrate su lunghezze d'onda variabili e rilevare per ogni banda i valori digitali registrati. Entrare nel dettaglio di questa misura, qui molto semplificata, è fuori dello scopo di questa pubblicazione eXperience, e chi fosse interessato a misure analoghe può scrivere agli autori attraverso [l'area contatti del sito ProfiloColore](#). Abbiamo quindi messo sul nostro banco di misura le fotocamere Reflex Nikon [D4](#), [D800](#), [D800E](#), [D610](#), [D600](#), [D7100](#), [D5300](#), [D5200](#), [D3200](#) e la compatta [COOLPIX P7800](#).

**FOTOCAMERE
ESAMINATE**



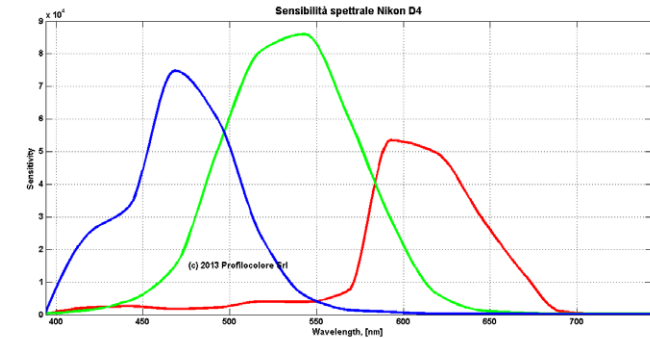
SEQUENZA STIMOLI A BANDA STRETTA



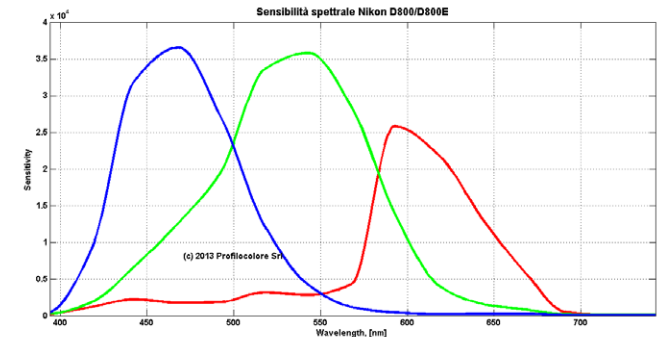
Sequenza di spettri di emissione con cui sono state calcolate le sensibilità spettrali delle fotocamere esaminate. La sensibilità si ottiene come rapporto tra i digital values forniti dalla fotocamera e l'energia a banda stretta con cui si è stimolato il sensore, dopo normalizzazione rispetto alla superficie del pixel. I digital value sono quelli normalizzati rispetto ad una esposizione equivalente per tutti i modelli di 800 ISO 1/60 di secondo ed f/2.8

Ciascuna fotocamera è stata esposta alla stessa sequenza di illuminazioni a banda stretta ottimizzando l'esposizione per ottenere immagini sempre nei limiti della dinamica, ovvero senza saturazioni verso il nero o verso il bianco. Nei grafici i valori di sensibilità sono stati normalizzati rispetto ad una esposizione equivalente di 800 ISO, 1/60 di secondo ad apertura f/2.8 ed anche rispetto alla effettiva area del singolo pixel. Ne sono risultate le seguenti sensibilità spettrali relative normalizzate.

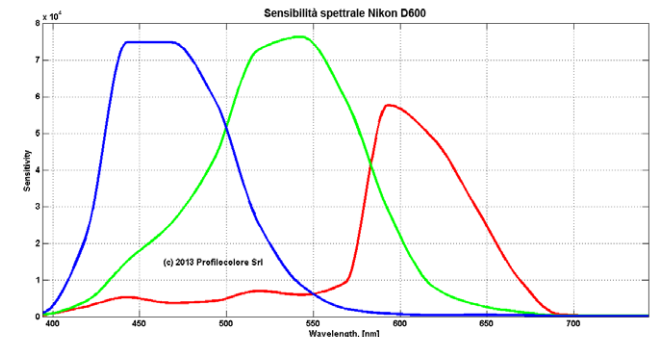
**Sensibilità
spettrale D4**



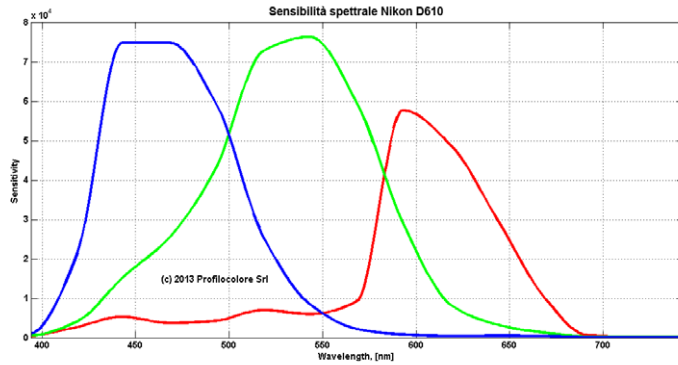
**Sensibilità
spettrale D800**



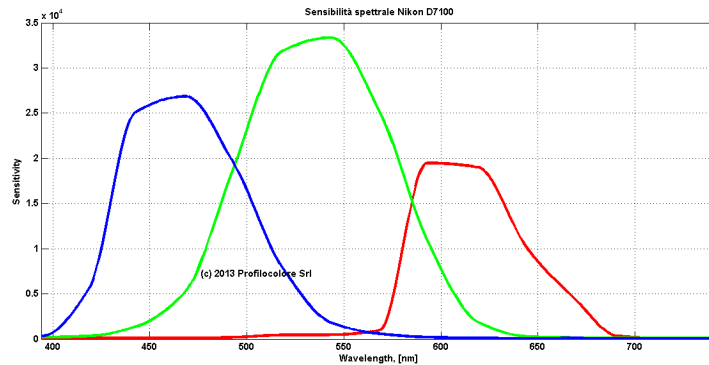
**Sensibilità
spettrale D600**



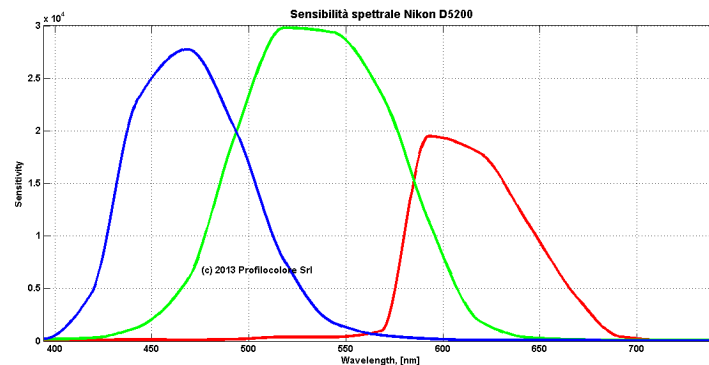
Sensibilità
spettrale D610



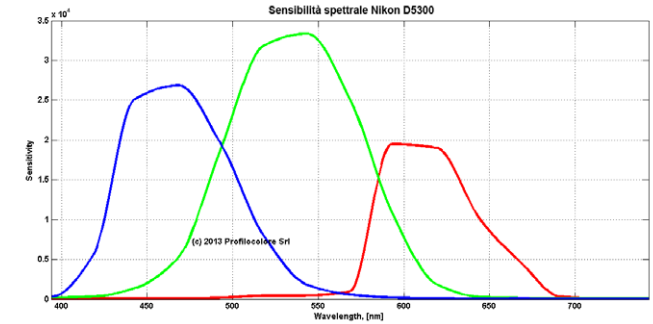
Sensibilità
spettrale D7100



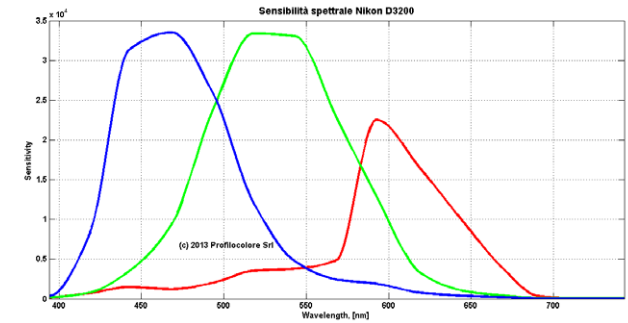
Sensibilità
spettrale D5200



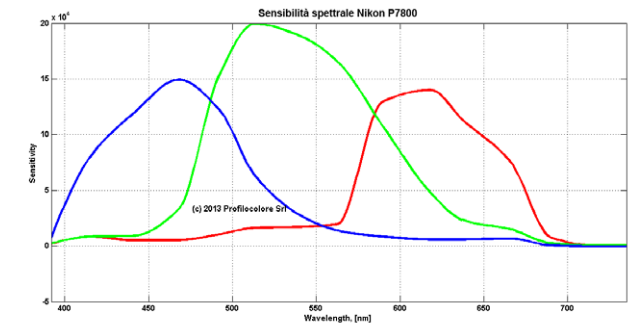
Sensibilità
spettrale D5300



Sensibilità
spettrale D3200



Sensibilità
spettrale
COOLPIX P7800

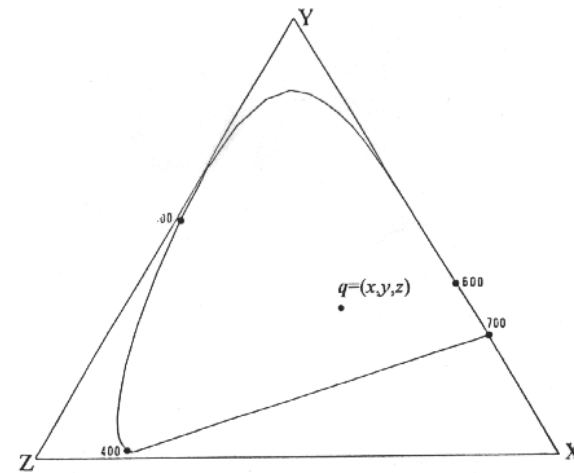


L'andamento delle curve di sensibilità spettrale è la combinazione della sensibilità del sensore al silicio e della trasmittanza spettrale dei filtri della matrice di Bayer. Quando una fotocamera "vede" uno spettro, lo trasforma in tre numeri, RGB, i cui valori dipendono fondamentalmente dalla forma delle curve di sensibilità. Due fotocamere che riprendano la stessa scena, o la stessa superficie colorata, assegneranno agli stessi punti della scena valori RGB diversi anche nelle stesse identiche condizioni di esposizione ed illuminazione perché avranno curve di sensibilità spettrale diverse. Inoltre queste terne RGB saranno in generale molto diverse dalle terne colorimetriche XYZ che la colorimetria CIE '31 assegnerebbe agli stessi colori.

Curve di sensibilità standard (CMF) e diagramma di cromaticità nello spazio x, y

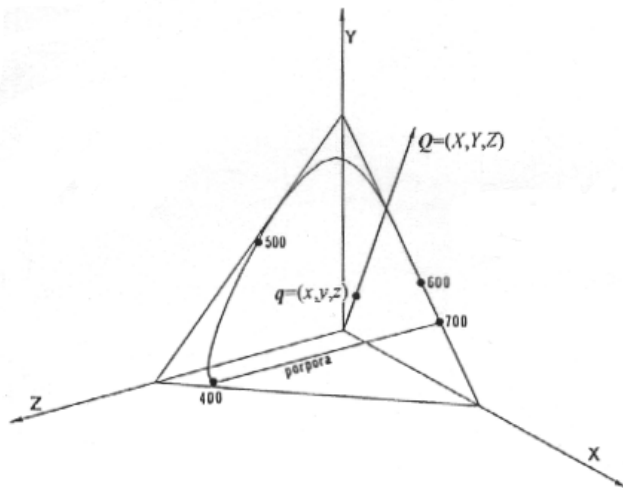
Per dare una valutazione di una fotocamera a partire dalle sue curve di sensibilità è necessario fare un ulteriore passo avanti nella analisi della curve di sensibilità della colorimetria standard, le CMF. In particolare dobbiamo immaginare una luce monocromatica la cui lunghezza d'onda possa variare dall'estremo rosso percepibile dall'occhio umano all'estremo blu (come una fessura molto sottile che scorresse lungo l'arcobaleno isolandone un solo "colore" alla volta). Ogni lunghezza d'onda, pesata con le CMF, darà luogo ad una terna XYZ e di conseguenza identificherà un punto Q nello spazio colorimetrico XYZ. Se fissiamo un triangolo (equilatero) con vertici coincidenti con il valore 1 di ciascun asse, e calcoliamo le coordinate colorimetriche di un generico colore e quindi il punto Q identificato dalle coordinate XYZ, la linea che unisce l'origine degli assi con il punto Q passerà attraverso il triangolo in un certo punto q.

DIAGRAMMA CROMATICITÀ IN XYZ DENTRO XYZ



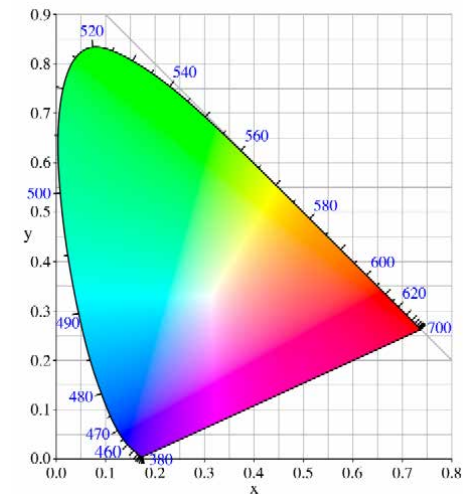
Piano normalizzato: coordinate di cromaticità xyz corrispondenti alle coordinate colorimetriche XYZ.

SPAZIO XYZ



Spazio colorimetrico XYZ e piano normalizzato xyz (triangolo).

DIAGRAMMA DI CROMATICITÀ XY



Rappresentazione a colori del diagramma di cromaticità.

Ad ogni punto XYZ corrisponderà quindi un punto xyz sul piano del triangolo citato. Le coordinate xyz avranno i valori:

$$x = X/(X+Y+Z)$$

$$y = Y/(X+Y+Z)$$

$$z = Z/(X+Y+Z)$$

I valori XYZ sono le coordinate colorimetriche mentre xyz sono le coordinate cromatiche. La differenza tra i due sistemi è che le coordinate cromatiche non tengono conto della intensità dello stimolo ma solo del colore. Facendo quindi variare una luce monocromatica dal rosso al blu e segnando i punti corrispondenti sul triangolo si ottiene una forma simile ad un triangolo con i vertici arrotondati, inscritto nel triangolo del piano xyz. Per come sono costruite le coordinate cromatiche, una volta noto il valore di due di esse, la terza è fissata, perché esiste una relazione che le lega, cioè la loro somma è sempre pari ad uno.

$$x + y + z = 1$$

Se quindi “schiacciamo” l’asse Z e guardiamo la proiezione dei punti xyz solo sul piano xy, non togliamo niente alle informazioni che ci danno le coordinate cromatiche. Il triangolo equilatero di prima diventerà un triangolo isoscele con due lati di lunghezza 1, e la figura a triangolo smussato di prima risulterà completamente contenuta in questo nuovo triangolo, assumendo una forma che ricorda una vela. Questo viene chiamato diagramma di cromaticità, e per come è stato costruito (a partire dalle curve standard di sensibilità della colorimetria) rappresenta tutta l’estensione cromatica cui il nostro occhio è sensibile. Il Diagramma di Cromaticità rappresenta quindi tutti i colori che l’occhio è in grado di vedere (a prescindere dalla intensità). Qualsiasi spettro nel visibile può essere pesato con le CMF, avere assegnate le coordinate colorimetriche XYZ, ed essere rappresentato nel diagramma di cromaticità da un punto xy.

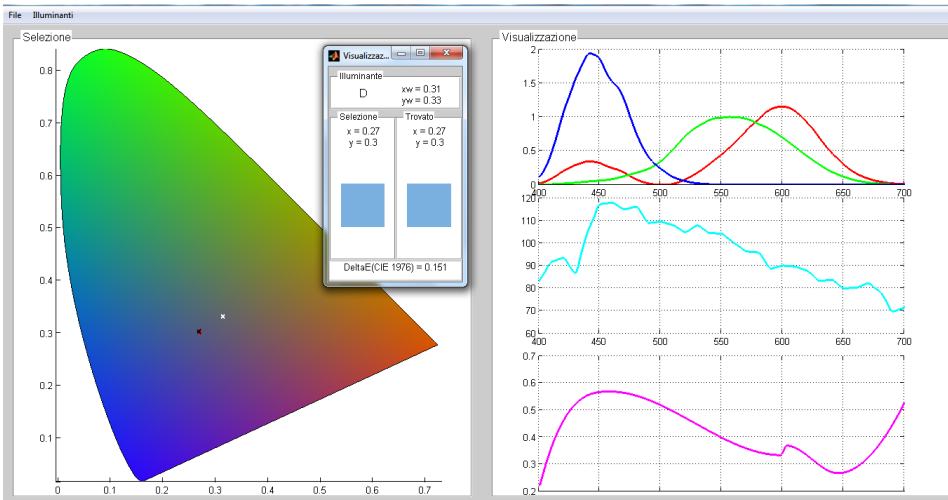


Metamerismo ed immagini sintetiche

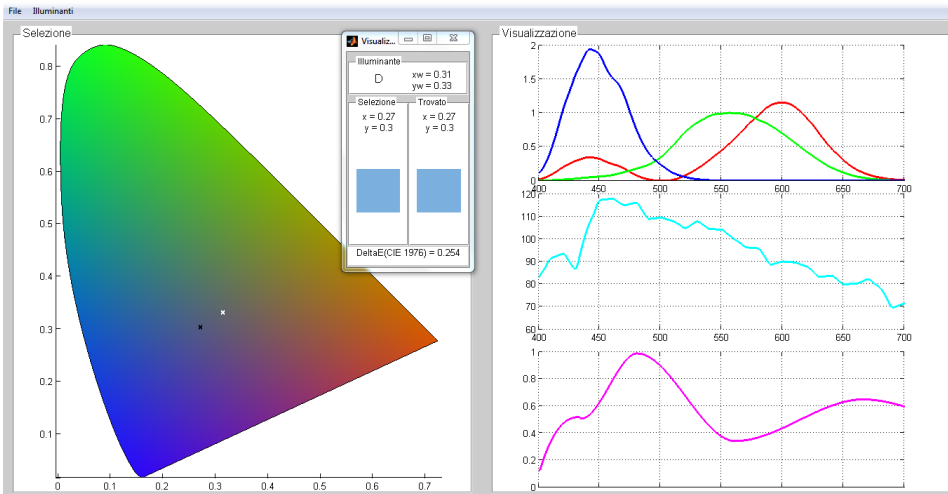


Va sottolineata a questo punto una questione fondamentale: per rappresentare uno spettro qualsiasi sono necessari moltissimi valori, ad esempio un valore ogni nanometro, perché uno spettro in natura è una distribuzione continua di energia. La colorimetria assegna ad un tale spettro solo tre valori (XYZ) per identificarlo, ed opera in questo modo perché è derivata dalla fisiologia dell’occhio. Il ridurre a tre valori una misura che ne richiederebbe un numero elevatissimo ha come conseguenza il fatto che non può esistere una corrispondenza biunivoca tra spettri e coordinate colorimetriche. Ovvero mentre ad uno spettro corrisponderà una ben precisa terna colorimetrica, ad una terna colorimetrica potranno corrispondere moltissimi spettri diversi. Questo fenomeno cui è intrinsecamente soggetto il nostro occhio viene chiamato metamerismo. Nelle due figure che seguono viene mostrato come differenti spettri di riflettanza (curva magenta in basso a destra) con illuminante D65 (curva celeste), diano luogo alla stessa percezione di colore (tacche di colore in sRGB nelle finestre piccole e crocetta nera nel diagramma di cromaticità).

METAMERISMO: SPETTRI DIVERSI DANNO LUOGO ALLE STESSLE COORDINATE CROMATICHE



Primo spettro metamerico (curva magenta) con illuminante D65



Secondo spettro metamerico (curva magenta) con illuminante D65

La natura ed in particolare l'evoluzione darwiniana, si muove sempre lungo percorsi "economici", cioè con minimo dispendio di risorse, e tutto quello che è superfluo o non si sviluppa o si atrofizza. Non tutte le specie vedono la luce attraverso tre canali di colore come noi. Le specie che vivono nelle profondità del mare, ad esempio, hanno sviluppato un unico canale di colore sensibile allo spettro della luce blu verdognola, che è l'unica che filtra fino alle alte profondità dove queste specie vivono. Ai fini dell'adattamento all'ambiente e della sopravvivenza, nel caso dell'uomo e dei primati, tre canali di colore sono la soluzione migliore. In realtà quello che sembra un limite (impossibilità di distinguere due spettri che abbiano stessa colorimetria) diventa un vantaggio perché è solo grazie a questo fenomeno che possiamo recepire, ad esempio da un monitor video, una grande varietà di colori che in realtà sono prodotti come combinazione di soli tre colori primari (rosso, verde e blu) di cui è composto ogni elemento del monitor stesso. La stessa cosa succede nella stampa, dove con soli tre colori (ciano, magenta e giallo, con il nero che serve solo per migliorare il contrasto) siamo in grado di fornire all'occhio lo stimolo equivalente ad una ampia gamma di colori diversi.

SENSIBILITÀ ALLO SPETTRO DEL SENSORE NIKON D610



Curve di sensibilità delle fotocamere e diagrammi di cromaticità nello spazio r, g

Dunque siamo arrivati al punto di capire che un qualsiasi colore in natura (spettro continuo) viene trasformato dall'occhio in una terna di stimoli nervosi, dalla colorimetria in una terna XYZ e da una fotocamera in una terna RGB. Esistono colori che l'occhio o una fotocamera non possono vedere? No! Nella misura in cui una radiazione cade nell'intervallo della luce visibile, questa può essere vista sia dall'occhio che da una fotocamera, qualunque sia il suo contenuto spettrale. Ma allora qualsiasi sistema è equivalente ad un altro? Di nuovo no! Le differenze consistono nella capacità di distinguere uno spettro da un altro, cioè nel rendere due terne numeriche diverse. Esistono allora delle curve di sensibilità ideali che permettono la massima differenziazione tra spettri, pur riconducendoli sempre a tre numeri? La risposta è sì!

CURVE DI SENSIBILITÀ IDEALI

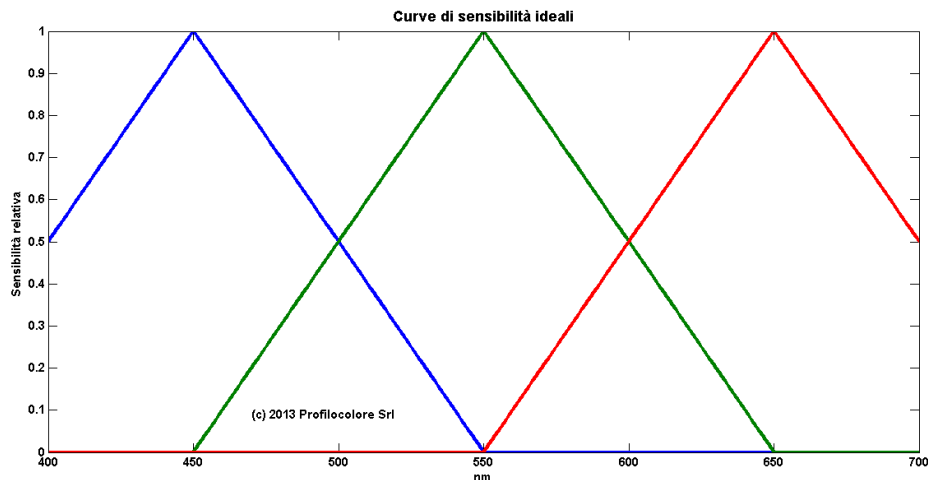
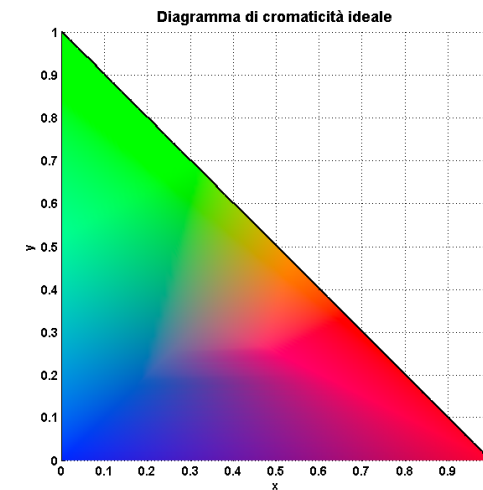


DIAGRAMMA DI CROMATICITÀ IDEALE



Curve di questa forma darebbero luogo ad un diagramma di cromaticità con estensione massima, cioè pari all'intero triangolo equilatero (in 3 dimensioni) all'interno del quale è contenuto il diagramma di cromaticità xyz. Proiettato sul piano xy, il diagramma di cromaticità si presenterebbe come rappresentato nella figura "Diagramma cromaticità ideale". A questo punto diventa interessante tracciare il diagramma di cromaticità specifico per ogni fotocamera (ma con coordinate rgb specifiche della fotocamera e non xyz cromatiche della colorimetria). Questo ci darà una idea della capacità della fotocamera di discernere gli spettri dei diversi colori. In fase di riproduzione può essere che il sistema di riproduzione delle immagini (monitor, video proiettore o stampa di qualsiasi genere) non sia in grado di rappresentare distintamente i colori registrati dalla fotocamera, ma questo diventa un problema di riproduzione, dove ormai la fotocamera non ha più ruolo.

Partendo dalle curve di sensibilità delle fotocamere, mostrate in precedenza, e simulando uno stimolo monocromatico di lunghezza d'onda variabile tra il rosso ed il blu, è possibile tracciare per ogni modello di fotocamera il proprio diagramma di cromaticità in coordinate rg, dove:

$$r = R/(R+G+B)$$

$$g = G/(R+G+B)$$

$$b = B/(R+G+B)$$

Diagramma di cromaticità rg Nikon D4

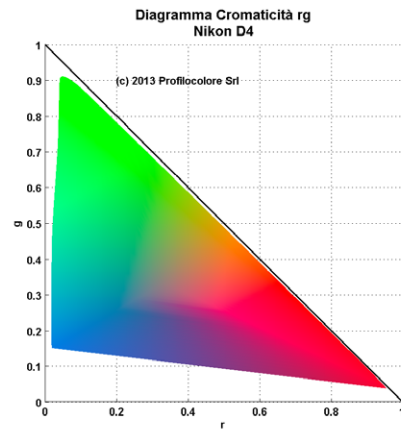


Diagramma di cromaticità rg Nikon D610

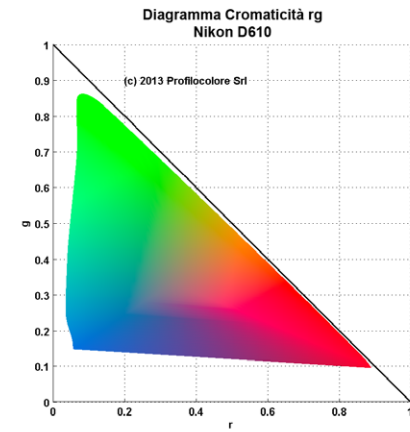


Diagramma di cromaticità rg Nikon D800

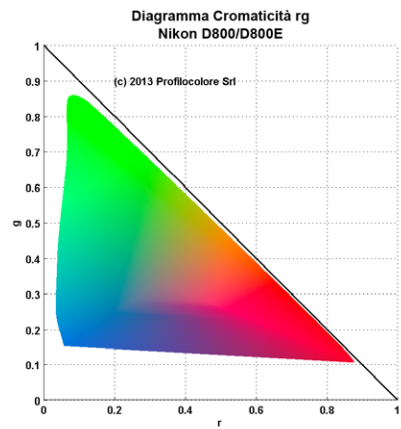


Diagramma di cromaticità rg Nikon D7100

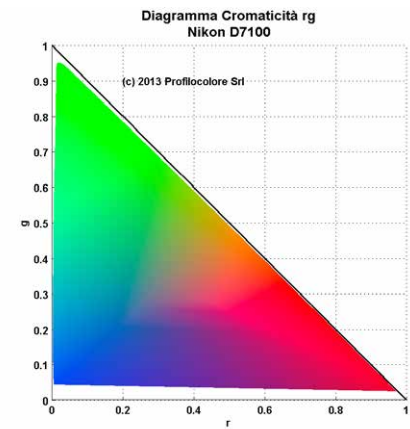


Diagramma di cromaticità rg Nikon D600

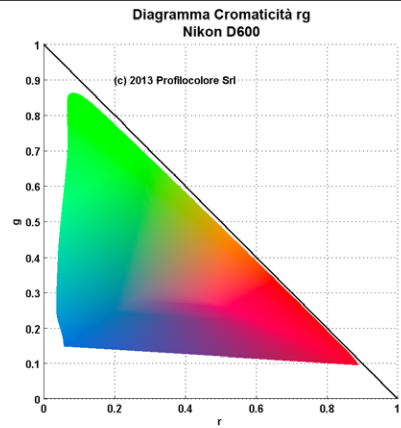


Diagramma di cromaticità rg Nikon D5200

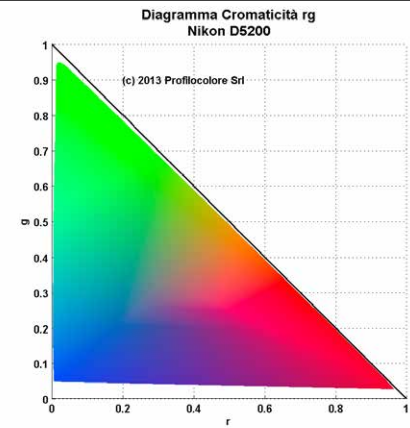


Diagramma di cromaticità rg Nikon D5300

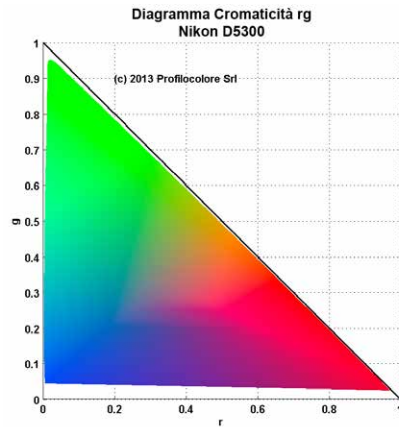


Diagramma di cromaticità rg Nikon D3200

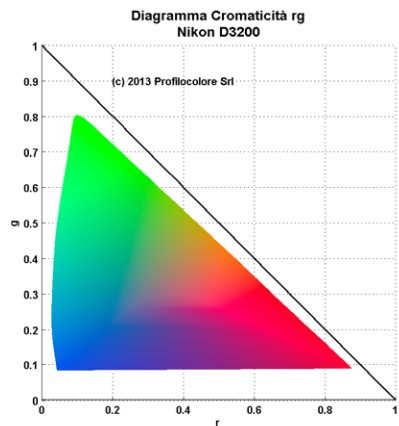
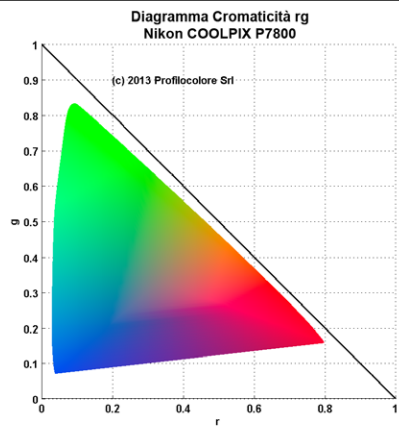


Diagramma di cromaticità rg Nikon P7800



Come appare evidente l'estensione dei diagrammi di cromaticità nel piano rg tende verso la forma ideale a triangolo, e questo è indice di elevata capacità di discriminazione dei colori. Questi diagrammi sono derivati dalle curve di sensibilità calcolate in laboratorio, che a loro volta sono calcolate considerando la risposta media del sensore nella parte centrale. In questo modo si sta valutando la risposta della media centrale del sensore senza tenere conto di altri fenomeni come il rumore termico o la variabilità di guadagno del singolo pixel. Per questo motivo, ad esempio, questo grafico non tiene in considerazione altri parametri di bontà della fotocamera, come la rumorosità del sensore. Non c'è quindi da stupirsi se in questi grafici "modelli inferiori" mostrano caratteristiche superiori a modelli più blasonati.

Da RGB ad XYZ: profili di colore. Misura della qualità del colore

Da quanto scritto sino ad ora una cosa appare evidente: una fotocamera, qualsiasi fotocamera, registrando un colore non assegnerà mai a quel colore le giuste coordinate XYZ, bensì una terna di valori RGB che dipenderanno strettamente dalle curve di sensibilità specifiche di quella fotocamera. Come facciamo quindi ad ottenere da una fotografia (in RGB) una immagine con i colori giusti (XYZ o loro derivazioni)? Per fare questo è necessario associare alla immagine della fotocamera e quindi ai valori RGB dei suoi pixel un così detto profilo di colore, cioè un sistema che "traduca" i valori RGB in una terna colorimetrica X'Y'Z' la più simile possibile a quella XYZ ideale derivata dalle CMF applicate allo stesso colore.

Prendiamo ad esempio la riga dei colori primari sul Color Checker a 24 colori.

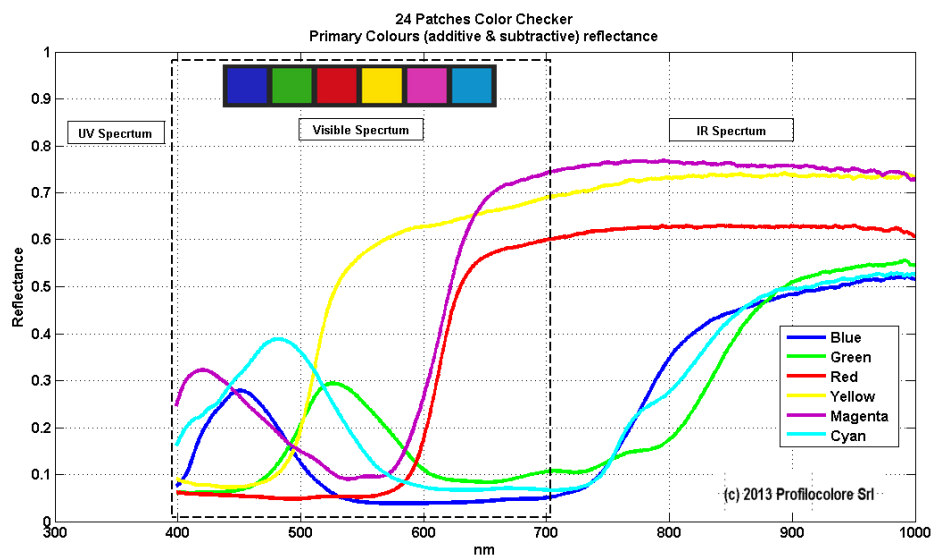


La riga dei colori primari in questo caso ad acronimo invertito BGR sul Color Checker a 24 colori corrispondono ai numeri 03, 07 e 11 mentre 15, 19 e 23 rappresentano i complementari giallo, magenta e ciano.

Scala colori x-rite
Color Checker



Colori primari e spettri



Riflettanze spettrali delle tacche 3, 7 e 11 (RGB) e 15, 19 e 23 (CMY) del Color Checker

Gli spettri riflessi dalle tacche di colore che raggiungeranno la fotocamera non saranno esattamente quelli sopra tracciati (riflettanza spettrale) ma la loro combinazione con lo spettro dell'illuminante. Affinché la fotocamera assegni ai colori terne numeriche indipendenti il più possibile dalla illuminazione è necessario impostare correttamente il bilanciamento del bianco, possibilmente eseguendo una misura del bianco "preset" tramite apposito cartoncino neutro per "white balance".

MISURAZIONE DEL BILANCIAMENTO DEL BIANCO "PRE"
IN UNA DELLE QUATTRO MEMORIE DISPONIBILI SU D600/610



L'HELP IN LINEA CHE, PREMENDO IL PULSANTE "?",
OFFRE LA DESCRIZIONE DELLA SPECIFICA FUNZIONE SELEZIONATA



Riassumendo quindi, il viaggio della luce e del colore passa per queste tappe fondamentali dove abbiamo:

- un illuminante con il suo spettro (sorgente di luce) che colpisce una superficie
- una superficie con una sua riflettanza caratteristica
- la radiazione emergente dalla superficie che contiene lo spettro della luce incidente modificato secondo la riflettanza della superficie stessa
- il sensore della fotocamera (formato RAW) che pesa lo spettro della radiazione emergente, secondo le proprie curve di sensibilità e lo traduce in valori RGB

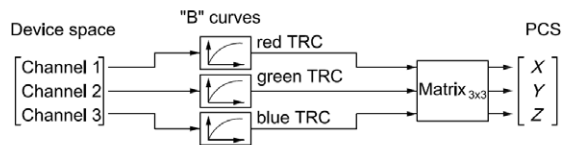
il bilanciamento del bianco che storna dall'RGB letto l'RGB della luce incidente (precedentemente misurato con la procedura di misura del bilanciamento del bianco – "PRE")

applicazione del profilo di colore (precedentemente misurato tramite procedura di caratterizzazione della fotocamera) e traduzione delle terne RGB in terne colorimetriche X'Y'Z' (o in alternativa Lab, altro spazio colorimetrico equivalente ad XYZ, ma con valori percettivamente coerenti)

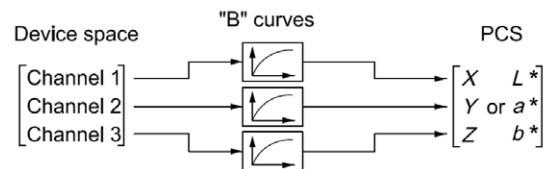
Tutto questo è stato oggetto di standardizzazione da parte di un consorzio internazionale, l'International Color Consortium ICC. Questo organismo quindi mantiene e pubblica un documento di specifiche che regola le modalità attraverso cui codificare il profilo di colore, sia embedded nel file di immagine sia come file separato con estensione ".icc". Questo documento è oggi alla versione V4. Nel documento sono indicati gli schemi a blocchi per le trasformazioni matematiche da applicare ai canali del dispositivo di acquisizione per arrivare alle coordinate di uno spazio colorimetrico comune (Profile Connection Space - PCS).



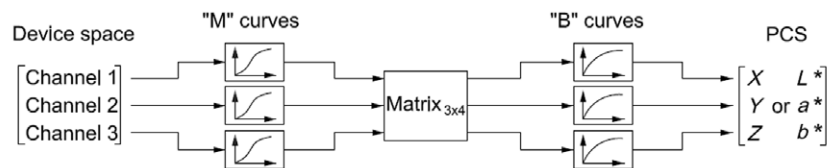
CONVERSIONE DA DISPOSITIVO DI INPUT A SPAZIO DI COLORE SECONDO LO STANDARD ICC



a) Using a matrix/TRC model



b) Using a lutAToBType model



c) Using a lutBToAType model

Esistono diversi software che permettono di calcolare il profilo di colore (o caratterizzazione) di un dispositivo di input. [Profilocolore](#) ha sviluppato un software proprietario con due moduli.

- Il primo modulo implementa il calcolo e la rappresentazione del profilo secondo le specifiche ICC, cioè una combinazione lineare (matrice 3x3) di Look Up Table (3 curve tonali).
- Il secondo modulo aggiunge un ulteriore stadio di calcolo con altre 9 curve tonali ed un'altra matrice 3x3.

Il secondo modulo va oltre lo standard ICC (per questo non lo abbiamo inserito in questa pubblicazione) ed apporta un ulteriore e fondamentale beneficio nella caratterizzazione della fotocamera. I risultati di precisione in questo articolo si riferiscono alla applicazione del solo primo modulo; l'applicazione anche del secondo rende i DeltaE residui tali da non distinguere ad occhio i colori originali da quelli ottenuti dalla fotocamera.

Una indicazione obiettiva della bontà della riproduzione del colore è quindi quella di confrontare le terne XYZ vere di un insieme di colori con le terne X'Y'Z' ottenute da una fotocamera dopo avere applicato tutti i parametri del profilo di colore, calcolati nel miglior modo possibile nel rispetto dello standard ICC.

Questo può essere fatto in due modi. Il primo consiste nel fotografare un Color Checker standard a 24 tacche del quale siano disponibili le misure colorimetriche (come ad esempio si possono trovare sul sito della Babel Color di Danny Pascale per il Color Checker Gretag). Il secondo, quello seguito da noi, consiste nell'espore la fotocamera ad una luce di cui sia perfettamente noto lo spettro, calcolare dallo spettro e dalle CMF le XYZ, e confrontarle con quelle ottenute dalla fotocamera dopo l'applicazione del profilo di colore secondo gli standard. Noi abbiamo scelto questa seconda modalità di misura sulla base di due considerazioni.

Tutti i colori del Color Checker a 24 tacche sono compresi in una area del diagramma di cromaticità abbastanza limitata (corrispondente ad uno spazio di colore sRGB) quindi poco significativi ai fini del test, mentre gli stimoli luminosi che abbiamo utilizzato sono tutti prossimi alla periferia del diagramma quindi a saturazione molto elevata, creando una situazione di test molto più critica per la fotocamera;

L'uso di un monocromatore, una sfera di integrazione di luce, attraverso la quale è possibile fornire una illuminazione assolutamente uniforme e calibrata, ed uno spettroradiometro con precisione tracciabile rispetto ad istituti metrologici internazionali, ci ha permesso di raggiungere precisioni estremamente elevate e di esplorare il comportamento delle fotocamere in zone estreme del diagramma di cromaticità.

Scala colori x-rite Color Checker 24



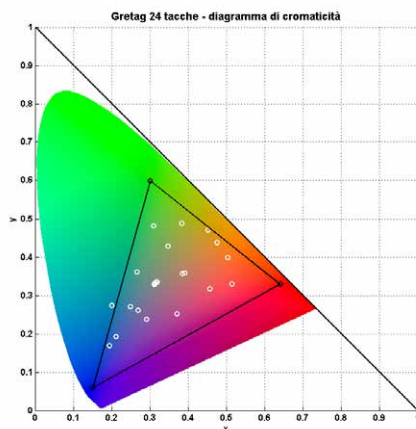
Ogni fotocamera è stata quindi esposta ad 8 stimoli luminosi. Nel test di ogni fotocamera mostriamo quindi per ogni stimolo

La posizione esatta sul diagramma di cromaticità (XYZ/xyz vere)

La posizione in base alle X'Y'Z'/x'y'z' ottenute dall'RGB della fotocamera più profilo di colore specifico

Tacca di colore in sRGB da XYZ e tacca di colore in sRGB da X'Y'Z' con DeltaE2000 per rendere una idea visiva della fedeltà di colore (nei limiti cromatici dei monitor di riproduzione)

Diagramma di cromaticità del Color Checker 24 tacche



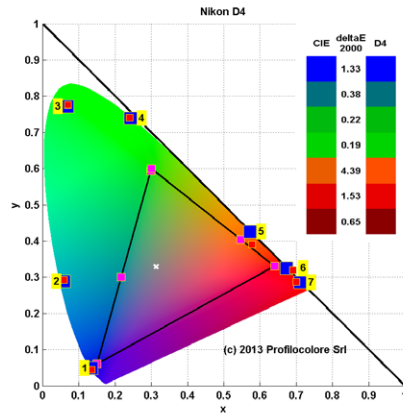
Va sottolineato che le differenze di colore percepibili ad occhio non sono quelle tra il colore originale e quello restituito dalla fotocamera profilata, le cui coordinate cromatiche uscirebbero dal Gamut di qualsiasi monitor o sistema di stampa, data la loro ampiezza, bensì dalla loro conversione nello spazio sRGB attraverso un intento di rendering colorimetrico relativo.

Gli esatti scostamenti tra coordinate CIE (XYZ / xyz) degli stimoli luminosi forniti alle fotocamere (misurati nel nostro laboratorio in sfera di integrazione di luce con spettroradiometro [Instrument System CAS 140CT](#) e corrispondenti coordinate CIE (X'Y'Z' / x'y'z') restituite da fotocamera dopo profilazione standard ICC, sono state riportati per ogni fotocamera nei diagrammi di cromaticità CIE '31 2° che seguono. Il centro dei quadratini blu indica le coordinate vere, il centro dei quadratini rossi indica le coordinate ottenute dalla fotocamera profilata, i numeri su fondo giallo indicano la progressione dei colori di test, il centro dei quadratini magenta corrisponde alla conversione in spazio sRGB (triangolo nero) dei colori originali. La x bianca indica le coordinate cromatiche del bianco D65 caratteristico dello spazio sRGB.

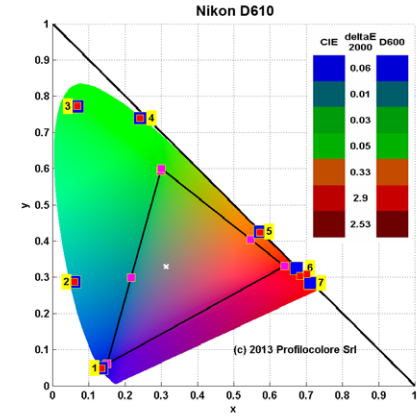
Nella tabella di colori in alto a destra sono riportati i colori di test (in ordine dall'alto in basso) convertiti in sRGB (per renderli compatibili con i sistemi di visione comuni come i monitor). I colori di sinistra sono quelli originali ed i colori di destra sono quelli restituiti dalla fotocamera profilata. La colonna centrale indica la misura della differenza di colore secondo l'algoritmo DeltaE2000 basato sulle coordinate percettive Lab delle equivalenti XYZ.

Coordinate cromatiche xy del Color Checker 24 a confronto con lo spazio di colore sRGB (triangolo nero all'interno del diagramma di cromaticità). Dalla figura del diagramma di cromaticità del target Gretag a 24 tacche si evince come i colori di riferimento rispetto ai quali si calcola normalmente il profilo di colore di una fotocamera siano tutti compresi in una dinamica cromatica abbastanza limitata. Questo vuol dire che per colori molto saturi (lontani dal bianco intorno a 0,33-0,33) prossimi al confine esterno del diagramma, il profilo lavora per estrapolazione rispetto ai dati sui quali è stato calcolato, con l'introduzione di inevitabili approssimazioni. In questo lavoro frutto della pubblicazione eXperience abbiamo quindi seguito una strada diversa e più precisa.

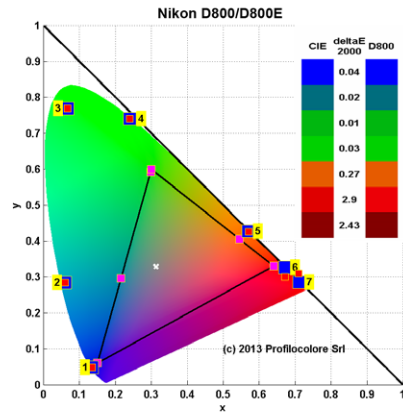
Comparazione
CIE/Nikon D4



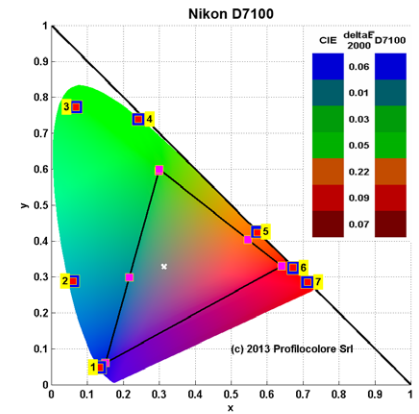
Comparazione
CIE/Nikon D610



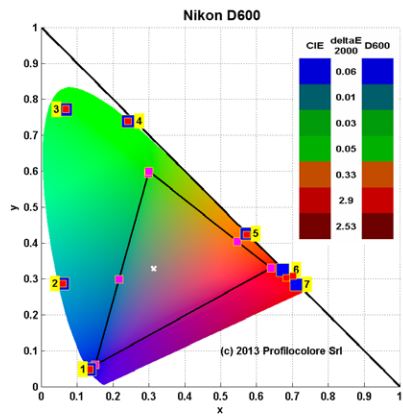
Comparazione
CIE/Nikon D800
D800E



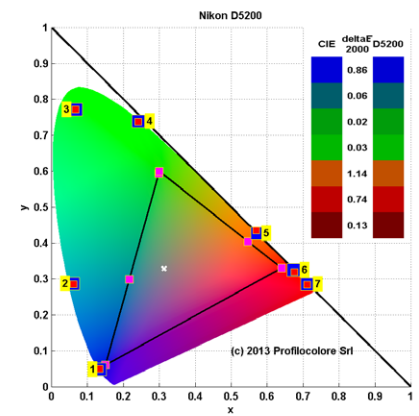
Comparazione
CIE/Nikon D7100



Comparazione
CIE/Nikon D600



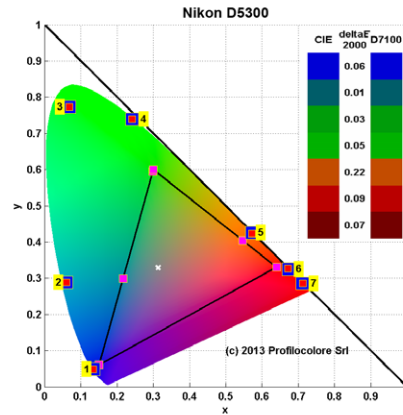
Comparazione
CIE/Nikon D5200



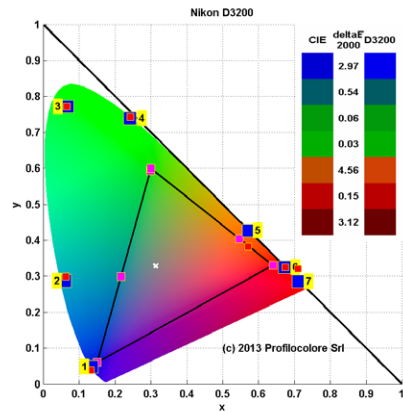
Confronto risultati e misurazioni Profilocore con quelle DxO Mark

È interessante confrontare questi risultati con quanto [pubblicato dal sito DxO Mark](#). La tabella di seguito ottenuta con filtro sui soli prodotti Nikon, è ordinata secondo la misura DxO Mark della qualità colore delle fotocamere “Color Depth” mentre il punteggio globale del sensore si trova nella colonna “Overall Score”. La posizione in classifica è quella ottenuta rispetto a tutte le fotocamere sul mercato mondiale, incluse quelle di medio formato da decine di migliaia di euro. Impressionante scoprire come i modelli reflex trattati in questa pubblicazione eXperience, pur includendo le entry level, rientrano nelle prime 20 posizioni su un totale, ad oggi, di 233 fotocamere testate da DxO. Questo è in accordo alle nostre misure dalle quali emerge che comunque anche la “piccola” [COOLPIX P7800](#) tiene egregiamente il passo con le sorelle reflex riguardo la qualità colore.

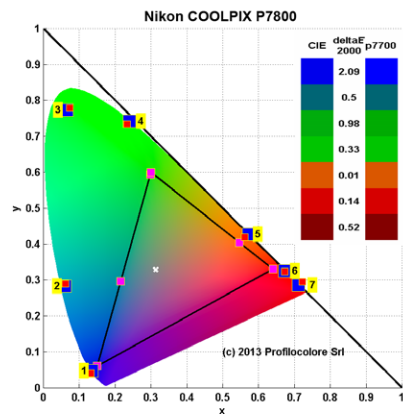
Comparazione
CIE/Nikon D5300



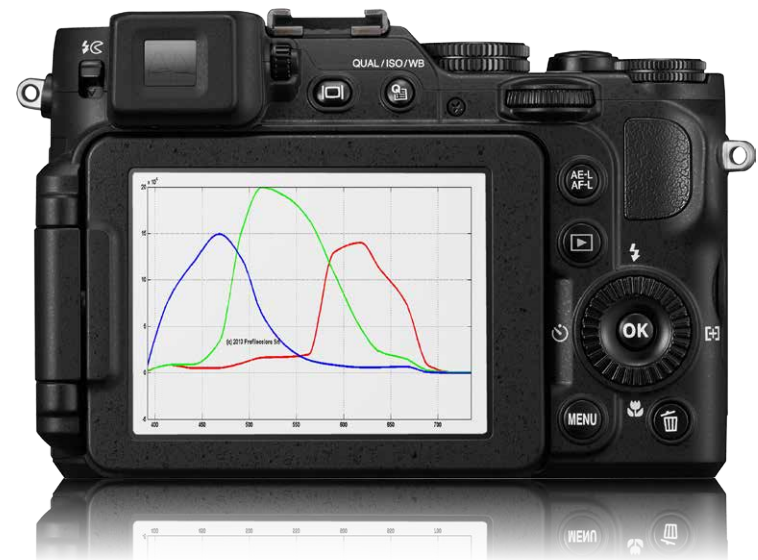
Comparazione
CIE/Nikon D3200
















































Comparazione
CIE/Nikon P7800



SENSIBILITÀ ALLO SPETTRO NIKON COOLPIX P7800



GRADUATORIA RISPETTO ALLE PRESTAZIONI COLORE DELLE FOTOCAMERE NIKON ESAMINATE SECONDO DXO MARK

Image	Model	Mpix	Sensor Format	Overall Score	Portrait (Color Depth) (Bits)	Landscape (Dynamic Range) (EVs)	Sports (Low-Light ISO)
	Nikon D800E	36	Full format	96  1	25.6  3	14.3  3	2979  3
	Nikon D800	36	Full format	95  2	25.3  4	14.4  1	2853  6
	Nikon D600	24	Full format	94  3	25.1  6	14.2  5	2980  2
	Nikon D610	24	Full format	94  4	25.1  8	14.4  2	2925  5
	Nikon D3X	24	Full format	88  11	24.7  11	13.7  14	1992  14
	Nikon D4	16	Full format	89  8	24.7  13	13.1  28	2965  4
	Nikon D7100	24	APS-C	83  15	24.2  17	13.7  13	1256  27
	Nikon D5200	24	APS-C	84  14	24.2  19	13.9  11	1284  25
	Nikon D3200	24	APS-C	81  23	24.1  20	13.2  24	1131  36

Conclusioni

Da un certo punto di vista i grafici ed i numeri parlano da se, ma vale la pena commentare e sottolineare alcuni dati.

La differenza di forme tra il diagramma di cromaticità xy CIE '31 2° (osservatore standard con angolo di vista a 2°) ed i diagrammi di cromaticità rb delle singole fotocamere, fa capire immediatamente quanto possa essere diversa la rappresentazione RGB nativa di una fotocamera dalla rappresentazione CIE XYZ dello stesso colore, e quindi quanto sia importante e fondamentale che le immagini RGB della fotocamera siano dotate di un profilo di colore.

Ma la stessa differenza di forme tra diagramma di cromaticità xy e diagrammi rg ci dice anche un'altra cosa, e cioè che tutte le fotocamere esaminate, per la maggior parte del proprio diagramma, mostrano una "distanza" tra colori (spettri pesati con i tre canali RGB) maggiore di quella fornita dal diagramma xy con gli spettri pesati con le CMF. Questo si traduce in un miglioramento del fenomeno del metamerismo ed una misura differenziale tra colori migliore di quanto possa fornire la colorimetria standard.

Come già sottolineato, ma vale la pena ripeterlo, non ci sono colori (spettri) che un sistema di acquisizione non riesca a vedere, nella misura in cui gli spettri ricadono nella banda della luce visibile. Un dispositivo di input non ha un gamut, cioè non ha una zona limitata di funzionamento oltre la quale i colori non sono percepiti. Il concetto di gamut è tipico dei dispositivi di riproduzione, ed infatti ne segna, sul diagramma di cromaticità, la saturazione limite oltre la quale il sistema non è in grado di produrre colore.

L'introduzione dell'imaging digitale in fotografia ha permesso finalmente di tenere completamente sotto controllo tutta la catena di colore, a partire dalla acquisizione fino alla riproduzione finale, sia che essa avvenga su un monitor che essa sia su carta. Purtroppo la cultura del Color Management stenta ancora a farsi strada anche nel mondo professionale, ed ancora, troppo spesso, si lavora ad occhio. Nulla di più nocivo e sbagliato per la qualità finale. Tutti gli addetti ai lavori dovrebbero fare un piccolo sforzo per imparare le nozioni essenziali della colorimetria ed adottare nella pratica quotidiana quei pochi ma essenziali accorgimenti che farebbero risparmiare moltissime rilavorazioni delle immagini.

Nel mondo della fotografia girano infinite legende metropolitane riguardo marche e modelli di fotocamere che "tenderebbero più a questo o a quel colore" e che quindi sarebbero più adatte ad un lavoro piuttosto che ad un altro. Sono dicerie o sono frutto di una analisi accurata? Sono il risultato di qualche scatto fatto senza badare troppo alla profilazione della fotocamera, o quello di una analisi comparativa rigorosa? Questo è il pericolo, anche per temi diversi dal colore, del tam-tam che spesso si propaga, soprattutto in rete nei forum, e che molte volte ha davvero poco fondamento scientifico. Manteniamo sempre vigile il nostro senso critico, ed il nostro buon senso.

Riproduzione fedele di opere d'arte

C'è un campo della fotografia dove più che mai il controllo del colore assume una importanza enorme, ed è quello della riproduzione delle opere d'arte, in particolare dipinti ed affreschi.

Riportiamo di seguito tra le numerose eseguite da Profilocolore la riproduzione della "Madonna con Bambino" di Giovanni Cima detto Cima da Conegliano. La ripresa è stata eseguita con una [Nikon D800](#) nell'ambito di una analisi multispettrale non invasiva condotta nelle bande dagli UV agli IR. L'immagine che pubblichiamo è frutto di una ripresa con coppia di lampeggiatori flash [Nikon SB-910](#) posti a 45° rispetto all'asse, preceduta dalla ripresa, nelle stesse identiche condizioni, di un target multicolore sviluppato da [Profilocolore](#) utilizzato per il calcolo del profilo di colore da applicare allo scatto RAW/NEF convertito in RGB con la demosaicizzazione.



Madonna con Bambino –
Pinacoteca Nazionale di Bologna.
Olio su tavola (60,5x47,2 cm)
databile 1495.
Autore: Cima da Conegliano,
soprannome di Giovanni Battista
Cima (Conegliano, 1459/1460 –
Conegliano, 1517/1518), pittore
italiano, esponente della scuola
veneta del XV secolo.

Una versione in alta risoluzione, frutto di più scatti ricomposti e geometricamente corretti, è [visibile a questo link](#).

Tra i vari dettagli che potranno essere apprezzati nella versione in alta risoluzione, si scoprirà come i punti neri visibili chiaramente nel cielo non sono artefatti dovuti al sensore, bensì buchi di tarli. Il dipinto infatti è su tavola lignea.

Chi volesse verificare la fedeltà del colore è invitato a visitare la Pinacoteca Nazionale di Bologna (che ringraziamo per la disponibilità all'utilizzo scientifico e divulgativo senza fini di lucro di questa immagine) dove è conservato ed esposto l'originale. Ma attenzione: prima di confrontare i colori siate sicuri di avere il monitor del vostro computer ben calibrato.

Bibliografia

- Misurare il colore: del Prof. Claudio Oleari, Edizioni Hoepli
- Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras: di Junichi Nakamura, CRC Taylor & Francis.

Link correlati

- **Siti citati:**

www.cie.co.at

www.color.org

www.fis.unipr.it

www.dxomark.com

www.babelcolor.com

www.profilocolore.com

Link correlati

- **eXperience correlati:**

[Dagli Spettri di Luce al Tristimolo](#)

[Geometrie ottiche e profondità di campo nelle fotocamere reflex digitali](#)

[Impiego di Spazi Colore estesi in Nikon ViewNX, Capture NX2 e stampa Inkjet](#)

[Fluorescenza visibile indotta da radiazione ultravioletta fotografata con Nikon DSLR](#)

[Profili DSLR per gestioni RAW/NEF: profili di sviluppo Nikon e creazione di profili personalizzati per Adobe Camera RAW](#)

[Nikon Picture Control: l'immagine su misura anche a luminosità negativa](#)

[Produrre foto di qualità per la stampa tipografica](#)

[Jumbo MultiBigShoot per obiettivi PC-E Nikkor: ottenere un sensore medio formato con Nikon DSLR](#)

[Gestione colore e Nikon Capture NX 2](#)

[Garantire la coerenza dei colori delle stampe](#)

[Intervista a Marcello Melis di Dino del Vescovo](#)