



Facultat de Ciències.
Departament d'Informàtica

ESTUDI DEL COMPORTAMENT DE COMPONENTS
CROMÀTICS. APORTACIÓ A LA CORRECCIÓ DELS ERRORS
PROVOCATS PER LA SATURACIÓ DELS CCDs

Memòria presentada per Jordi Regincós i Isern
a la Universitat Autònoma de Barcelona amb la
finalitat d'obtenir el grau de **doctor en Ciències**
(Informàtica)

Director: Joan Batlle i Grabulosa

Bellaterra, novembre de 1996.

Capítol 5

Proposta de correcció del color

Tal i com s'ha explicat en el capítol anterior, la saturació d'algun dels tres components RGB en un sensor CCD provoca una distorsió en la informació cromàtica del píxel afectat. En aquest capítol es presenta un mètode per eliminar aquesta distorsió, corregint així la informació cromàtica. Aquest mètode pot ser aplicat, tal i com s'exposa al final del capítol, a molts dels components cromàtics que han estat utilitzats en diferents treballs de visió per computador. Es treballa en dues etapes: una primera de caracterització dels colors amb els que es vol treballar i una segona, en temps real, de correcció del color.

5.1 Introducció

Al capítol precedent s'ha vist que la variació del color en funció de la intensitat de l'illuminant descriu una recta a l'espai RGB (vegeu per exemple la figura 4.28), i això és cert sempre que a la resposta de la càmera no se li hagi aplicat la correcció gamma.

Ara bé, les càmeres, com a dispositius físics que són, tenen un màxim en la seva resposta que no pot ser superat. Així, la resposta d'una càmera en color sempre estarà dins d'un cub a l'espai RGB definit pels punts $(0, 0, 0)$ i $(R_{max}, G_{max}, B_{max})$. D'ara en endavant, si no es diu el contrari, s'entendrà que $(R_{max}, G_{max}, B_{max}) = (1, 1, 1)$ i, per tant, tots els valors estaran dins d'un cub la diagonal del qual és $(0, 0, 0)$, $(1, 1, 1)$. Quan per una certa intensitat el valor per algun dels components hauria d'agafar un valor superior a 1, aquest valor queda retallat a 1 i es diu que el color ha estat retallat. Aquest fenomen està il·lustrat a la figura 5.1 i ha estat descrit, entre altres autors, per Novak et al. [NS90].

La figura 5.1.a mostra la resposta teòrica de cada un dels tres components de la càmera

en funció de la intensitat de l'il·luminant quan s'adquireix una seqüència d'imatges d'una superfície plana i de color uniforme (taronja en aquest cas). Les línies gruixudes corresponen a la resposta de la càmera per cada component: entre 400 i 600 luxs només el component vermell conté informació; entre 600 i 800 luxs contenen informació els components vermell i verd. Entre 800 i 1675 tots tres components aporten informació cromàtica (aquest és l'interval d'intensitats en el que el to és constant). A partir de 1675 luxs, el component vermell ja està saturat; a partir de 3150 luxs ho està el component verd i, finalment, a partir de 5050 luxs ho estan tots tres (tenim el color blanc).

La figura 5.1.b mostra, sobre l'espai RGB , el comportament de la mateixa resposta. Els números corresponen als mateixos luxs que estan representats a la figura 5.1.a.

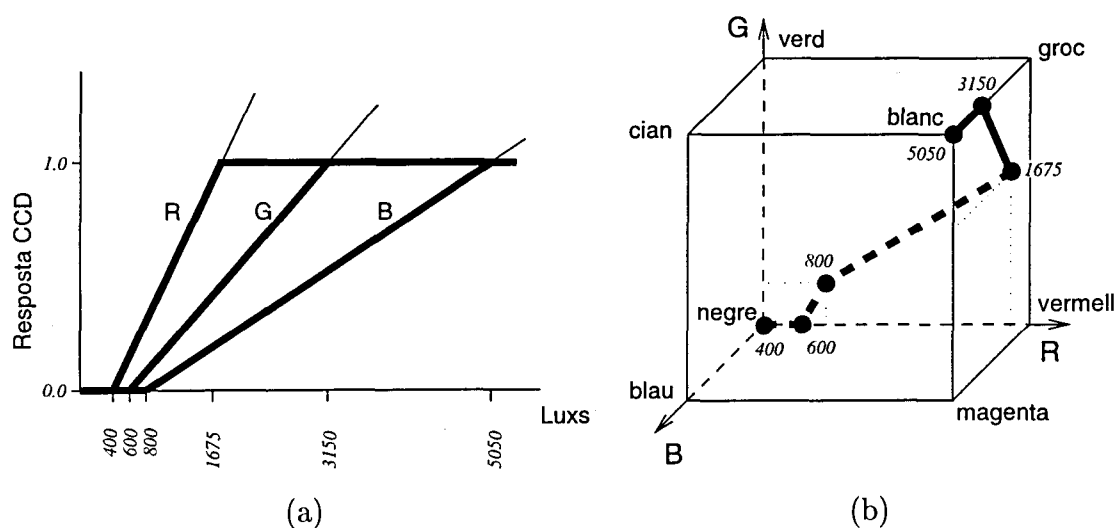


Figura 5.1: Efecte del retall del color: variació dels tres components respecte la intensitat (a) i la mateixa variació representada sobre l'espai RGB (b).

Molts autors han proposat la utilització de l'espai HSI o algun altre espai basat en atributs perceptuals del color (com són el to, la saturació o la intensitat) a l'hora de segmentar imatges en color. Vegeu, per exemple, els treballs de Celenk [Cel90], que utilitza les coordenades cilíndriques $L^*H^{\circ}S^*$ definides sobre l'espai CIELAB, o el treball de Zheng et al. [ZVG93] que utilitzen el model HSI , o bé el treball d'Schettini [Sch93] utilitzant les coordenades cilíndriques $L^*H^{\circ}S^*$ definides sobre l'espai CIELUV. Ara bé, tal i com es mostra a la figura 5.2 el retall del color provoca una variació en els components del to provocant que els algorismes de segmentació basats en l'estabilitat d'aquest davant de canvis en l'il·luminant no funcionin correctament, tal i com ha estat il·lustrat al capítol 4.

Es proposa un mètode per recuperar el color dels píxels basat en el fet que les transfor-

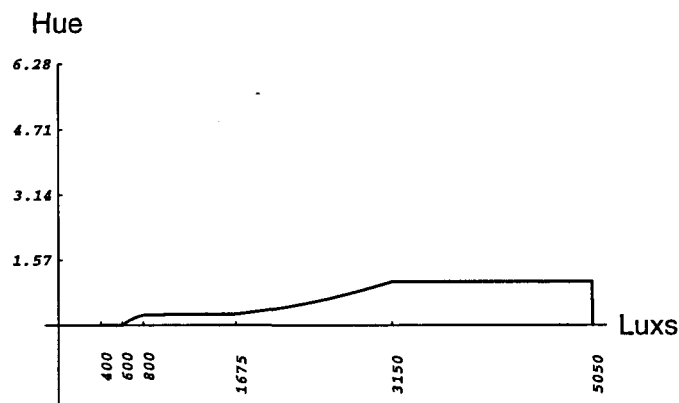


Figura 5.2: Comportament del to en funció de la intensitat de l'illuminant pel mateix color de la figura 5.1.

macions de l'espai RGB a molts components cromàtics tenen la propietat de ser invariants a l'escalat. Sigui $T(R, G, B)$ una transformació des de l'espai RGB a un cert component cromàtic. Direm que T és invariant a l'escalat si $T(R, G, B) = T(\alpha R, \alpha G, \alpha B)$. Tal i com es veu a les taules 5.1, 5.2, i 5.3 que es troben al final d'aquest capítol, les definicions del component de to i la majoria de les definicions de saturació compleixen aquesta propietat.

Aquest mètode funciona per un conjunt de colors predeterminat (que serà diferent per cada problema a resoldre) i ha estat pensat com una operació puntual i, per tant, fàcilment implementable amb hardware utilitzant LUTs, tal i com es comenta en el següent capítol sobre els resultats obtinguts.

5.2 Mètode proposat

El mètode que es presenta tot seguit funciona en dues etapes: la caracterització dels colors i la recuperació de la informació cromàtica.

5.2.1 Caracterització del color

L'objectiu d'aquesta etapa és el de caracteritzar el conjunt d' m colors amb els que es vol treballar $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$. Entenem per caracteritzar el color el fet de trobar, per cada color, la recta que descriu el comportament de la resposta de la càmera per aquest color en funció de la intensitat de l'illuminant. És a dir, l'objectiu de la caracterització és obtenir un conjunt de rectes $R = \{\rho_{c_1}, \rho_{c_2}, \dots, \rho_{c_m}\}$ de forma que la recta ρ_{c_i} caracteritza el color c_i .

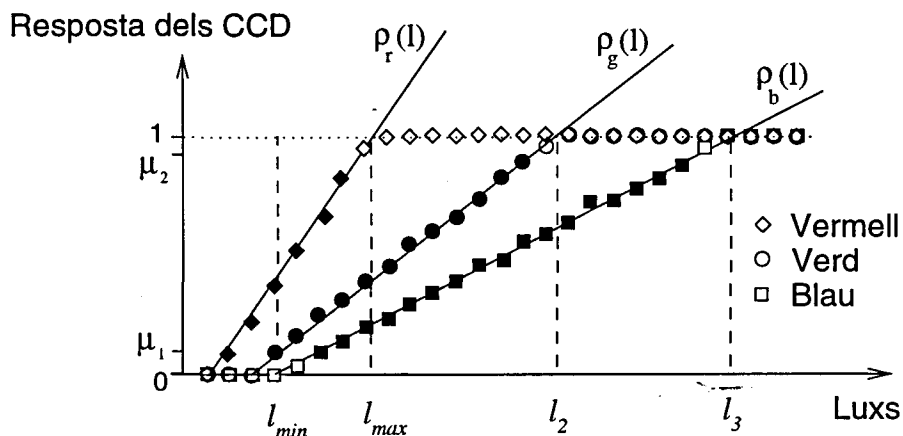


Figura 5.3: Resposta dels tres canals d'una càmera CCD per diferents valors d'intensitat de l'illuminant. Els símbols totalment negres corresponen al comportament linial de cada canal.

Aquesta caracterització es pot portar a terme de dues maneres diferents, depenent de quina de les dues situacions següents es contempli:

1. És possible adquirir una seqüència d'imatges variant la intensitat de l'illuminant i, per cada imatge és possible mesurar aquesta intensitat quan és adquirida.
2. No és possible adquirir una seqüència d'imatges coneixent per cada una d'elles la intensitat de l'illuminant al moment de fer l'adquisició.

5.2.1.1 Caracterització del color amb intensitats mesurables

En aquest cas es pot estimar el comportament de cada component de la càmera en funció de la intensitat de l'illuminant. És a dir, es poden estimar les rectes $\rho_r(l)$, $\rho_g(l)$ i $\rho_b(l)$, essent l la intensitat de l'illuminant. Per fer-ho, caldrà poder adquirir una seqüència d' n imatges de la mateixa superfície anant variant la intensitat de l'illuminant. D'aquest procés s'obté un conjunt d' n parelles $\{(I_1, l_1), (I_2, l_2), \dots, (I_n, l_n)\}$. Cada una d'aquestes parelles correspon a una imatge i la intensitat sota la qual ha estat adquirida aquesta.

Per cada imatge I_k es calcula la mitjana aritmètica de cada component per tal de reduir l'efecte del possible soroll degut al procés d'adquisició. Després d'aquest càlcul s'obtenen els conjunts $P_r = \{(r_1, l_1), (r_2, l_2), \dots, (r_n, l_n)\}$, $P_g = \{(g_1, l_1), (g_2, l_2), \dots, (g_n, l_n)\}$ i $P_b = \{(b_1, l_1), (b_2, l_2), \dots, (b_n, l_n)\}$ que contenen el valor que pren cada component per cada una de les intensitats considerades. La figura 5.3 mostra aquests tres conjunts per un cert color. Pot observar-se l'existència d'un interval de luxs $[l_{min}, l_{max}]$ dins del qual la

variació és lineal pels tres components. En l'interval $[0, l_{min}]$ al menys un canal està a 0 i a partir d' l_{max} al menys un component està saturat.

Es defineixen els subconjunts $P'_r \subseteq P_r$, $P'_g \subseteq P_g$ i $P'_b \subseteq P_b$ com els subconjunts que contenen, per cada component, tots els valors que presenten un comportament lineal. Si es defineix μ_1 com la resposta més petita de la càmera que és considerada significativa i μ_2 com la resposta més gran considerada significativa, els subconjunts P'_r , P'_g i P'_b es poden obtenir com:

$$\begin{aligned} P'_r &= \{(r_i, l_i) \in P_r \text{ t.q. } \mu_1 \leq r_i \leq \mu_2\} \\ P'_g &= \{(g_i, l_i) \in P_g \text{ t.q. } \mu_1 \leq g_i \leq \mu_2\} \\ P'_b &= \{(b_i, l_i) \in P_b \text{ t.q. } \mu_1 \leq b_i \leq \mu_2\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

El proper pas és ajustar cada un d'aquests subconjunts P'_r , P'_g i P'_b amb una recta que minimitzi l'error quadràtic, plantejant els següents sistemes sobredeterminats:

$$\begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 1 & l_2 \\ 1 & l_3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & l_{m_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_r \\ c_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_{m_r} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 1 & l_2 \\ 1 & l_3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & l_{m_g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_g \\ c_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \\ g_{m_g} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ -1 & l_2 \\ 1 & l_3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & l_{m_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_b \\ c_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{m_b} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

on m_r , m_g i m_b corresponen a la cardinalitat dels conjunts P'_r , P'_g i P'_b , respectivament.

Solucionant aquests sistemes s'obtenen les tres rectes expressades a l'equació 5.5. Aquestes tres rectes defineixen la recta $\rho(l) = (\rho_r(l), \rho_g(l), \rho_b(l))$ a l'espai *RGB*.

$$\begin{aligned}
 \rho_r(l) &= c_r l + d_r \\
 \rho_g(l) &= c_g l + d_g \\
 \rho_b(l) &= c_b l + d_b
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Per un cert color c_j , la recta $\rho(l)$ correspon a l'estimació dels valors R, G, B que prendrien els píxels associats a una superfície d'aquest color il·luminada amb una intensitat l si el rang dinàmic de la càmera fos infinit. L'estimació de la resposta d'una càmera real per un píxel x corresponent a una superfície de color C_j i una certa intensitat l ve donada per:

$$C'_{jx} = \begin{bmatrix} r_x \\ g_x \\ b_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \min\{\rho_r(l), 1.0\} \\ \min\{\rho_g(l), 1.0\} \\ \min\{\rho_b(l), 1.0\} \end{bmatrix}
 \tag{5.6}$$

L'equació anterior té en compte l'efecte del retall del color i suposa que per cada component la càmera pot tornar un valor que pertany a l'interval $[0, 1]$ i . Tot i que no té cap sentit físic, l'equació 5.6, tal i com ha estat definida pot retornar valors negatius, en funció dels valors estimats pels paràmetres d_r, d_g i d_b de l'equació 5.5. Per evitar aquest cas anormal, cal redefinir l'equació 5.6 de la següent forma:

$$C'_{jx} = \begin{bmatrix} r_x \\ g_x \\ b_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max\{\min\{\rho_r(l), 1.0\}, 0.0\} \\ \max\{\min\{\rho_g(l), 1.0\}, 0.0\} \\ \max\{\min\{\rho_b(l), 1.0\}, 0.0\} \end{bmatrix}
 \tag{5.7}$$

5.2.1.2 Caracterització del color amb intensitats no mesurables

A la pràctica no sempre serà possible conèixer els conjunts P_r, P_g, P_b definits anteriorment, doncs no es disposarà de superfícies planes sobre les que fer les mesures adients. Això passarà quan interressi caracteritzar el color d'objectes tridimensionals. Si s'adquireix una imatge de l'objecte en qüestió, es disposarà d'un conjunt de punts $P = \{(r_1, g_1, b_1), (r_2, g_2, b_2), \dots (r_n, g_n, b_n)\}$, però no es tindrà cap intensitat mesurada associada a cada un dels (r_k, g_k, b_k) . En aquesta situació hi ha dues possibilitats: fer una estimació de la intensitat corresponent a cada tripleta (r_k, g_k, b_k) per tal de calcular les tres rectes $(\rho_r(l), \rho_g(l), \rho_b(l))$ de la manera que ja s'ha exposat, o bé ajustar directament una recta al núvol de punts obtinguts sobre l'espai RGB .

Estimació de la intensitat Analitzant el component d'intensitat que apareix en els models de la família d'espais de color HSI, $I(R, G, B) = (R + G + B)/3$, a partir de l'equació 5.5 es pot veure que I té una dependència lineal respecte a la intensitat de l'il·luminant l :

$$\begin{aligned}
 I(l) &= I(R(l), G(l), B(l)) = & (5.8) \\
 &= I(\rho_r(l), \rho_g(l), \rho_b(l)) = \\
 &= I(c_r l + d_r, c_g l + d_g, c_b l + d_b) = \\
 &= \frac{(c_r l + d_r) + (c_g l + d_g) + (c_b l + d_b)}{3} = \\
 &= \frac{c_r + c_g + c_b}{3} l + \frac{d_r + d_g + d_b}{3} = \\
 &= cl + d & (5.9)
 \end{aligned}$$

Per tant, el component I pot ser utilitzat com a mesura de la intensitat associada a cada tripleta (r_k, g_k, b_k) . A partir d'aquí es poden obtenir els conjunts P'_r , P'_g i P'_b i, a partir d'ells, estimar la recta ρ tal i com s'ha exposat anteriorment.

Cal fer notar que aquesta substitució del paràmetre l corresponent a la intensitat de l'il·luminant pel component d'intensitat del model HSI només és possible pels casos en els que cap dels tres components està saturat. Si al menys un dels components està saturat, no es pot estimar la intensitat de l'il·luminant.

Estimació de la recta directament sobre l'espai RGB . La figura 5.4 mostra els punts del conjunt P corresponents a un cert color dibuixats sobre l'espai tridimensional RGB . La figura 5.4.a mostra el núvol de punts dins de l'espai tridimensional i la figura 5.4.b mostra les tres projeccions d'aquest núvol de punts sobre els plans $r = 0$, $g = 0$ i $b = 0$.

Tal i com es pot veure a la figura 5.4, hi ha un conjunt de punts $P = \{(r_i, g_i, b_i)\}_{i=1\dots m}$ que estan dins del cub $(0, 0, 0)$, $(1, 1, 1)$ i que segueixen un comportament linial. Sobre aquest conjunt de punts P s'ajusta una recta ρ aplicant un algorisme de minimització de l'error quadràtic. Una recta en un espai tridimensional (l'espai RGB en el cas del color) es defineix a partir de cinc paràmetres:

$$\frac{r - r_0}{c} = \frac{g - g_0}{d} = b - b_0 \quad (5.10)$$

Si s'assumeix que la recta ρ passa pel centre de masses del conjunt de punts P tal i com comenta Horn [Hor86] queden només per estimar els dos paràmetres c i d :

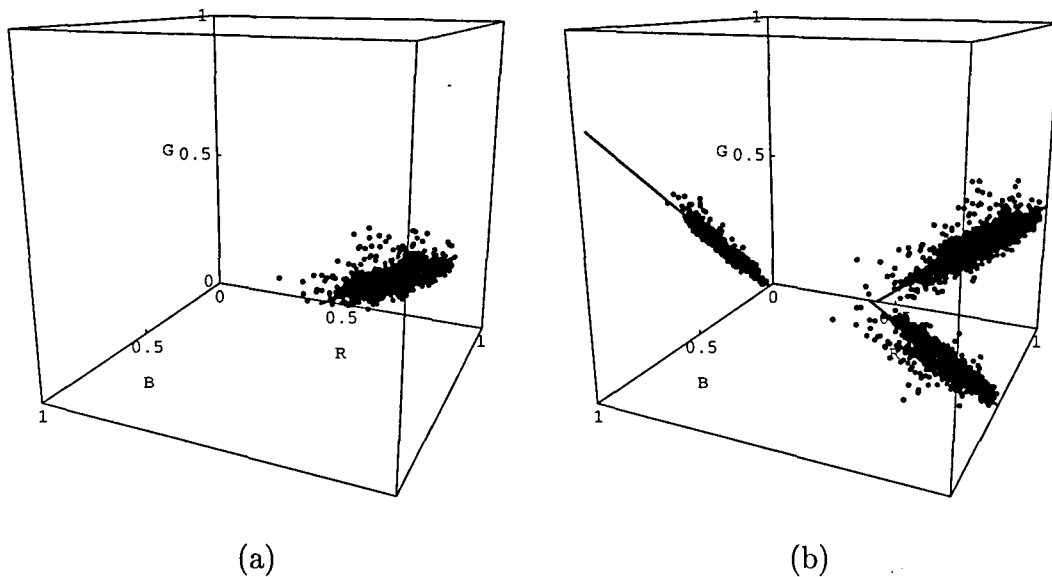


Figura 5.4: Representació del conjunt de punts corresponents a un objecte de color rosat sobre l'espai RGB (a). Projeccions d'aquests punts sobre els plans $r = 0$, $g = 0$ i $b = 0$ (b).

$$\frac{r - \bar{r}}{c} = \frac{g - \bar{g}}{d} = b - \bar{b} \text{ on } \begin{cases} \bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i \\ \bar{g} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i \\ \bar{b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_i \end{cases} \quad (5.11)$$

Per calcular c i d , plantegem el problema en la forma d'un sistema d'equacions $\mathbf{M}\mathbf{b}^T = \mathbf{a}$, on les matrius \mathbf{a} i \mathbf{M} es construeixen a partir dels punts del conjunt P i \mathbf{b} és una matriu formada pels paràmetres a estimar ($1/c, 1/d$):

$$\underbrace{\begin{pmatrix} r_1 - \bar{r} & 0 \\ 0 & g_1 - \bar{g} \\ r_2 - \bar{r} & 0 \\ 0 & g_2 - \bar{g} \\ \vdots & \vdots \\ r_m - \bar{r} & 0 \\ 0 & g_m - \bar{g} \end{pmatrix}}_{\mathbf{M}} \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{c} \\ \frac{1}{d} \end{pmatrix}}_{\mathbf{b}^T} = \underbrace{\begin{pmatrix} b_1 - \bar{b} \\ b_1 - \bar{b} \\ b_2 - \bar{b} \\ b_2 - \bar{b} \\ \vdots \\ b_m - \bar{b} \\ b_m - \bar{b} \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}} \quad (5.12)$$

Aquest és un sistema sobredeterminat, ja que té dues incògnites i $2m$ equacions i, en

general, no tindrà una solució exacte. La solució al sistema serà aquella que minimitzi la diferència $Mb^T - a$. Si en comptes de minimitzar aquesta diferència es minimitza el quadrat de la diferència, $(Mb^T - a)^T(Mb^T - a)$, es pot demostrar que hi ha una única solució que sigui mínima (vegeu, per exemple, el llibre de Xambó (pàgines 342–345) [Xam77]), i que aquesta solució ve donada per l'expressió:

$$b = xA^{-1} \quad (5.13)$$

on $A = M^T M$ i $x = a^T M$, i b es pot obtenir solucionant el següent sistema de Cramer:

$$M^T M b^T = M^T a \quad (5.14)$$

Un cop resolt aquest sistema sobredeterminat, es troben c i d i, per tant, s'obté l'equació en forma paramètrica de la recta que descriu el comportament del color dins de l'espai RGB :

$$\rho(u) = (\rho_r(u), \rho_g(u), \rho_b(u)) = (cu + \bar{r}, du + \bar{g}, u + \bar{b}) \quad (5.15)$$

El fet d'utilitzar la lletra u com a paràmetre és per indicar que aquest no correspon directament a la intensitat. En els apartats següents s'utilitza en la representació paramètrica de les rectes el paràmetre t , que pot ser substituït tant pel paràmetre l com pel paràmetre u .

5.2.2 Recuperació del color

Donat un cert píxel x amb uns valors tristímul $C_x = (r_x, g_x, b_x)$, pot afirmar-se que el color de C_x ha estat retallat si (r_x, g_x, b_x) pertany a algun dels plans $r = 1$, $g = 1$ o $b = 1$; o el que és equivalent: un píxel x serà considerat cromàticament correcte si els seus valors tristímul (r_x, g_x, b_x) són estrictament més petits que 1.

La figura 5.5 mostra la geometria del problema del retallat del color. La resposta d'una càmera ideal amb un rang dinàmic infinit seguiria la línia recta $\rho(t)$. Resulta, però, que les càmeres reals projecten els punts de $\rho(t)$ que cauen fora del cub dibuixat a la figura 5.5 sobre els plans $r = 1$, $g = 1$ o $b = 1$, que formen part de la frontera del cub. Així, entre els punts a i b no hi ha cap component saturat, entre b i c' està saturat el component vermell i, entre els punts c' i d' estan saturats els components vermell i verd.

Per qualsevol valor del paràmetre t , la resposta de la càmera esperada per un píxel x d'un cert color C_j serà:

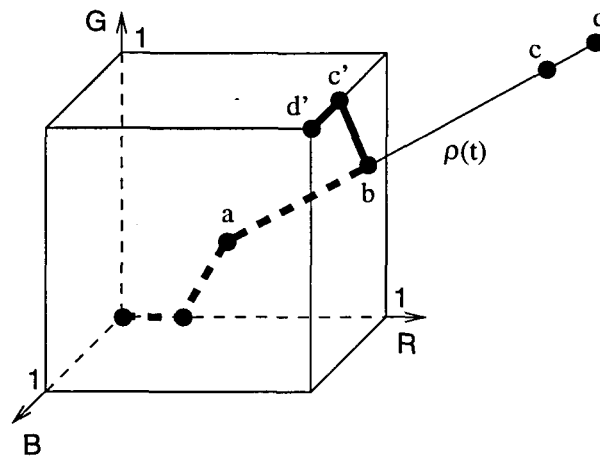


Figura 5.5: Geometria del problema del retall del color.

$$C_{jx} = \begin{bmatrix} r_x \\ g_x \\ b_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_r(t) \\ \rho_g(t) \\ \rho_b(t) \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

5.2.2.1 Correcció del color

Observant l'equació 5.16 es pot veure que per qualsevol valor t_k del paràmetre t es pot trobar un factor d'escalat k tal que multiplicant la recta $\rho(t)$ per k es compleixin les següents condicions:

$$\left. \begin{aligned} k\rho_r(t) &\leq 1.0 \\ k\rho_g(t) &\leq 1.0 \\ k\rho_b(t) &\leq 1.0 \end{aligned} \right\} \forall t \leq t_k \tag{5.17}$$

Per trobar k cal veure quin és el número més petit que fa complir les condicions anteriors. Com que $\rho_r(t)$, $\rho_g(t)$ i $\rho_b(t)$ són funcions creixents, n'hi ha prou de trobar el número més petit que assegurí l'acompliment de les següents condicions:

$$\begin{aligned} k\rho_r(t_k) &\leq 1.0 \\ k\rho_g(t_k) &\leq 1.0 \\ k\rho_b(t_k) &\leq 1.0 \end{aligned} \tag{5.18}$$

És a dir, cal trobar quin és el número més petit que quan és multiplicat pel màxim dels tres valors $\rho_r(t_k)$, $\rho_g(t_k)$ i $\rho_b(t_k)$ dóna com a resultat 1.

$$k = \frac{1.0}{\max\{\rho_r(t_k), \rho_g(t_k), \rho_b(t_k)\}} \quad (5.19)$$

Definició d'un nou interval sense components saturats A partir de l'equació 5.19, l'interval $[t_{min}, t_{max}]$ en el que cap dels tres components està saturat pot ampliar-se a un nou interval $[t_{min}, t_{max2}]$ multiplicant $\rho_r(t)$, $\rho_g(t)$, $\rho_b(t)$ per una determinada constant k ($0 < k < 1$), obtinguda substituint a l'equació 5.19 t_k per t_{max2} . I aquesta ampliació de l'interval es pot fer sense perdre la informació cromàtica dels píxels afectats, ja que com es comenta al final del capítol, molts dels components cromàtics utilitzats tenen la propietat de ser invariants a l'escalat.

Per tal de determinar t_{max2} per cada un dels colors amb els que es treballa s'han considerat dues possibilitats:

1. Es vol corregir el color d'aquells píxels que tenen com a màxim un component saturat. Fent referència a la figura 5.3, es vol corregir el color fins al punt $l = l_2$. És a dir, t_{max2} correspondrà al valor del paràmetre t a partir del qual hi hagin dos canals saturats:

$$t_{max2} = \text{mediana}\{t_{max}^r, t_{max}^g, t_{max}^b\} \quad (5.20)$$

on $\{t_{max}^r, t_{max}^g, t_{max}^b\}$ s'ha calculat de forma que es compleixi que $\rho_r(t_{max}^r) = 1.0$, $\rho_g(t_{max}^g) = 1.0$ i $\rho_b(t_{max}^b) = 1.0$:

$$t_{max}^r = (1.0 - \bar{r})/a \quad t_{max}^g = (1.0 - \bar{g})/b \quad t_{max}^b = (1.0 - \bar{b}) \quad (5.21)$$

El que es pretén, il·lustrat a la figura 5.5, és corregir el color dels píxels que es troben entre els punts b i c' situats sobre la cara del cub que es troba en el pla $r = 1$. El punt b és el punt on queda saturat el component vermell i el punt c és el punt on queda saturat el component verd; c' és una projecció del punt c de la recta $\rho(t)$ sobre l'aresta del cub $r = 1, g = 1$; és a dir, si les coordenades del punt c són (c_r, c_g, c_b) , les coordenades de c' són $(1, 1, c_b)$. Geomètricament, en la correcció del color el que es fa és transportar el punt c de la recta $\rho(t)$ al punt b de la mateixa mitjançant un escalat i , com a resultat d'això, el punt b és transportat a l'interior del cub.

2. Si el que es vol és corregir el color dels píxels que tinguin fins a dos components saturats, t_{max2} correspondrà al valor del paràmetre t a partir del qual tots tres components estan saturats:

$$t_{max2} = \max\{t_{max}^r, t_{max}^g, t_{max}^b\} \quad (5.22)$$

on $t_{max}^r, t_{max}^g, t_{max}^b$ es calculen de la forma indicada a l'equació 5.21

Tornant a la figura 5.5, el que es pretén és corregir el color dels píxels que es trobin entre els punts b i d' . El punt d' correspon a la projecció del punt d de la recta $\rho(t)$, punt a partir del qual els tres components queden saturats. Si el punt d té per coordenades (d_r, d_g, d_b) el punt d' té per coordenades $(1, 1, 1)$. En aquest cas, l'escalat que realitza el mètode de correcció, transporta el punt d sobre el punt b i, per tant, els punts c i b passen a l'interior del cub.

Un cop s'ha establert quin ha de ser el nou interval $[t_{min}, t_{max2}]$ en el que la resposta de la càmera ha de ser linial, el factor d'escalat k_s es pot obtenir aplicant l'equació 5.19:

$$k_s = \frac{1.0}{\max\{\rho_r(t_{max2}), \rho_g(t_{max2}), \rho_b(t_{max2})\}} \quad (5.23)$$

Escalat del color. Els valors t_{min} i t_{max2} del paràmetre t , defineixen dos punts sobre la recta $\rho(t)$. Aquests dos punts són $e_0 = \rho(t_{min})$ i $e_1 = \rho(t_{max2})$, i els valors que es troben en el segment de recta definit per e_0 i e_1 corresponen als valors que retornaria una càmera ideal per un cert color. L'objectiu de l'escalat del color és portar el punt e_1 sobre el cub que defineix el rang d'una càmera real. Gràficament això implica, fent referència a la figura 5.6, portar el punt e_1 al punt e'_1 .

Sigui A el paral·lelepípede rectangular que té com a extrems els punts e_0 i e_1 . Llavors, l'escalat del color es defineix com una aplicació $S : A \rightarrow RGB$ de la següent forma:

$$S(r, g, b) = \begin{cases} k_s(r, g, b) & \text{si } (r, g, b) \in \rho(t) \\ (\min(r, 1), \min(g, 1), \min(b, 1)) & \text{si } (r, g, b) \notin \rho(t) \end{cases} \quad (5.24)$$

Cal fer notar que la definició de l'aplicació S s'ha fet de forma que compleixi que la imatge de qualsevol punt del paral·lelepípede rectangular A pertanyi al cub unitari $(0, 0, 0)$, $(1, 1, 1)$. Observant els dos casos que apareixen a l'equació 5.24 es pot veure que:

- De l'equació 5.23 es dedueix que $\forall (r, g, b) \in \rho(t)$, $S(r, g, b)$ és sempre dins del cub unitari, ja que k_s ha estat calculada justament per assegurar aquesta condició.

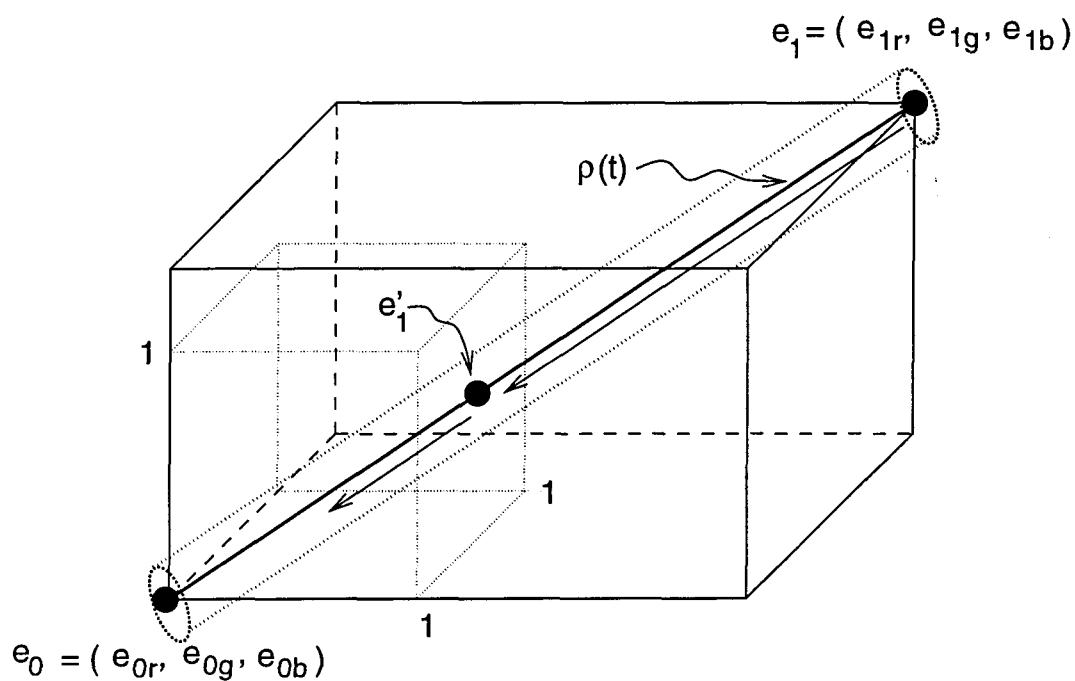


Figura 5.6: Il·lustració de l'escalat del color. El cub puntejat correspon al rang de valors que pot tornar la càmera real i el cilindre que té per eix la diagonal del paralelepípede e_0, e_1 conté els valors que es volen corregir.

- Quan (r, g, b) no pertany a la recta $\rho(t)$, el color no ha de ser corregit i l'aplicació S l'única cosa que fa és tenir en compte l'efecte del retall del color, d'acord amb l'equació 5.7.

A la pràctica, però, cal tenir en compte els errors que sempre acompanyen els processos d'adquisició de les imatges. En el problema que s'estudia, la conseqüència més clara d'aquests errors és que hi hagi valors de píxels corresponents al color caracteritzat que no es trobin sobre la recta estimada, sinó que estiguin en una posició propera. Tenint en compte això, s'ha modificat la definició de l'aplicació S de forma que corregeixi, a més dels punts que pertanyen a $\rho(t)$, tots els punts que estiguin dins d'un cilindre l'eix del qual sigui $\rho(t)$ i que tinguin un cert radi D . Com més gran sigui el radi més tolerant serà el sistema als errors que es puguin produir en l'adquisició. Però per contra, limita el número de colors amb els que es pot treballar a la vegada, ja que s'incrementa la possibilitat d'interseccions entre els diferents cilindres. La nova definició de S és la següent:

$$S(r, g, b) = \begin{cases} k_s(r, g, b) & \text{si } \text{dist}((r, g, b), \rho(t)) \leq D \\ (\min(r, 1), \min(g, 1), \min(b, 1)) & \text{si } \text{dist}((r, g, b), \rho(t)) > D \end{cases} \quad (5.25)$$

Cal recordar que els punts de A corresponen a la resposta d'una càmera ideal i el que cal corregir és la resposta d'una càmera real. L'últim pas de la correcció serà, doncs, veure quina és la resposta d'una càmera real associada a cada punt $(r, g, b) \in A$ per tal d'assignar-li el color corregit. Si $X_a = (X_{ar}, X_{ag}, X_{ab})$ és la resposta d'una càmera real associada a la resposta $X_i = (X_{ir}, X_{ig}, X_{ib})$ d'una càmera ideal, la relació entre les dues serà:

$$X_a = (\min(X_{ir}, 1), \min(X_{ig}, 1), \min(X_{ib}, 1)) \quad (5.26)$$

Així, doncs, el resultat de $S(r, g, b)$ es considerarà el valor corregit associat a la resposta $(\min(r, 1), \min(g, 1), \min(b, 1))$ de la càmera real.

Algoritme d'escalat del color Del procés de caracterització del color s'obté un conjunt de rectes $R = \{\rho_{C_1}(t), \rho_{C_2}(t), \dots, \rho_{C_n}(t)\}$, essent n el número de colors que s'han caracteritzat. Per cada un dels colors C_j es determina l'interval $[l_{min}^{C_j}, l_{max}^{C_j}]$ i el factor d'escalat $k_s^{C_j}$ aplicant els criteris anteriorment exposats. Finalment, la correcció del color es porta a terme amb un algoritme basat en la utilització de tres LUTs que anomenem LUT_r, LUT_g, LUT_b . Aquestes estan indexades pels tres valors RGB de la resposta de la càmera, de forma que $LUT_r[r][g][b], LUT_g[r][g][b], LUT_b[r][g][b]$ contenen, respectivament,

els valors corregits pels components vermell, verd i blau. Les LUTs s'inicialitzen de forma que la sortida sigui equivalent a l'entrada.

Per la definició de l'algoritme que es proposa tot seguit s'ha suposat que cada un dels tres components pren valors entre 0 i 255 (que és un interval utilitzat per la majoria de dispositius d'adquisició). La funció $\text{distància}(p, r)$ retorna la distància del punt p a la recta r , mesurada com la longitud del vector perpendicular a r i que té per extrems el punt p i un punt de r .

```

Algoritme Escalat del color retornant components RGB
{ Inicialització de les LUTs }
per  $r$  des de 0 fins 255 fer
    per  $g$  des de 0 fins 255 fer
        per  $b$  des de 0 fins 255 fer
             $LUT_r[r][g][b] \leftarrow r$ 
             $LUT_g[r][g][b] \leftarrow g$ 
             $LUT_b[r][g][b] \leftarrow b$ 
        fiper
    fiper
fiper
{ Càlcul del valor de les LUTs }
per cada  $C \in R$  fer
     $e_0 \leftarrow \rho_C(t_{min}^C)$ ,  $e_1 \leftarrow \rho_C(t_{max2}^C)$ 
    per  $r$  des de  $e_0.r$  fins  $e_1.r$  fer
        per  $g$  des de  $e_0.g$  fins  $e_1.g$  fer
            per  $b$  des de  $e_0.b$  fins  $e_1.b$  fer
                 $p \leftarrow (r, g, b)$ 
                 $r_{min} \leftarrow \max(\min(255, r), 0)$ 
                 $g_{min} \leftarrow \max(\min(255, g), 0)$ 
                 $b_{min} \leftarrow \max(\min(255, b), 0)$ 
                si  $\text{distància}(p, \rho_C(t)) < D$  llavors
                     $r' \leftarrow r * k_s^C$ 
                     $g' \leftarrow g * k_s^C$ 
                     $b' \leftarrow b * k_s^C$ 
                     $LUT_r[r_{min}][g_{min}][b_{min}] \leftarrow \max(r', 0)$ 
                     $LUT_g[r_{min}][g_{min}][b_{min}] \leftarrow \max(g', 0)$ 
                     $LUT_b[r_{min}][g_{min}][b_{min}] \leftarrow \max(b', 0)$ 
                sinó
                     $LUT_r[r_{min}][g_{min}][b_{min}] \leftarrow r_{min}$ 
                     $LUT_g[r_{min}][g_{min}][b_{min}] \leftarrow g_{min}$ 
                     $LUT_b[r_{min}][g_{min}][b_{min}] \leftarrow b_{min}$ 
            fisi
        fiper
    fiper
fiper
fiper
fiper
fiper

```

Quan acaba aquest algoritme, les LUTs LUT_r , LUT_g , LUT_b contenen els valors *RGB*

corregits per cada una de les respostes de la càmera.

5.3 Components de color a les que es pot aplicar el mètode proposat

El mètode presentat fins ara corregeix la informació cromàtica d'aquells píxels que tenen algun dels components saturats, assignant-los-hi uns nous valors RGB . Aquests nous valors són obtinguts escalant la resposta prevista de la càmera i, tal i com ja s'ha comentat, aquest mètode manté la informació per tots els components cromàtics definits a partir de valors RGB que tenen la propietat de ser invariants a l'escalat. En aquesta secció es presenta un estudi de components cromàtics que han estat utilitzats en diferents treballs, mirant si tenen o no tenen aquesta propietat. Per comprovar-ho, per cada transformació T , es mira si es compleix que $\forall \alpha > 0, T(r, g, b) = T(\alpha r, \alpha g, \alpha b)$. Per cada component es relaciona l'espai de color on es troba i es fa alguna referència a treballs que l'hagin utilitzada. Els components que es repeteixen en diferents espais de color, només s'estudien una vegada.

En els desenvolupaments matemàtics que es troben en les pàgines següents s'han aplicat les següents regles:

- $\min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} = \alpha \min\{r, g, b\}$. Això es compleix sempre que $\alpha > 0$. El mateix es pot dir respecte al càlcul del màxim o de la mediana: si $\alpha > 0$ les relacions d'ordre entre els tres components es mantenen.
- Per les transformacions definides com una fracció, en la que el numerador i el denominador estan formats per sumes de productes, i en les que cada producte conté un i només un dels tres components r, g, b , es podrà afirmar que la transformació és invariant a l'escalat del color.

To, segons l'espai HSI (Perez i Koch, Genz) [PK94, Gen93]

$$H(r, g, b) = \arctan \frac{\sqrt{3}(g - b)}{(r - g) + (r - b)} \quad (5.27)$$

$$\begin{aligned}
 H(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \arctan \frac{\sqrt{3}(\alpha g - \alpha b)}{(\alpha r - \alpha g) + (\alpha r - \alpha b)} = \\
 &= \arctan \frac{\alpha\sqrt{3}(g - b)}{\alpha(r - g) + \alpha(r - b)} = \\
 &= H(r, g, b)
 \end{aligned}$$

Saturació, segons l'espai HSI [PK94, Gen93]

$$\boxed{S(r, g, b) = 1 - \frac{\min\{r, g, b\}}{(r + g + b)/3}} \quad (5.28)$$

$$\begin{aligned}
 S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= 1 - \frac{\min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{(\alpha r + \alpha g + \alpha b)/3} = \\
 &= 1 - \frac{\alpha \min\{r, g, b\}}{\alpha(r + g + b)/3} = \\
 &= S(r, g, b)
 \end{aligned}$$

Intensitat, segons l'espai HSI [PK94, Gen93]

$$\boxed{I(r, g, b) = \frac{r + g + b}{3}} \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned}
 I(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\alpha r + \alpha g + \alpha b}{3} = \\
 &= \frac{\alpha(r + g + b)}{3} = \\
 &= \alpha I(r, g, b) \neq \\
 &\neq I(r, g, b)
 \end{aligned}$$

To, segons l'espai HSI [CL94]

$$\boxed{H(r, g, b) = \begin{cases} \arccos(C_2/S) & \text{si } C_2 \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(C_2/S) & \text{si } C_2 < 0 \end{cases}} \quad (5.30)$$

on C_2 s'obté a partir de la següent transformació lineal, i la S correspon a la saturació i està definida més endavant:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & +\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Posant el to directament en funció d' r, g, b s'obté, pel cas $C_2 \geq 0$:

$$H(r, g, b) = \arccos \frac{-g\sqrt{3}/2 + b\sqrt{3}/2}{\sqrt{r^2 + g^2 + b^2 - (rg + rb + gb)}}$$

podent obtenir, així, l'expressió d' $H(\alpha r, \alpha g, \alpha b)$:

$$\begin{aligned} H(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \arccos \frac{-\alpha g\sqrt{3}/2 + \alpha b\sqrt{3}/2}{\sqrt{(\alpha r)^2 + (\alpha g)^2 + (\alpha b)^2 - (\alpha r\alpha g + \alpha r\alpha b + \alpha g\alpha b)}} = \\ &= \arccos \frac{\alpha(-g\sqrt{3}/2 + b\sqrt{3}/2)}{\alpha\sqrt{r^2 + g^2 + b^2 - (rg + rb + gb)}} = \\ &= H(r, g, b) \end{aligned}$$

Mirant l'equació 5.30 es pot veure que pel cas $C_2 < 0$ també es compleix la condició $H(\alpha r, \alpha g, \alpha b) = H(r, g, b)$, ja que l'única diferència està en restar de 2π l'angle obtingut.

Component C_1 segons model IC_1C_2 [BCM95] (No cal confondre aquest component C_1 amb el component C_1 definit a l'equació 5.31)

$$\boxed{C_1(r, g, b) = \frac{b}{r + g + b}} \quad (5.32)$$

$$\begin{aligned} C_1(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\alpha b}{\alpha r + \alpha g + \alpha b} = \\ &= \frac{\alpha b}{\alpha(r + g + b)} = \\ &= C_1(r, g, b) \end{aligned}$$

Component C_2 segons model IC_1C_2 [BCM95] (No cal confondre aquest component C_2 amb el component C_2 definit a l'equació 5.31)

$$C_2(r, g, b) = \frac{1}{2} \frac{2r + b}{r + g + b} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} C_2(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{1}{2} \frac{2\alpha r + \alpha b}{\alpha r + \alpha g + \alpha b} = \\ &= \frac{1}{2} \frac{\alpha(2r + b)}{\alpha(r + g + b)} = \\ &= C_2(r, g, b) \end{aligned}$$

Saturació, segons l'espai HSI [CL94]

$$S(r, g, b) = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (5.34)$$

on C_1, C_2 són els que apareixen a l'equació 5.31. Substituint C_1 i C_2 per la seva expressió en funció d' r, g, b s'obté la saturació en funció directament d' r, g, b :

$$\begin{aligned} S(r, g, b) &= \sqrt{\left(r - \frac{g+b}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}g + \frac{\sqrt{3}}{2}b\right)^2} = \\ &= \sqrt{r^2 + g^2 + b^2 - (rg + rb + gb)} \end{aligned}$$

i finalment obtenim $S(\alpha r, \alpha g, \alpha b)$:

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \sqrt{(\alpha r)^2 + (\alpha g)^2 + (\alpha b)^2 - (\alpha r \alpha g + \alpha r \alpha b + \alpha g \alpha b)} = \\ &= \alpha \sqrt{r^2 + g^2 + b^2 - (rg + rb + gb)} = \\ &= \alpha S(r, g, b) \neq \\ &\neq S(r, g, b) \end{aligned}$$

To, segons model HSV [Smi78, FvDFH90]

$$\begin{aligned} H(r, g, b) &= \begin{cases} \pi/3(g - b)/\Delta(r, g, b) & \text{si } r = \max\{r, g, b\} \\ \pi/3(2 + (b - r)/\Delta(r, g, b)) & \text{si } g = \max\{r, g, b\} \\ \pi/3(4 + (r - g)/\Delta(r, g, b)) & \text{si } b = \max\{r, g, b\} \end{cases} \\ \Delta(r, g, b) &= \max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\} \\ \text{si } H(r, g, b) < 0 &\text{ llavors } H(r, g, b) = 2\pi + H(r, g, b) \end{aligned} \quad (5.35)$$

Observant l'equació 5.35 pot veure's que:

$$\begin{aligned}\Delta(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} = \\ &= \alpha \max\{r, g, b\} - \alpha \min\{r, g, b\} = \\ &= \alpha \Delta(r, g, b)\end{aligned}$$

i, per tant:

$$\begin{aligned}H(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \begin{cases} \pi/3(\alpha b - \alpha g)/(\alpha \Delta(r, g, b)) & \text{si } \alpha r = \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} \\ \pi/3(2 + (\alpha b - \alpha r)/(\alpha \Delta(r, g, b))) & \text{si } \alpha g = \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} \\ \pi/3(4 + (\alpha r - \alpha g)/(\alpha \Delta(r, g, b))) & \text{si } \alpha b = \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} \end{cases} = \\ &= \begin{cases} \pi/3\alpha(b - g)/(\alpha \Delta(r, g, b)) & \text{si } \alpha r = \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} \\ \pi/3(2 + \alpha(b - r)/(\alpha \Delta(r, g, b))) & \text{si } \alpha g = \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} \\ \pi/3(4 + \alpha(r - g)/(\alpha \Delta(r, g, b))) & \text{si } \alpha b = \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} \end{cases} = \\ &= H(r, g, b)\end{aligned}$$

Saturació, segons model HSV [Smi78, FvDFH90]

$$\boxed{S(r, g, b) = \frac{\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\}}{\max\{r, g, b\}}} \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned}S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}} = \\ &= \frac{\alpha \max\{r, g, b\} - \alpha \min\{r, g, b\}}{\alpha \max\{r, g, b\}} = \\ &= S(r, g, b)\end{aligned}$$

Valor, segons HSV [Smi78, FvDFH90]

$$\boxed{V(r, g, b) = \max\{r, g, b\}} \quad (5.37)$$

$$\begin{aligned}V(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} = \\ &= \alpha \max\{r, g, b\} = \\ &= \alpha V(r, g, b) \neq \\ &\neq V(r, g, b)\end{aligned}$$

Lluminància, segons HLS [JG78, FvDFH90]

$$L(r, g, b) = (\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\})/2 \quad (5.38)$$

$$\begin{aligned} L(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= (\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} + \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\})/2 = \\ &= (\alpha \max\{r, g, b\} + \alpha \min\{r, g, b\})/2 = \\ &= \alpha L(r, g, b) \neq \\ &\neq L(r, g, b) \end{aligned}$$

Saturació, segons HLS [JG78, FvDFH90]

$$S(r, g, b) = \begin{cases} \frac{\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\}}{\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\}} & \text{si } L \leq 0.5 \\ \frac{\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\}}{2 - (\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\})} & \text{si } L > 0.5 \end{cases} \quad (5.39)$$

Pel que fa al primer cas, quan $L \leq 0.5$, es pot veure que:

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} + \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}} = \\ &= \frac{\alpha \max\{r, g, b\} - \alpha \min\{r, g, b\}}{\alpha \max\{r, g, b\} + \alpha \min\{r, g, b\}} = \\ &= S(r, g, b) \end{aligned}$$

Pel que respecte al segon cas, quan $L > 0.5$:

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{2 - (\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} + \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\})} = \\ &= \frac{\alpha \max\{r, g, b\} - \alpha \min\{r, g, b\}}{2 - (\alpha \max\{r, g, b\} + \alpha \min\{r, g, b\})} = \\ &= \frac{\alpha(\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\})}{2 - \alpha(\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\})} \end{aligned}$$

es pot veure que, en aquest segon cas, $S(\alpha r, \alpha g, \alpha b)$ serà igual a $S(r, g, b)$ només quan es compleixi que:

$$2 - \alpha(\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\}) = \alpha(\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\})$$

és a dir, quan:

$$\alpha = \frac{1}{\max\{r, g, b\} + \min\{r, g, b\}}$$

Saturació, segons HSV [Ten74]

$$S(r, g, b) = 1 - 3 \min \left\{ \frac{r}{r+g+b}, \frac{g}{r+g+b}, \frac{b}{r+g+b} \right\} \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= 1 - 3 \min \left\{ \frac{\alpha r}{\alpha r + \alpha g + \alpha b}, \frac{\alpha g}{\alpha r + \alpha g + \alpha b}, \frac{\alpha b}{\alpha r + \alpha g + \alpha b} \right\} = \\ &= 1 - 3 \min \left\{ \frac{\alpha r}{\alpha(r+g+b)}, \frac{\alpha g}{\alpha(r+g+b)}, \frac{\alpha b}{\alpha(r+g+b)} \right\} = \\ &= S(r, g, b) \end{aligned}$$

Saturació, segons HSV [YAN92]

$$S(r, g, b) = \max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\} \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} = \\ &= \alpha \max\{r, g, b\} - \alpha \min\{r, g, b\} = \\ &= \alpha S(r, g, b) \neq \\ &\neq S(r, g, b) \end{aligned}$$

LLuminositat segons GLHS [Lev93]

$$L(r, g, b) = w_{min} \min\{r, g, b\} + w_{med} \text{med}\{r, g, b\} + w_{max} \max\{r, g, b\} \quad (5.42)$$

on $w_{max} > 0$ i $w_{min} + w_{med} + w_{max} = 1$.

$$\begin{aligned} L(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= w_{min} \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} + w_{med} \text{med}\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} + \\ &\quad + w_{max} \max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} = \\ &= w_{min} \alpha \min\{r, g, b\} + w_{med} \alpha \text{med}\{r, g, b\} + w_{max} \alpha \max\{r, g, b\} = \\ &= \alpha L(r, g, b) \neq \\ &\neq L(r, g, b) \end{aligned}$$

To segons GLHS [Lev93]

$$H(r, g, b) = \frac{\pi}{3} (k(r, g, b) + f(r, g, b)) \quad (5.43)$$

on

$$k(r, g, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } r > g \geq b \\ 1 & \text{si } g \geq r > b \\ 2 & \text{si } g > b \geq r \\ 3 & \text{si } b \geq g > r \\ 4 & \text{si } b > r \geq g \\ 5 & \text{si } r \geq b > g \end{cases}$$

$$f(r, g, b) = \begin{cases} \frac{\text{med}\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\}}{\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\}} & \text{si } k(r, g, b) \text{ és parell} \\ \frac{\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\}}{\max\{r, g, b\} - \text{med}\{r, g, b\}} & \text{si } k(r, g, b) \text{ és senar} \end{cases}$$

Per veure que aquest to és invariant a l'escalat, veiem que ho són $k(r, g, b)$ i $f(r, g, b)$:

$$k(\alpha r, \alpha g, \alpha b) = \begin{cases} 0 & \text{si } \alpha r > \alpha g \geq \alpha b \\ 1 & \text{si } \alpha g \geq \alpha r > \alpha b \\ 2 & \text{si } \alpha g > \alpha b \geq \alpha r \\ 3 & \text{si } \alpha b \geq \alpha g > \alpha r \\ 4 & \text{si } \alpha b > \alpha r \geq \alpha g \\ 5 & \text{si } \alpha r \geq \alpha b > \alpha g \end{cases} = k(r, g, b)$$

donat que α és un valor positiu

$$f(\alpha r, \alpha g, \alpha b) = \begin{cases} \frac{\text{med}\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}} & \text{si } k(\alpha r, \alpha g, \alpha b) \text{ és parell} \\ \frac{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - \text{med}\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}} & \text{si } k(\alpha r, \alpha g, \alpha b) \text{ és senar} \end{cases} =$$

$$= \begin{cases} \frac{\alpha(\text{med}\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\})}{\alpha(\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\})} & \text{si } k(\alpha r, \alpha g, \alpha b) \text{ és parell} \\ \frac{\alpha(\max\{r, g, b\} - \min\{r, g, b\})}{\alpha(\max\{r, g, b\} - \text{med}\{r, g, b\})} & \text{si } k(\alpha r, \alpha g, \alpha b) \text{ és senar} \end{cases} =$$

$$= f(r, g, b)$$

Així doncs, com que $k(\alpha r, \alpha g, \alpha b) = k(r, g, b)$ i $f(\alpha r, \alpha g, \alpha b) = f(r, g, b)$ es pot concloure de l'equació 5.43 que $H(\alpha r, \alpha g, \alpha b) = H(r, g, b)$.

Saturació segons GHLS [Lev93]

$$S(r, g, b) = \begin{cases} \frac{L(r, g, b) - \min\{r, g, b\}}{L(r, g, b)} & \text{si } L(r, g, b) \leq L(q(r, g, b)) \\ \frac{\max\{r, g, b\} - L(r, g, b)}{1 - L(r, g, b)} & \text{si } L(r, g, b) > L(q(r, g, b)) \end{cases} \quad (5.44)$$

on $q(r, g, b)$ correspon al tercer vèrtex del triangle que defineix el conjunt de colors amb un to constant (els altres dos vèrtexs són el color blanc i el color negre). Depèn només de $f(r, g, b)$ i $k(r, g, b)$ i per tant és invariant a l'escalat tal i com ja hem vist.

Per veure si la saturació és invariant a l'escalat, ho farem considerant els dos casos per separat. Primer mirem el cas $L(r, g, b) \leq L(q(r, g, b))$:

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{L(\alpha r, \alpha g, \alpha b) - \min\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\}}{L(\alpha r, \alpha g, \alpha b)} = \\ &= \frac{\alpha L(r, g, b) - \alpha \min\{r, g, b\}}{\alpha L(r, g, b)} = \\ &= \frac{L(r, g, b) - \min\{r, g, b\}}{L(r, g, b)} = \\ &= S(r, g, b) \end{aligned}$$

Pel segon cas, quan $L(r, g, b) > L(q(r, g, b))$:

$$\begin{aligned} S(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\max\{\alpha r, \alpha g, \alpha b\} - L(\alpha r, \alpha g, \alpha b)}{1 - L(\alpha r, \alpha g, \alpha b)} = \\ &= \frac{\alpha \max\{r, g, b\} - \alpha L(r, g, b)}{1 - \alpha L(r, g, b)} = \\ &= \frac{\max\{r, g, b\} - L(r, g, b)}{1/\alpha - L(r, g, b)} \neq \\ &\neq S(r, g, b) \end{aligned}$$

Y segons RGB normalitzat [Nev77]

$$Y(r, g, b) = c_1 r + c_2 g + c_3 b \text{ on } c_1 + c_2 + c_3 = 1 \quad (5.45)$$

$$\begin{aligned} Y(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= c_1 \alpha r + c_2 \alpha g + c_3 \alpha b = \\ &= \alpha(c_1 r + c_2 g + c_3 b) = \\ &= \alpha Y(r, g, b) \neq \\ &\neq Y(r, g, b) \end{aligned}$$

T_1 i T_2 segons RGB normalitzat [Nev77]

$$\boxed{\begin{aligned} T_1(r, g, b) &= \frac{r}{r + g + b} \\ T_2(r, g, b) &= \frac{g}{r + g + b} \end{aligned}} \quad (5.46)$$

Es presenta només el desenvolupament per T_1 ; el cas T_2 és del tot equivalent.

$$\begin{aligned} T_1(\alpha r, \alpha g, \alpha b) &= \frac{\alpha r}{\alpha r + \alpha g + \alpha b} = \\ &= \frac{\alpha r}{\alpha(r + g + b)} = \\ &= T_1(r, g, b) \end{aligned}$$

To a CIEL* u^*v^*

$$\boxed{h_{uv}(x, y, z) = \arctan \frac{v^*}{u^*}} \quad (5.47)$$

Per trobar u^*, v^* cal tenir el color expressat en coordenades XYZ. Caldrà, doncs, convertir la sortida de la càmera en RGB a l'espai XYZ. Tal i com va definir la CIE, el pas entre dos espais tristimulus es pot representar com una transformació lineal M :

$$(x, y, z) = M(r, g, b) \quad (5.48)$$

Per obtenir els nou coeficients d' M el que s'ha fet ha estat adquirir un conjunt de colors amb unes coordenades x, y, z conegudes i resoldre per mínims quadrats el sistema sobredeterminat que s'obté:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & y_{n-1} & z_{n-1} \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & g_1 & b_1 \\ r_2 & g_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n-1} & g_{n-1} & b_{n-1} \\ r_n & g_n & b_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (5.49)$$

Un cop estimada M ja s'està en condicions de trobar x, y, z per tot r, g, b que generi el sensor i , a partir d' x, y, z , obtenir u^*, v^* :

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (5.50)$$

$$u' = 4X/(X + 15Y + 3Z) \quad (5.51)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (5.52)$$

$$v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z) \quad (5.53)$$

$$L^* = \begin{cases} 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 & \text{si } Y/Y_n > 0.008856 \\ 903.3(Y/Y_n) & \text{si } Y/Y_n \leq 0.008856 \end{cases} \quad (5.54)$$

A partir d'aquestes darreres expressions pot reescriure's el to a l'espai $L^*u^*v^*$ com:

$$h_{uv}(x, y, z) = \arctan\left(\frac{u' - u'_n}{v' - v'_n}\right) \quad (5.55)$$

i per tant, veure que h_{uv} és invariant a l'escalat és el mateix que veure si u' i v' ho són. Donat un valor $(\alpha r, \alpha g, \alpha b)$ tenim que:

$$\begin{aligned} u'(M(\alpha r, \alpha g, \alpha b)) &= u'(\alpha M(r, g, b)) = \\ &= u'(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z) = \\ &= \frac{4\alpha X}{\alpha X + 15\alpha Y + 3\alpha Z} = \\ &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \\ &= u'(X, Y, Z) = \\ &= u'(M(r, g, b)) \end{aligned}$$

Per v' es fa un desenvolupament similar i es veu que, efectivament, h_{uv} és invariant a l'escalat.

Lluminància a $CIEL^*u^*v^*$

$$L^*(X, Y, Z) = \begin{cases} 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 & \text{si } Y/Y_n > 0.008856 \\ 903.3(Y/Y_n) & \text{si } Y/Y_n \leq 0.008856 \end{cases} \quad (5.56)$$

Desenvolupant la primera de les dues expressions es veu que:

$$\begin{aligned}
 Y^*(M(\alpha r, \alpha g, \alpha b)) &= Y^*(\alpha M(r, g, b)) = \\
 &= Y^*(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z) = \\
 &= 116 \sqrt[3]{\alpha Y/Y_n} - 16 = \\
 &= \sqrt[3]{\alpha} 116 \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 \neq \\
 &\neq Y^*(r, g, b)
 \end{aligned}$$

Pel que respecte a la segona expressió el resultat és similar:

$$\begin{aligned}
 Y^*(M(\alpha r, \alpha g, \alpha b)) &= Y^*(\alpha M(r, g, b)) = \\
 &= Y^*(\alpha x, \alpha y, \alpha z) = \\
 &= 903.3(\alpha y/Y_n) = \\
 &= \alpha 903.3(y/Y_n) \neq \\
 &\neq Y^*(r, g, b)
 \end{aligned}$$

Croma a CIELu***v****

$$\boxed{C_{uv}^*(x, y, z) = \sqrt{v^{*2} + u^{*2}}} \tag{5.57}$$

Desenvolupant les expressions de *u** i de *v**, tenim que:

$$C_{uv}^*(x, y, z) = 13L^* \sqrt{(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2}$$

Tal i com s'ha vist en els components precedents, *u*' i *v*' són invariants a l'escalat, però *L** no ho és, i per tant, tampoc ho és el croma.

Saturació a CIELu***v****

$$\boxed{s_{uv}(x, y, z) = \frac{C_{uv}^*}{L^*}} \tag{5.58}$$

De l'expressió precedent del croma, obtenim que :

$$s_{uv}^*(x, y, z) = 13 \sqrt{(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2}$$

i, com que *u*' i *v*' són invariants a l'escalat, es pot veure que la saturació també ho és.

To a $CIEL^*a^*b^*$

$$\boxed{h_{ab}(x, y, z) = \arctan \frac{b^*}{a^*}} \quad (5.59)$$

Igual que passava amb u^*, v^* , per trobar a^*, b^* cal tenir el color expressat en coordenades XYZ :

$$a^* = 500 \left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n} \right) \quad (5.60)$$

$$b^* = 200 \left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n} \right) \quad (5.61)$$

$$\begin{aligned} h_{ab}(M(\alpha r, \alpha g, \alpha b)) &= h_{ab}(\alpha M(r, g, b)) = \\ &= h_{ab}(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z) = \\ &= \arctan \frac{500 \left(\sqrt[3]{\alpha X/X_n} - \sqrt[3]{\alpha Y/Y_n} \right)}{200 \left(\sqrt[3]{\alpha Y/Y_n} - \sqrt[3]{\alpha Z/Z_n} \right)} = \\ &= \arctan \frac{500 \sqrt[3]{\alpha} \left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n} \right)}{200 \sqrt[3]{\alpha} \left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n} \right)} = \\ &= h_{ab}(X, Y, Z) = \\ &= h_{ab}(M(r, g, b)) \end{aligned}$$

Croma a $CIEL^*a^*b^*$

$$\boxed{C_{ab}^*(X, Y, Z) = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}} \quad (5.62)$$

$$\begin{aligned} C_{ab}^*(M(\alpha r, \alpha g, \alpha b)) &= C_{ab}^*(\alpha M(r, g, b)) = \\ &= C_{ab}^*(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z) = \\ &= \sqrt{\left(500 \left(\sqrt[3]{\alpha X/X_n} - \sqrt[3]{\alpha Y/Y_n} \right) \right)^2 + \left(200 \left(\sqrt[3]{\alpha Y/Y_n} - \sqrt[3]{\alpha Z/Z_n} \right) \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(500 \sqrt[3]{\alpha} \left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n} \right) \right)^2 + \left(200 \sqrt[3]{\alpha} \left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n} \right) \right)^2} = \\ &= \sqrt[3]{\alpha} \sqrt{\left(500 \left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n} \right) \right)^2 + \left(200 \left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n} \right) \right)^2} = \\ &= \sqrt[3]{\alpha} C_{ab}^*(X, Y, Z) \neq \\ &\neq C_{ab}^*(X, Y, Z) \end{aligned}$$

5.3.1 Taules resum

Les taules 5.1, 5.2 i 5.3 mostren el resum de l'estudi realitzat sobre components cromàtics. La primera columna conté el nom del component (o components), la segona l'espai cromàtic sobre el que està definit, la tercera correspon al número de l'equació d'aquest capítol on ha estat definit (i entre parèntesi la pàgina on es troba), i la quarta component ens diu si és o no és invariant a l'escalat. Cal comentar que a la bibliografia apareixen diferents definicions de components cromàtiques mantenint el mateix nom de l'espai (per això, i per evitar confusions, per cada component fem referència a l'equació on està definida).

Component	Espai cromàtic	Equació (pàgina)	Invariant
T_1, T_2	RGB normalitzat	5.46 (146)	Sí
C_1	IC_1C_2	5.32 (139)	Sí
C_2	IC_1C_2	5.33 (140)	Sí
H	HSI	5.27 (137)	Sí
H	HSI	5.30 (138)	Sí
H	HSV	5.35 (140)	Sí
H	GLHS	5.43 (143)	Sí
H	$CIEL^*u^*v^*$	5.47 (146)	Sí
H	$CIEL^*a^*b^*$	5.59 (149)	Sí

Taula 5.1: Components cromàtiques i la propietat de la invariança a l'escalat. RGB normalitzat i diferents definicions pel To.

Observant les taules 5.1 i 5.2 es pot veure que tots els components cromàtics basats en el concepte de to són invariants a l'escalat (és a dir, que el to és independent de la intensitat de l'il·luminant) i que una bona part de les saturacions també tenen aquesta propietat. Podem afirmar, doncs, que en molts dels espais de color que han estat utilitzats per diferents autors la informació cromàtica (to més saturació) és independent de la intensitat i, que per tant, el nostre mètode és aplicable com a preprocessat en molts dels algorismes que han estat proposats. L'única restricció és que només permetem corregir un conjunt limitat de colors, restricció que no es massa forta en entorns industrials.

Component	Espai cromàtic	Equació (pàgina)	Invariant
S	HSI	5.28 (138)	Sí
S	HSI	5.34 (140)	No
S	HSV	5.36 (141)	Sí
S	HSV	5.40 (143)	Sí
S	HSV	5.41 (143)	No
S	HLS	5.39 (142)	Sí per $L \leq 0.5$ No per $L > 0.5$
S	GLHS	5.44 (145)	Sí per $L(c) \leq L(q(c))$ No per $L(c) > L(q(c))$
S	$CIEL^*u^*v^*$	5.58 (148)	Sí
C	$CIEL^*u^*v^*$	5.57 (148)	No
C	$CIEL^*a^*b^*$	5.62 (149)	No

Taula 5.2: Components cromàtiques i la propietat de la invariança a l'escalat. Diferents definicions de saturació.

Component	Espai cromàtic	Equació (pàgina)	Invariant
I	HSI	5.27 (137)	No
V	HSV	5.35 (140)	No
L	HLS	5.38 (142)	No
L	GLHS	5.42 (143)	No
Y	RGB normalitzat	5.45 (145)	No
L^*	$CIEL^*u^*v^*$	5.58 (148)	No

Taula 5.3: Components cromàtiques i la propietat de la invariança a l'escalat. Diferents mesures d'intensitat.

5.3.1.1 Generalització de l'algoritme de la pàgina 136

L'algoritme que s'ha presentat anteriorment és fàcilment modificable, afegint-hi les LUTs necessàries, per tal que la seva sortida doni directament els components cromàtics amb els que es vol treballar. Es tracta d'utilitzar una nova LUT LUT_X conjuntament amb una funció $\text{Obté}X(r, g, b)$ per cada component cromàtic X amb el que es vulgui treballar. La funció $\text{Obté}X(r, g, b)$ ha de retornar el valor del component cromàtic X associat al valor tristimul (r, g, b).

Per exemple, si es vol treballar amb un espai HSI , s'utilitzarien tres noves LUTs (LUT_H , LUT_S i LUT_I) i l'algoritme modificat quedaria tal i com es mostra tot seguit. Les funcions $\text{Obté}H(r, g, b)$, $\text{Obté}S(r, g, b)$ i $\text{Obté}I(r, g, b)$ retornen respectivament els valors del to, saturació i intensitat associats al valor tristimul (r, g, b) segons les equacions 5.27, 5.28 i 5.29.

5.4 Precissió del mètode

A part del problema del soroll present en l'adquisició (que es podia arreglar variant el radi del cilindre tal i com ja ha estat comentat) n'hi ha un altre que cal ser tingut en compte: la invariança a l'increment en l'il·luminant només és completament certa quan les rectes que descriuen el comportament de cada component respecte a la intensitat passen per l'origen. És a dir, només es manté la invariança quan:

$$\begin{aligned}\rho_r(l) &= c_r l \\ \rho_g(l) &= c_g l \\ \rho_b(l) &= c_b l\end{aligned}\tag{5.63}$$

A la pràctica, però, tal i com es comenta al proper capítol, les rectes que s'obtenen són de la forma:

$$\begin{aligned}\rho_r(l) &= c_r l + d_r \\ \rho_g(l) &= c_g l + d_g \\ \rho_b(l) &= c_b l + d_b\end{aligned}\tag{5.64}$$

Amb les expressions de l'equació 5.63 es pot veure que la relació entre dues intensitats l i kl és la següent:

$$\frac{c_r l}{c_r kl} = \frac{c_g l}{c_g kl} = \frac{c_b l}{c_b kl} = \frac{1}{k}\tag{5.65}$$

mentre que si es miren les expressions de l'equació 5.64 es veu que un increment en la intensitat no provoca un increment igual en els tres components:

$$\frac{c_r l + d_r}{c_r kl + d_r} \neq \frac{c_g l + d_g}{c_g kl + d_g} \neq \frac{c_b l + d_b}{c_b kl + d_b}\tag{5.66}$$

La diferència es troba en els termes d_r , d_g i d_b , que no són afectats per l'increment de la intensitat. Aquests termes, però, al ser constants, perden la seva importància a mesura que creix el número que multiplica a c_r , c_g i c_b .

La figura 5.7 il·lustra aquest efecte. Tal i com es pot veure al principi el to no és constant però, a mesura que la intensitat augmenta es va estabilitzant, fins que aproximadament a la meitat de l'interval on cap dels components està saturat té un comportament completament constant.

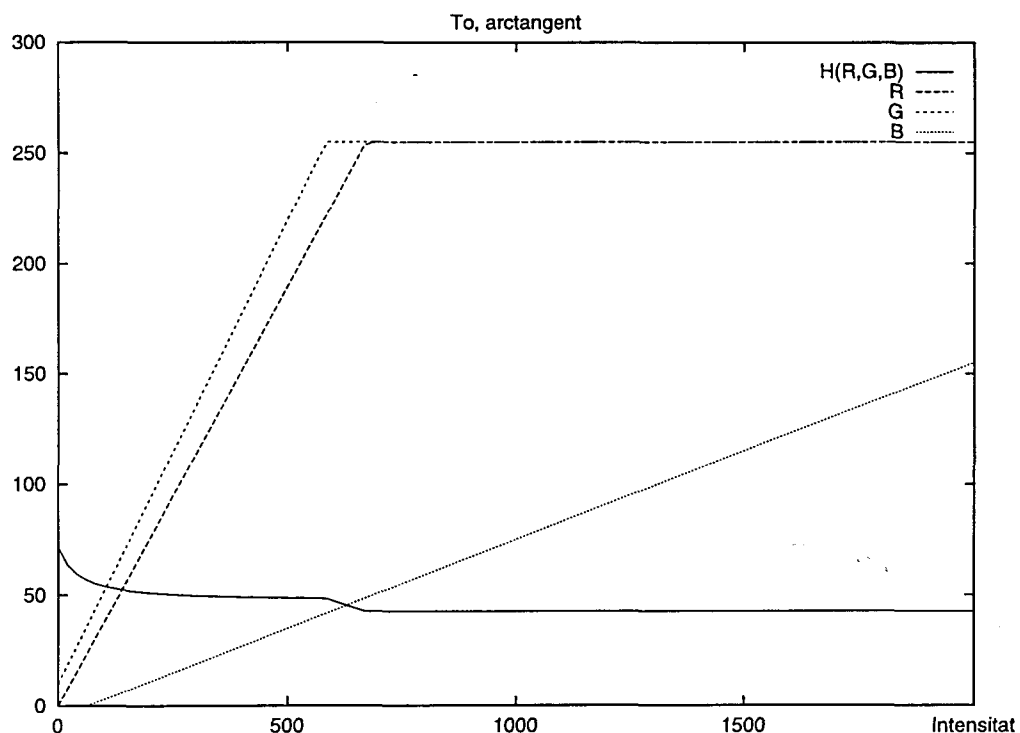


Figura 5.7: Comportament del to quan les rectes no passen per l'origen

La causa d'aquest error és un problema de calibració del sistema i és difícilment quantificable. A l'hora d'implementar el sistema que es presenta al proper capítol s'ha tingut en compte una etapa prèvia de calibració, l'objectiu de la qual és que els valors d_r , d_g i d_b siguin el més petits possibles.

Capítol 6

Validació del mètode de correcció del color i resultats experimentals

El mètode presentat al capítol anterior ha estat assajat utilitzant plaques específiques per a l'adquisició i el processat d'imatges en color. En aquest capítol es descriu aquesta implementació i es mostren i comenten els resultats obtinguts en diferents escenes.

6.1 Implementació del sistema

El mètode per la correcció del color s'ha proposat en el capítol precedent ha estat implementat utilitzant un hardware específic pel processat d'imatges en color. Tot seguit es descriuen els diferents elements que formen part del sistema i s'exposa com han estat integrats.

6.1.1 El hardware utilitzat pel processat d'imatges

El *hardware* específic pel processat d'imatges en color que ha estat utilitzat està format per dues plaques connectables a un ordinador compatible PC (amb bus ISA): una de comercial (MVP de Matrox) i una altra desenvolupada als laboratoris del Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial de la UPC i del Grup de Visió per Computador de la Universitat de Girona [Bat93], anomenada comercialment RTC.

6.1.1.1 Placa RTC

La tarja RTC és una placa que permet aplicar en temps real qualsevol transformació matemàtica a un senyal analògic. En concret, en el camp de la visió per computador, aquest senyal analògic correspon a un senyal de vídeo RGB. Es poden realitzar, doncs, transformacions puntuals en imatges en color en temps real. Va ser dissenyada amb l'objectiu d'oferir un sistema que permetés, a velocitat de vídeo, la conversió de l'espai RGB que donen les càmeres a qualsevol altre espai tricromàtic definit en termes dels components R,G i B.

L'entrada de la placa és un senyal de vídeo *RGB* més un senyal de sincronisme. La placa conté tres LUTs que són indexades, cada una d'elles, mitjançant un bus digital de 15 bits, 5 bits per cada un dels components *R*, *G* i *B*. Aquestes LUTs es carreguen inicialment amb els valors associats a l'espai de color que ha de ser utilitzat. Per exemple, si es vol utilitzar l'espai *HSI*, una LUT es carregarà amb els valors de to associats als possibles valors *R*, *G*, *B* que pot retornar la càmera, una altra LUT es carregarà amb els valors de la saturació i la tercera LUT es carregarà amb els valors corresponents a la intensitat. La sortida de la placa és també un senyal de vídeo *RGB* més un senyal de sincronisme, obtinguda a partir de la conversió digital/analògica dels valors retornats per les LUTs. Aquesta placa pot ser connectada a qualsevol PC amb un bus ISA. Per més informació sobre aquesta placa, es pot consultar la tesi de Batlle [Bat93].

Donat que aquesta placa no permet l'adquisició d'imatges, no pot ser utilitzada en la fase de caracterització dels colors, ja que per poder estimar les rectes cal tenir emmagatzemats els píxels corresponents a l'objecte del color que ha de ser caracteritzat. Per aquest motiu, en aquesta fase s'ha utilitzat una altra placa que sí permet l'adquisició d'imatges en color: la MVP de Matrox.

6.1.1.2 Placa MVP de Matrox

La placa MVP de Matrox és una placa d'adquisició i processat d'imatges en grisos o color. Té una memòria de 1024 per 1024 bytes que permet diverses configuracions. En el cas del processat d'imatges en color es configura com quatre plans de 512 per 512 píxels (amb un byte per píxel): un pla pel component vermell, un pel verd, un pel blau i un d'*overlay*. Aquesta placa, però, no ofereix les suficients prestacions pel processat d'imatges en color en temps real. En el nostre sistema ha estat utilitzada només en la fase de caracterització del color.

6.1.2 El sistema sencer

El sistema emprat en la validació del mètode de correcció proposat consta de dos mòduls: el mòdul de caracterització del color i càrrega de les LUTs (que s'executa només una vegada al principi) i el mòdul de processat en temps real (placa RTC). L'esquema del sistema sencer està il·lustrat a la figura 6.1.

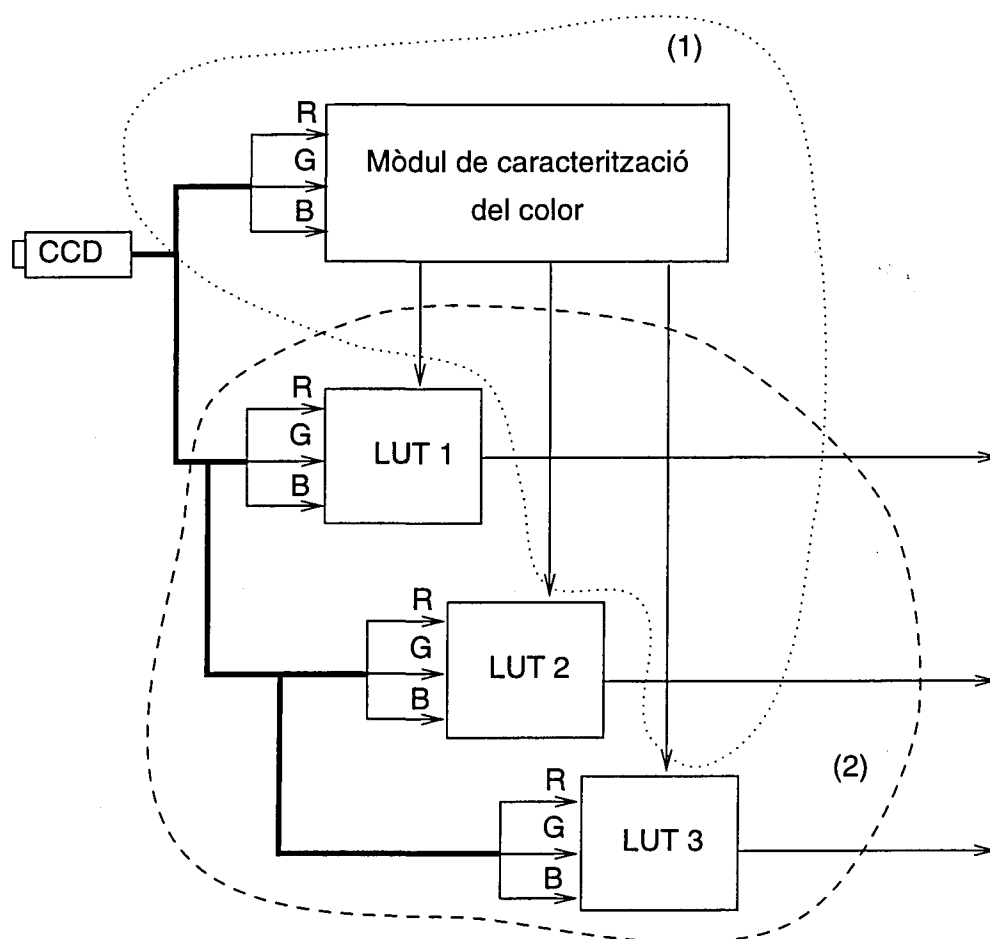


Figura 6.1: Esquema del sistema implementat. Assenyalada amb una línia de punts, la part del sistema implementada sobre la placa MVP de Matrox (caracterització) i, amb línia discontinua, la part implementada amb la placa específica de processat de color (processat en temps real).

6.1.2.1 Mòdul de caracterització del color i càrrega de les LUTs

En el submòdul de caracterització del color, el programa permet, per cada objecte amb el que es vol treballar, seleccionar una regió rectangular de la imatge que només contingui píxels d'aquest objecte, i sobre els píxels d'aquesta regió s'estimen les rectes corresponents.

A la figura 6.2 es pot veure la sortida del monitor connectat a la placa MVP. S'hi poden veure les rectes estimades, conjuntament amb els valors *RGB* en funció de la intensitat. Aquests valors corresponen als píxels que hi ha dins del rectangle de color blanc dibuixat sobre la imatge. Tal i com ha estat comentat al final del capítol precedent, per reduir l'error cal que les tres rectes passin el més aprop possible de l'origen. Per això, el programa desenvolupat permet, un cop mostrades aquestes rectes, que l'usuari modifiqui els paràmetres de la càmera (el guany, l'offset,...) per tal de que les rectes s'acostin el més possible a l'origen.

Un cop caracteritzats tots els colors amb els que es vol treballar, el submòdul de càrrega de les LUTs aplica l'algorisme descrit al capítol anterior (pàgina 136) per tal d'obtenir els valors RGB corregits associats als valors RGB reals retornats per la càmera.

El programa s'ha desenvolupat sobre una placa d'adquisició i processat d'imatges MVP de Matrox, però és fàcilment portable a qualsevol altra placa.

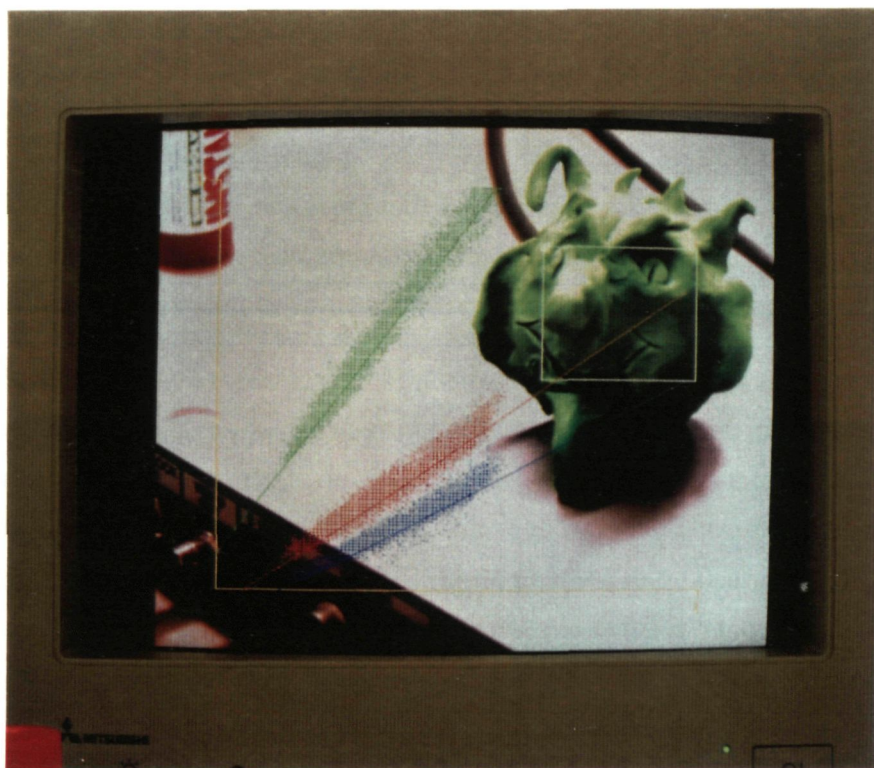


Figura 6.2: Fotografia de la sortida de la placa MVP durant el procés de caracterització d'un color. Les rectes han estat estimades a partir dels valors dels píxels de dins del rectangle de color blanc.

Tot i ser un mòdul bàsicament de software, el temps d'execució és acceptable si es té en compte que només s'ha d'executar una vegada al principi per cada un dels colors amb els que es vol treballar.

En l'etapa de caracterització del color, aquest temps varia en funció del tamany de la finestra i del número de píxels que hi ha dins de la finestra que han de ser processats. En diferents proves s'ha vist que el temps d'execució variava entre els 0.8" en finestres de 100×100 píxels fins als 3.5" en finestres de 250×250 píxels.

En el submòdul de càrrega de les LUTs, el temps d'execució varia en funció de les pendents de les rectes estimades en l'etapa anterior. En les proves que s'han fet en diferents colors, el temps ha anat entre els 3 segons en els casos més favorables fins als 8 segons en els casos més desfavorables (les mesures de temps s'han obtingut fent córrer els programes en un ordinador compatible PC amb un processador 80486DX a 33Mhz).

6.1.2.2 Mòdul de processat en temps real

Aquest mòdul ha estat implementat amb la placa RTC descrita anteriorment. Les LUTs es carreguen a partir dels valors obtinguts en el mòdul de caracterització del color. Es permet treballar de dues formes diferents:

Només correcció. Les LUTs es carreguen directament amb els valors RGB corregits, de forma que la sortida del sistema és la imatge que ofereix la càmera, però amb els píxels pertanyents als colors caracteritzats convenientment corregits.

Segmentació. Les LUTs es carreguen de forma que la sortida del sistema sigui una imatge amb els objectes ja segmentats. En aquest mode, el que es fa és definir per cada objecte els intervals de cada un dels tres components cromàtics que el defineixen. Per exemple, en el cas HSI, per cada color C_i es defineixen els intervals $[H_{min}^i, H_{max}^i]$, $[S_{min}^i, S_{max}^i]$, $[I_{min}^i, I_{max}^i]$ de forma que qualsevol valor (h, s, i) que caigui dins del sòlid definit pels tres intervals, serà considerat com a pertanyent al color C_i , i serà etiquetat com a tal.

6.2 Resultats obtinguts

Tot seguit es presenten i es comenten els resultats obtinguts amb l'aplicació del nostre mètode com a preprocessat per la segmentació d'imatges en color. Per cada sèrie d'imatges es mostren les imatges originals, les rectes estimades, les imatges un cop corregides i el resultat de la segmentació sobre les imatges originals i sobre les imatges corregides. En

la correcció del color, el radi del cilindre utilitzat en tots els casos ha estat de 10. La segmentació s'ha portat a terme bàsicament a partir d'interval de valors corresponents al to, utilitzant-se la saturació i la intensitat per eliminar el fons. L'elecció de l'interval de valors de to considerat s'ha fet a partir de l'histograma del to d'una de les imatges de la seqüència amb pocs píxels saturats.

En totes les sèries s'han corregit aquells píxels que tenien fins a dos components saturats. Per la sèrie *tren sencer* es mostra la comparació dels resultats obtinguts així i dels resultats obtinguts si es corregeixen els píxels amb només un component saturat.

Com a mesura quantitativa de la millora que presenta el mètode proposat es donen, per cada imatge, els percentatges P_o i P_c obtinguts de la següent manera:

$$P_o = \frac{N_o}{N_t} \times 100 \tag{6.1}$$

$$P_c = \frac{N_c}{N_t} \times 100 \tag{6.2}$$

on N_t correspon al número de píxels que corresponen a l'objecte (mesurats a mà), N_o correspon al número de píxels obtinguts de la segmentació de la imatge original i N_c correspon al número de píxels obtinguts de la segmentació de la imatge corregida.

Aquesta informació és complementada amb una gràfica que il·lustra el comportament d'aquest percentatge de píxels correctament segmentats respecte al percentatge de píxels que hi ha a cada imatge amb algun component saturat.

6.2.1 Conjunt d'imatges d'un tren

Aquesta sèrie correspon a imatges d'un tren adquirides variant la intensitat de l'illuminant. Es tracta d'un tren de joguina de plàstic tou (no brillant) format, tal i com es veu a les imatges que es mostren tot seguit, per una màquina de color rosat, per un vagó de passatgers de color verd clar i per un vagó de càrrega de color blau clar.

6.2.1.1 Conjunt d'imatges de la Màquina

La imatge superior de la figura 6.3 mostra les dotze imatges que han estat adquirides variant la intensitat de l'illuminant. Per referències posteriors, s'han etiquetat aquestes imatges de la a a la l segons el següent quadre*:

*De les dotze imatges, la imatge a és la que ha estat adquirida amb la intensitat de l'illuminant més alta i la imatge l correspon a la imatge adquirida amb la intensitat més baixa. Aquesta ordenació serà la mateixa per totes les seqüències d'imatges que es mostren en aquest capítol.

a	b	c	d
e	f	g	h
i	j	k	l

En el mòdul de caracterització, les rectes estimades foren:

$$\begin{aligned}R &= 1.84t - 0.02 \\G &= 0.57t + 0.03 \\B &= 0.60t + 0.02\end{aligned}\tag{6.3}$$

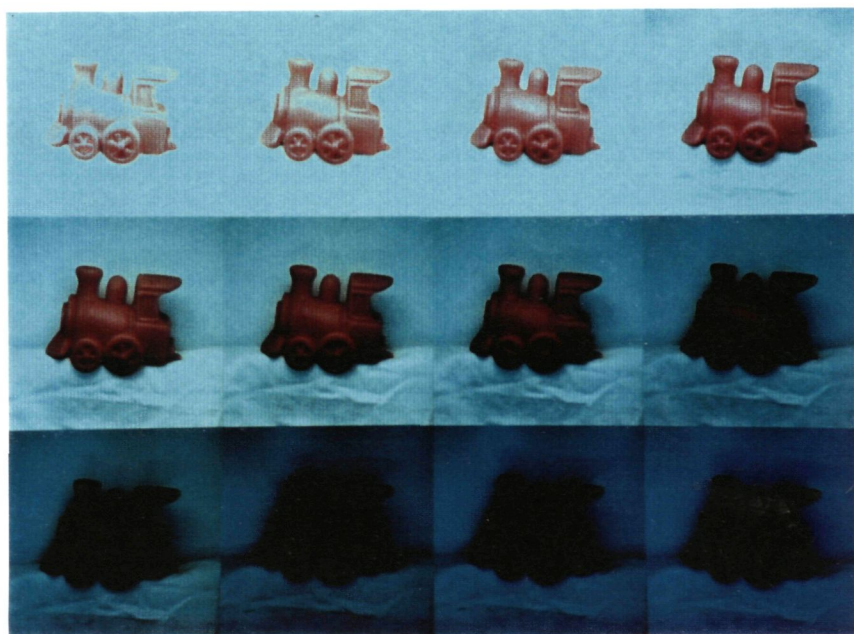
Les imatges obtingudes un cop feta la correcció corresponen a les que es mostren a la part inferior de la figura 6.3. Com pot observar-se, la intensitat en els píxels que han estat corregits ha disminuït — degut a que s'ha multiplicat els valors *RGB* per una constant inferior a 1 —, però la informació cromàtica s'ha mantingut. Aquest efecte és visible a totes sèries d'imatges estudiades.

El resultat de la segmentació de la màquina de tren és il·lustrat a la figura 6.4. A la part de dalt es mostra la segmentació realitzada sobre les 12 imatges originals i a la part de baix es mostra la segmentació realitzada sobre les 12 imatges corregides. En totes les imatges s'han considerat com a píxels de la màquina aquells amb un valor del *to* entre 245 i 5 (considerant que el rang de valors del *to* es troba entre 0 i 255). Aquest interval s'ha obtingut a partir de l'histograma del *to* de la imatge *e*.

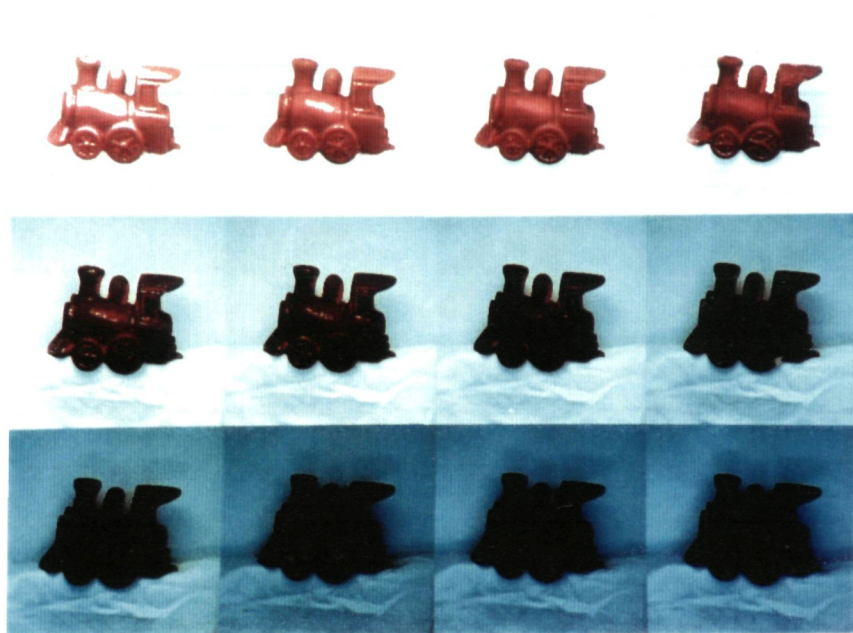
A la taula 6.1 es mostren les mesures realitzades sobre els resultats de les segmentacions. Els percentatges de píxels segmentats estan calculats respecte a la segmentació *ideal* feta a mà. També es donen els percentatges de píxels amb només un component saturat, amb només dos components saturats i amb tres components saturats abans i després de la correcció.

Observant les imatges de la figura 6.4 s'aprecia una millora qualitativa en les quatre primeres imatges. En les vuit restants pràcticament no hi ha diferències en els resultats de la segmentació sobre les imatges originals i sobre les imatges corregides, degut a que el nombre de píxels amb components saturats és pràcticament zero.

La figura 6.5 compara el percentatge de píxels segmentats respecte al percentatge de píxels amb algun component saturat, abans i després de la correcció del color. Tal i com es pot veure observant aquesta figura i els números presentats a la taula 6.1, en aquesta seqüència d'imatges no es passa de més d'un 25% de píxels amb algun component saturat i, la diferència en el percentatge de píxels segmentats només és significativa en les quatre

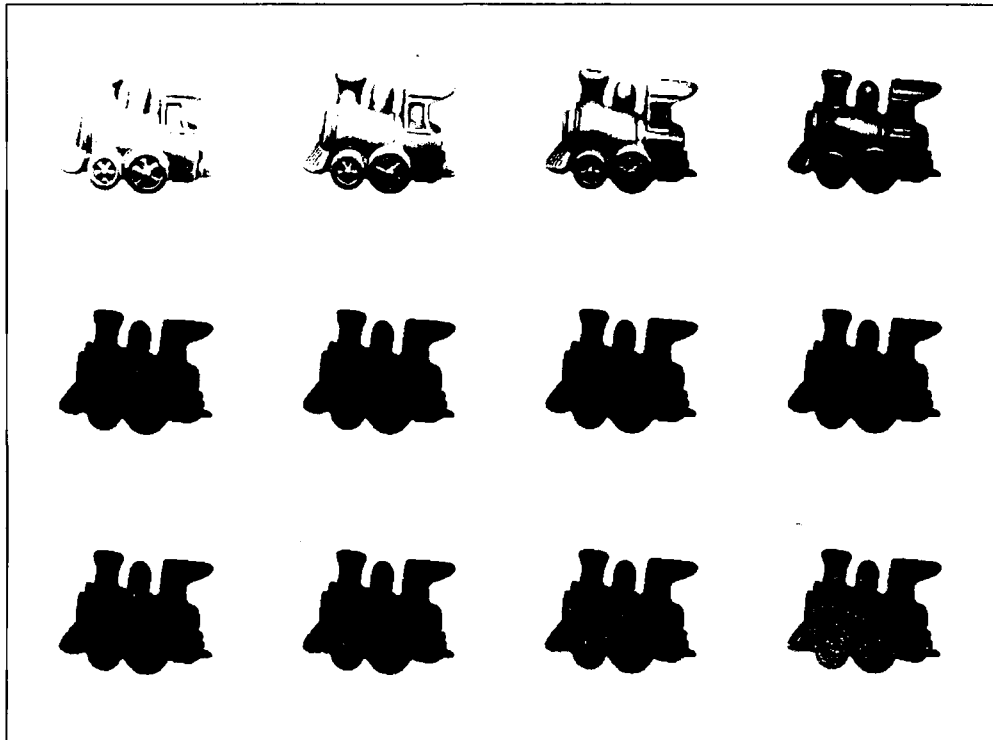


Original

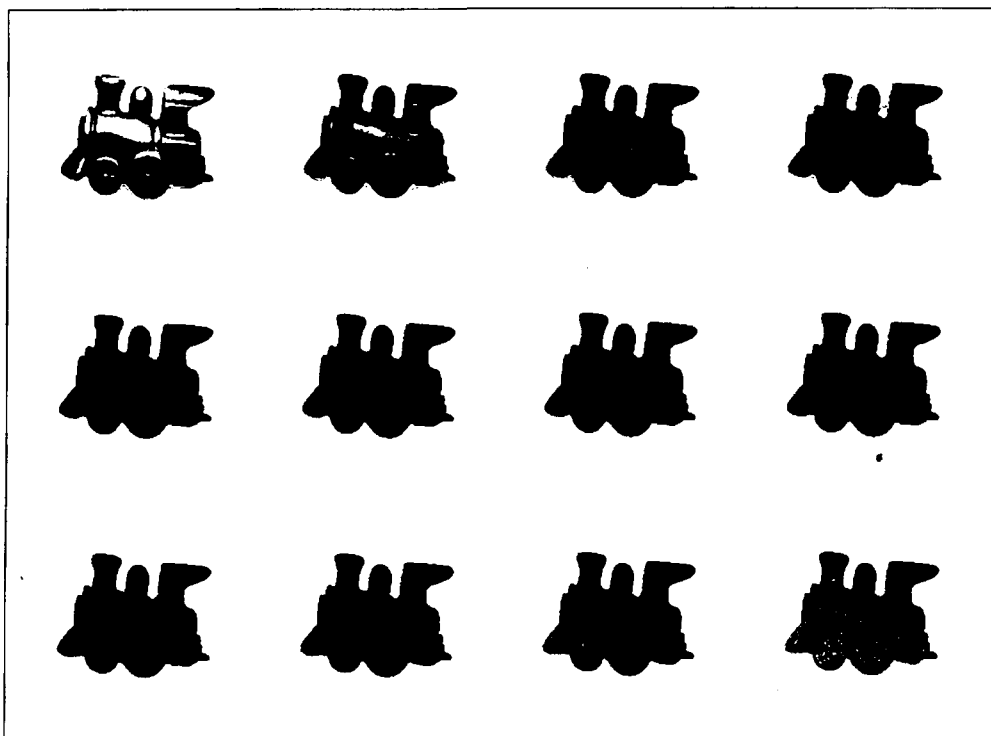


Corregida

Figura 6.3: Imatges originals (dalt) i corregides (baix) corresponents a la sèrie màquina.



Abans de corregir



Després de corregir

Figura 6.4: Segmentació corresponent a les imatges originals (dalt) i a les corregides (baix) corresponents a la sèrie màquina.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	23.1	83.0	22.7	6.5	0.5	0.5	0.5	0.5	23.7	7.5
b	46.7	98.0	21.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	21.3	1.7
c	69.7	98.0	18.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	0.2
d	94.4	99.8	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.2	0.0
e	99.7	99.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
f	99.9	99.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
g	99.7	99.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
h	99.6	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	99.6	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	99.7	99.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k	99.2	98.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	98.3	98.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.1: Mesures sobre el resultat de la segmentació de les imatges de la seqüència *màquina*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

primeres imatges, quan els píxels saturats són el 10% o més, que corresponen a les imatges en les que visualment s'observava una major diferència.

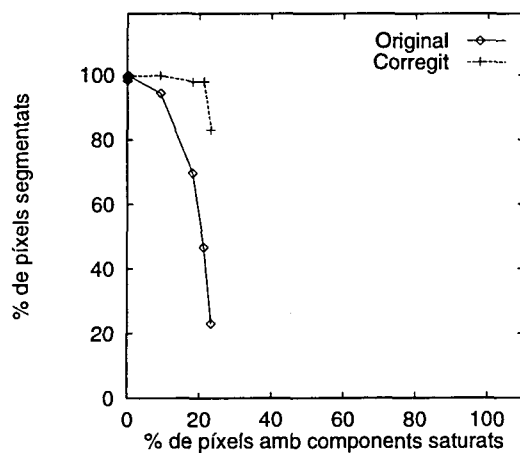


Figura 6.5: Comparació del percentatge de píxels segmentats abans i després de la correcció del color, respecte al percentatge de píxels saturats en la imatge original, per la sèrie màquina.

6.2.1.2 Conjunt d'imatges d'un *Vagó verd*

La figura 6.6 mostra les dotze imatges del vagó verd adquirides variant la intensitat de l'il·luminant, conjuntament amb les imatges un cop corregides a partir de les rectes estimades (que es mostren a l'equació 6.4).

Les rectes estimades en el mòdul de caracterització foren:

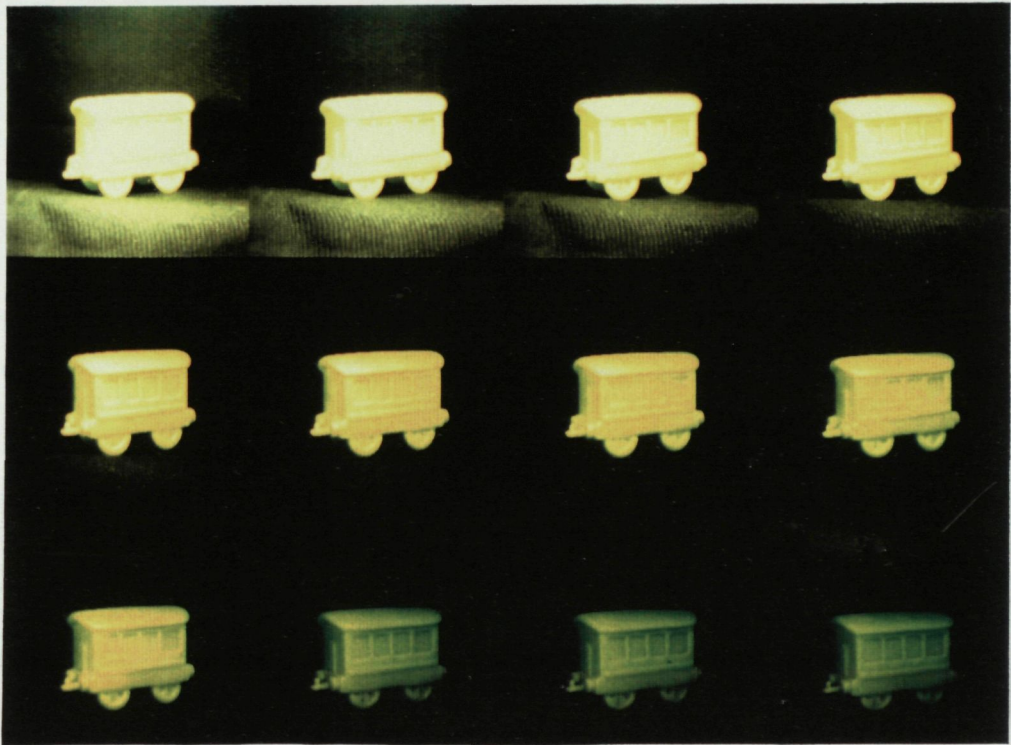
$$\begin{aligned}
 R &= 0.64t + 0.03 \\
 G &= 2.13t - 0.04 \\
 B &= 0.23t + 0.02
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

i l'interval de to considerat ha estat [70, 85], obtingut a partir de la imatge *e*.

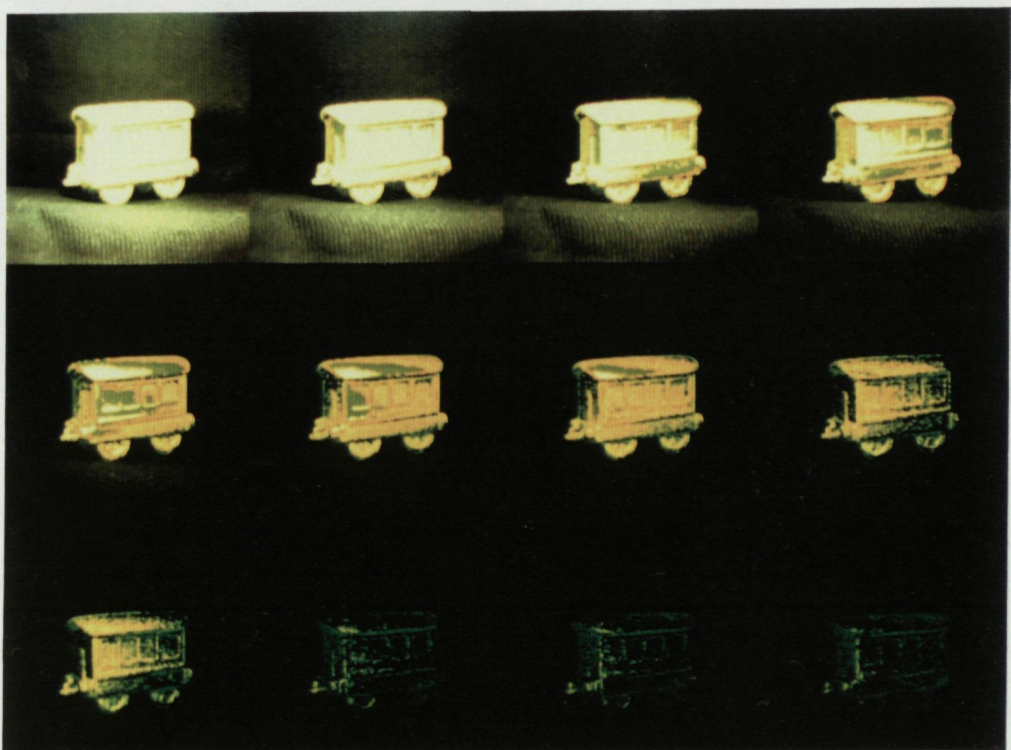
Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	0.1	12.0	0.7	0.4	23.0	10.2	74.3	74.3	98.0	84.9
b	0.1	17.3	1.5	0.9	36.4	17.9	57.5	57.5	95.4	76.4
c	0.3	29.4	2.9	1.9	48.8	19.4	39.0	39.0	90.7	60.3
d	1.7	40.6	6.1	4.1	57.5	18.9	15.9	15.9	79.4	38.9
e	6.0	51.4	12.1	7.5	44.2	6.3	2.7	2.7	59.0	16.6
f	12.6	43.9	16.3	10.5	26.0	2.5	0.8	0.8	43.2	13.8
g	22.0	42.6	19.7	12.5	11.8	0.8	0.3	0.3	31.9	13.6
h	45.0	62.8	20.9	7.8	1.7	0.1	0.0	0.0	22.7	7.8
i	64.6	76.0	19.8	6.5	0.2	0.0	0.0	0.0	20.0	6.5
j	99.1	99.0	2.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.3
k	99.0	98.8	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.1
l	98.7	98.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1

Taula 6.2: Mesures sobre el resultat de la segmentació de les imatges de la seqüència *vagó verd*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

Si s'observen els resultats de la segmentació sobre les imatges originals i les imatges corregides que es mostren a la figura 6.7, es veu que hi ha diferències significatives en les 8 primeres imatges, que corresponen, tal i com es pot veure a la taula 6.2, a imatges on hi ha més d'un 10% dels píxels corresponents al vagó verd amb algun component saturat. En aquesta seqüència hi han tres imatges (les tres primeres) amb més d'un 90 % de píxels amb algun component saturat, cosa que provoca que els resultats de la segmentació siguin molt pobres en les imatges originals (entre un 0.1% i un 0.3 %) i bastant pobres en les

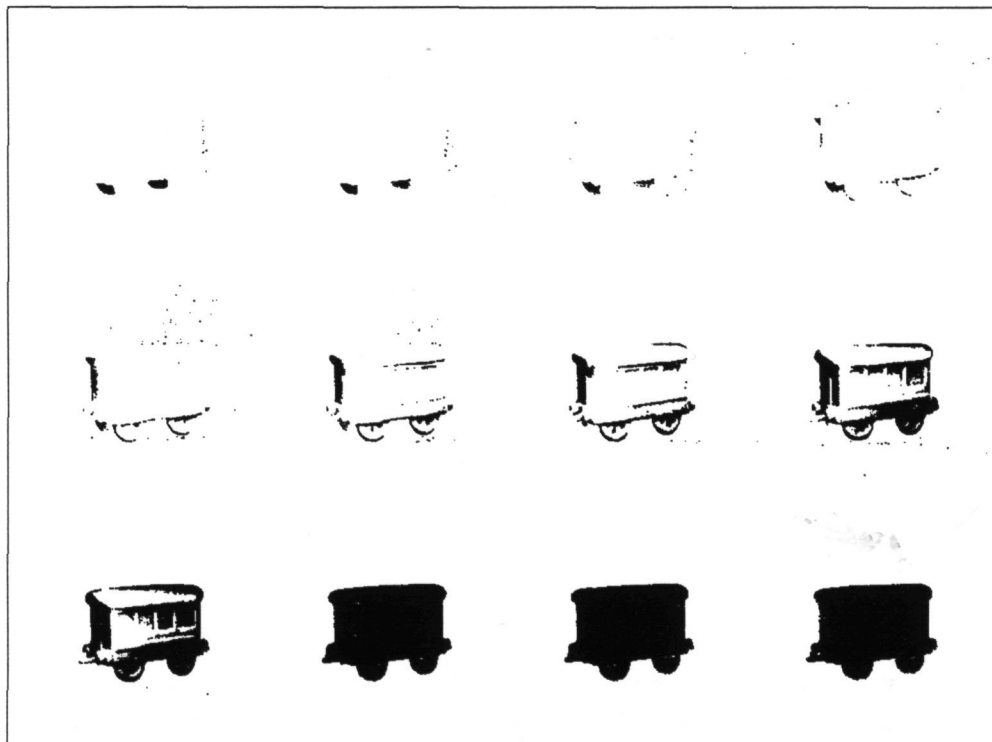


Original

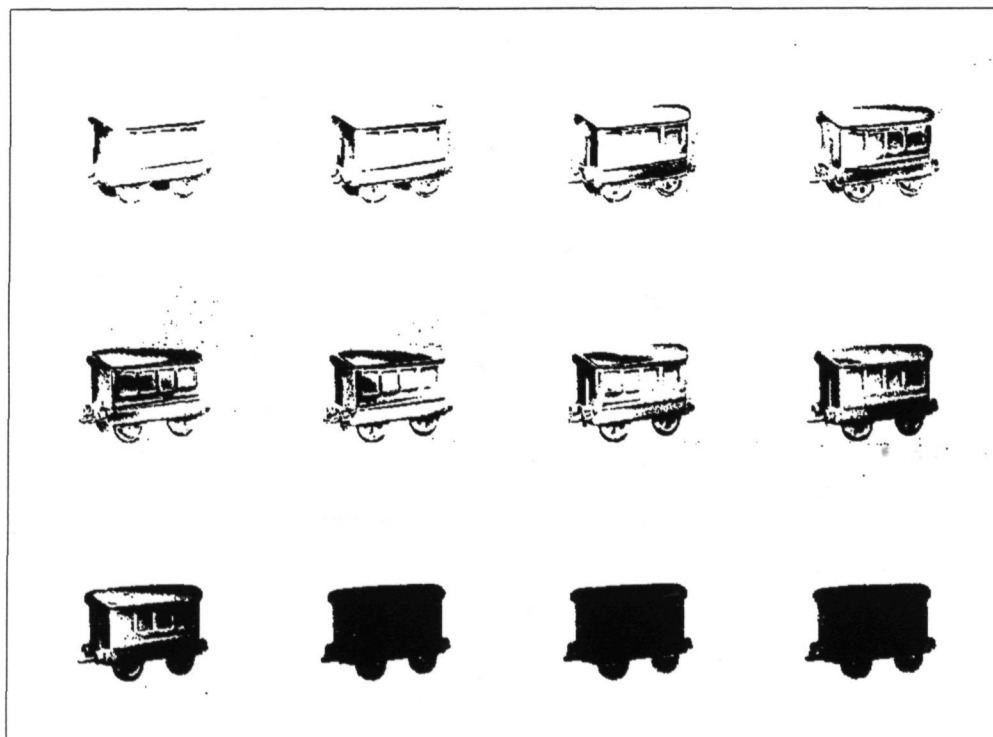


Corregida

Figura 6.6: Imatges originals (dalt) i corregides (baix) corresponents a la sèrie vagó verd.



Abans de corregir



Després de corregir

Figura 6.7: Segmentació corresponent a les imatges originals (dalt) i a les corregides (baix) corresponents a la sèrie *vagó verd*.

corregides (entre un 12.0 % i un 30%). No és fins a la desena imatge (amb només un 2.7% de píxels amb un algun component saturat) que els resultats de la segmentació són òptims, tan en el cas de les imatges originals com en les imatges corregides.

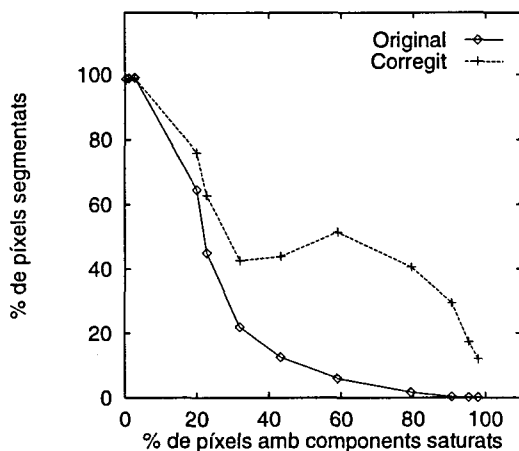


Figura 6.8: Comparació del percentatge de píxels segmentats abans i després de la correcció del color, respecte al percentatge de píxels saturats en la imatge original, per la sèrie *vagó verd*.

6.2.1.3 Conjunt d'imatges d'un *Vagó blau*

Les dotze imatges adquirides pertanyents a aquesta seqüència es mostren a la figura 6.9, conjuntament amb les imatges corregides utilitzant les rectes que es mostren a l'equació 6.5

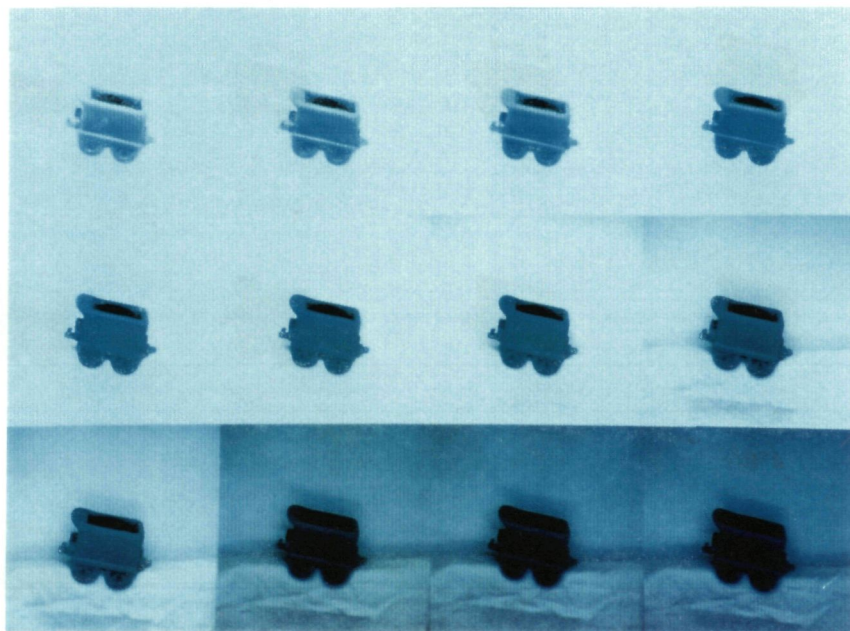
Les rectes obtingudes en el mòdul de caracterització són:

$$\begin{aligned}R &= 0.40t + 0.01 \\G &= 1.21t + 0.00 \\B &= 1.38t - 0.08\end{aligned}\tag{6.5}$$

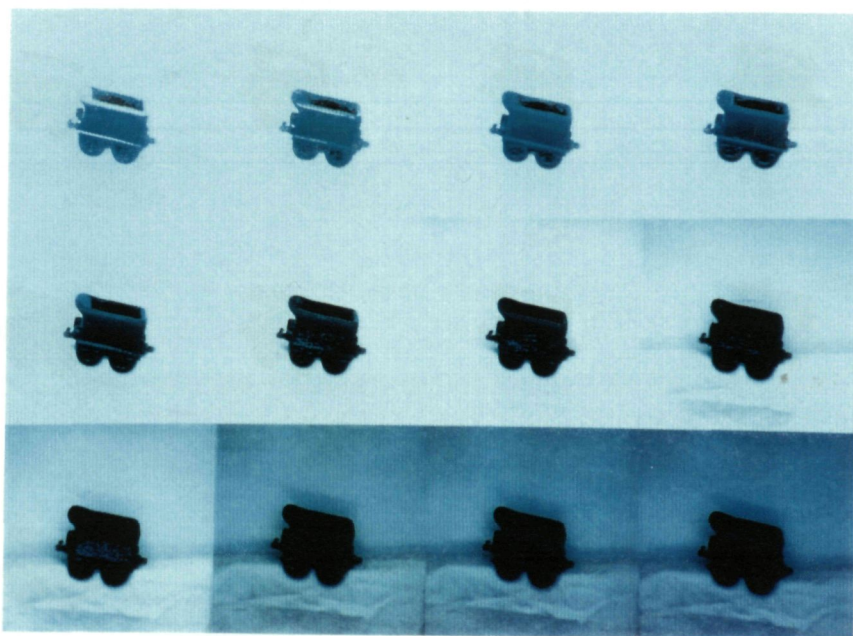
i l'interval de t considerat ha estat de $[125, 150]$, obtingut a partir de la imatge e .

D'aquesta seqüència, el que és significatiu és que només s'observen diferències importants en les tres primeres imatges i , a més, observant la figura 6.11 es veu que la quantitat de píxels correctament segmentats és molt alta, tot i que la quantitat de píxels saturats també és alta: per exemple, amb un 58.8% de píxels saturats, es segmenten correctament sobre la imatge original un 77.9% de píxels.

Per explicar el fet anterior cal observar l'equació 6.5 que expressa les rectes estimades: la pendent de les rectes associades als components G i B són semblants, i l'associada al component R és diferent i més petita. És a dir, el component del t_0 depèn molt més del component verd i blau que del vermell i , a més, les proporcions de verd i blau que formen el color són similars. Quan, degut a l'increment en la intensitat de l'il·luminant, en un píxel queden saturats els components verd i blau (tots dos agafen el valor 255), les proporcions entre els dos són pràcticament les mateixes que si no estessin saturats i , com que el component vermell s'incrementa molt més lentament, el component del t_0 es modifica molt lentament. Aquest mateix comportament s'observa en la pilota groga de la sèrie *pilotes* (figura 6.18.c i en el cotxe cian de la sèrie *cotxes* (figura 6.25.c).

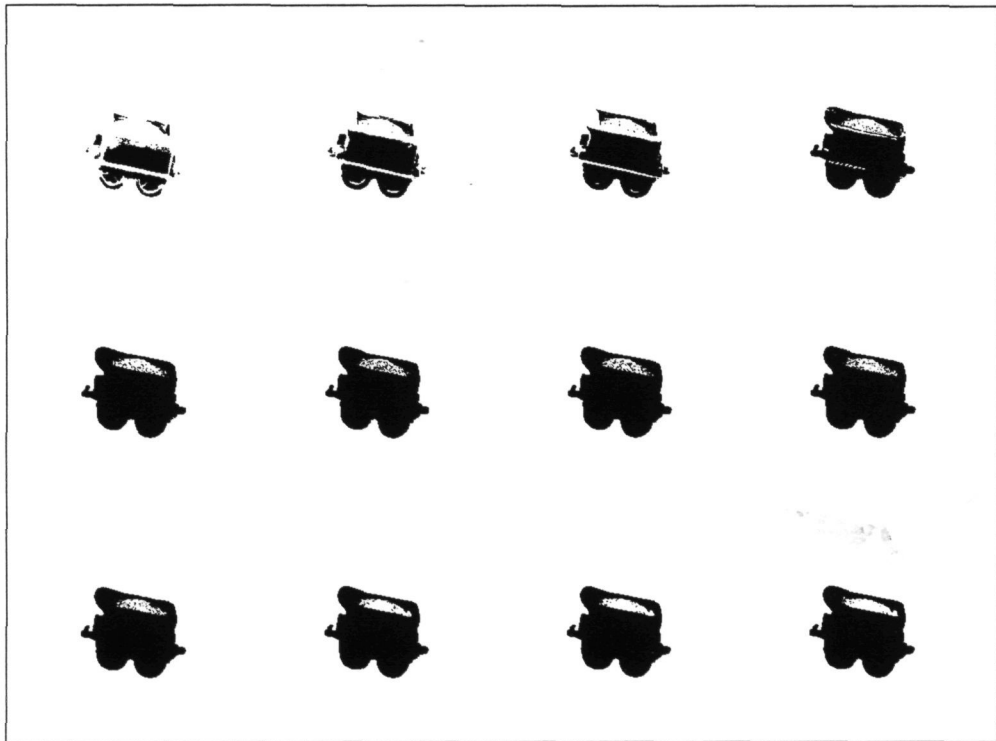


Original

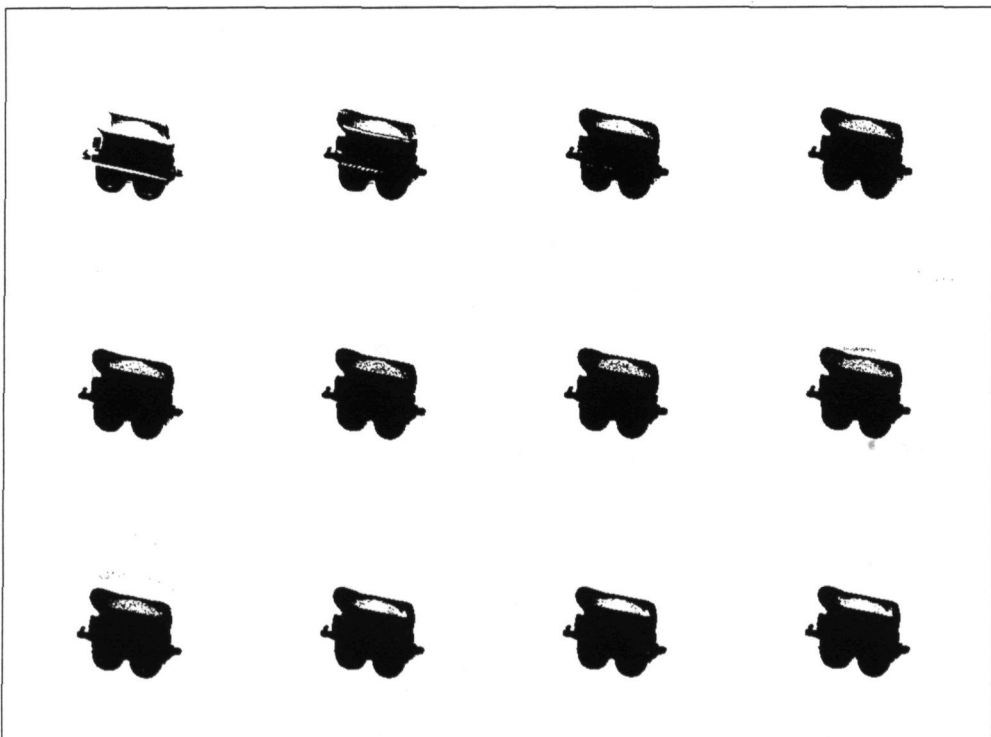


Corregida

Figura 6.9: Imatges originals (dalt) i corregides (baix) corresponents a la sèrie vagó blau.



Abans de corregir



Després de corregir

Figura 6.10: Segmentació corresponent a les imatges originals (dalt) i a les corregides (baix) corresponents a la sèrie *vagó blau*.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	43.4	79.1	0.6	0.2	87.6	12.3	8.1	8.1	96.4	20.6
b	67.9	92.3	1.4	0.2	87.7	5.9	1.0	1.0	90.1	7.0
c	77.9	97.4	8.0	0.4	50.8	1.1	0.1	0.1	58.8	1.6
d	92.6	97.8	4.2	0.6	20.1	0.0	0.0	0.0	24.2	0.6
e	97.2	97.3	1.0	0.2	1.2	0.0	0.0	0.0	2.2	0.2
f	97.8	97.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
g	98.0	98.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
h	98.2	98.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	98.7	98.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	99.2	99.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k	99.2	99.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	99.1	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.3: Mesures sobre el resultat de la segmentació de les imatges de la seqüència *vagó blau*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

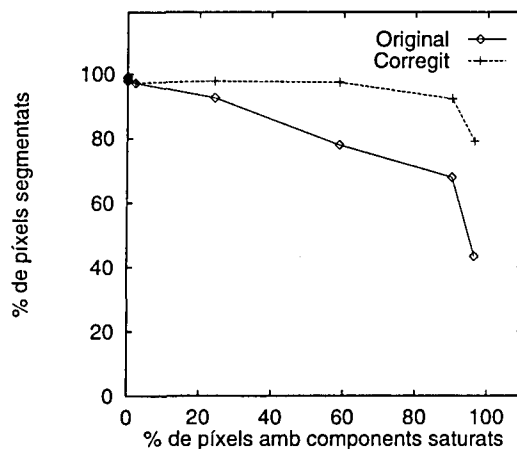


Figura 6.11: Comparació del percentatge de píxels segmentats abans i després de la correcció del color, respecte al percentatge de píxels saturats en la imatge original, per la sèrie *vagó blau*.

6.2.1.4 Conjunt d'imatges del *Tren sencer*

Després de mostrar exemples que treballen amb un sol objecte, les sèries que segueixen contenen exemples amb més d'un objecte. En aquest cas, s'han adquirit imatges del tren sencer: és a dir, amb la màquina, el vagó verd i el vagó blau. Les imatges originals i les corregides a partir de les rectes de l'equació 6.6 es mostren a la figura 6.12.

Les rectes estimades foren:

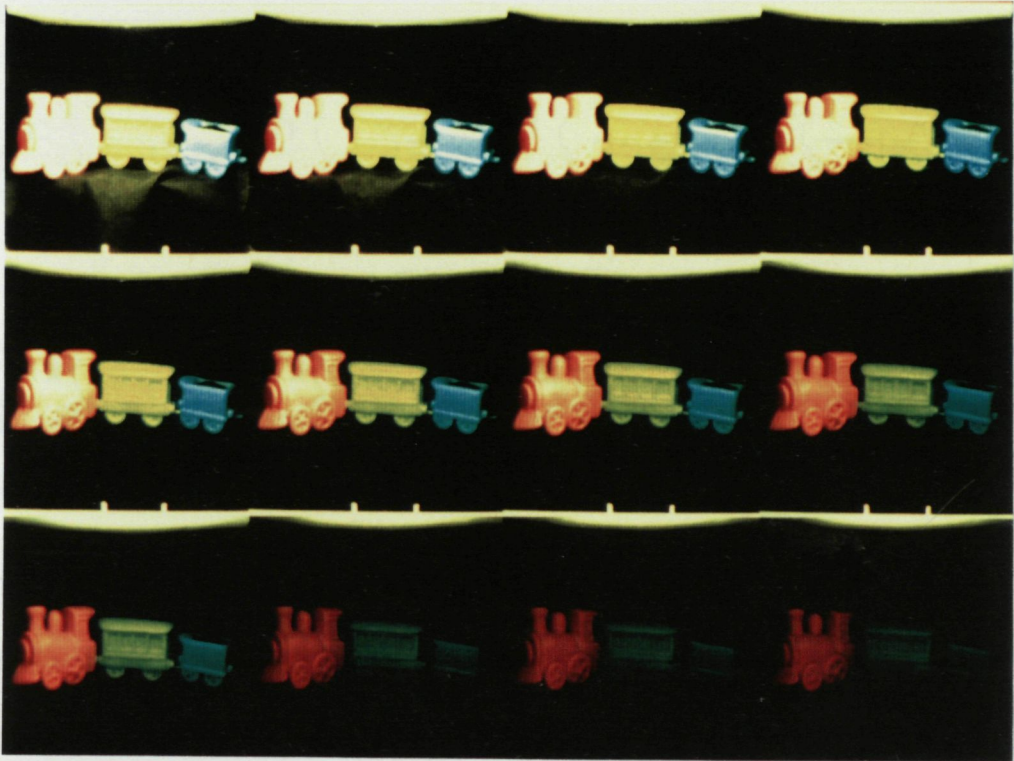
$$\begin{array}{lll}
 \text{Màquina} & \text{Vagó verd} & \text{Vagó blau} \\
 R = 1.62t - 0.02 & R = 0.62t + 0.05 & R = 0.30t + 0.04 \\
 G = 0.78t + 0.01 & G = 2.12t - 0.12 & G = 1.40t - 0.02 \\
 B = 0.61t + 0.02 & B = 0.26t + 0.07 & B = 1.30t + 0.00
 \end{array} \quad (6.6)$$

Els intervals de t_0 utilitzats per la segmentació han estat: [250, 15] per la màquina, [70, 85] pel vagó verd i [120, 140] pel vagó blau (intervals obtinguts a partir de la imatge i). Les taules 6.4, 6.5 i 6.6 contenen els percentatges de píxels correctament segmentats abans i després de corregir la imatge, corresponents a la màquina, al vagó verd i al vagó blau, respectivament.

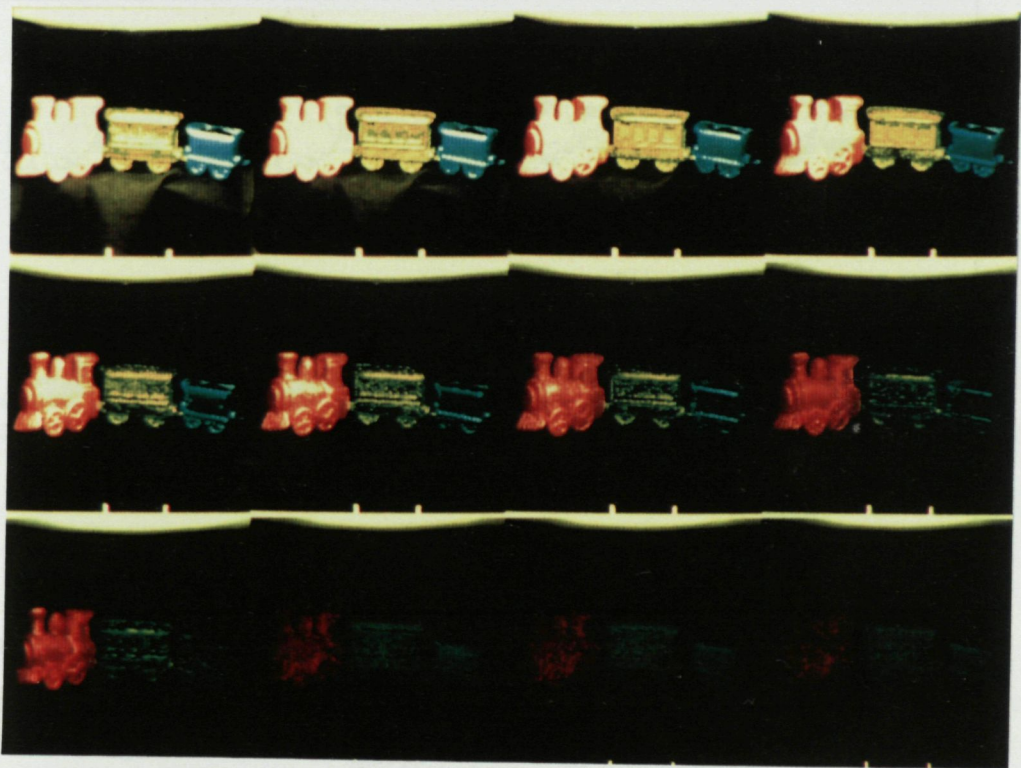
Observant la figura 6.13 es pot observar que, per les quatre imatges de la fila superior, les diferències més evidents entre la segmentació d'abans i després de la correcció es donen en el vagó verd, mentre que el vagó blau pràcticament no varia (pel mateix motiu que s'ha comentat a la sèrie *vagó blau*) i pel que respecte a la màquina, les diferències comencen a apreciar-se a partir de la tercera imatge.

Les figures 6.14.a, 6.14.b i 6.14.c mostren un comportament que no s'havia observat en les sèries anteriors: quan es tendeix cap al 0% per cent de píxels amb algun component saturat el percentatge de píxels correctament segmentats decreix, en comptes d'augmentar o mantenir-se estable. Això és especialment significatiu en el cas del vagó blau, que acaba amb un percentatge de píxels segmentats del 41% en la imatge l . Aquest efecte és degut a la inestabilitat del t_0 en regions de les imatges amb uns valors dels components *RGB* molt baixos (problema comentat per diversos autors, com per exemple recentment Perez i Koch [PK94]). Aquest efecte passa tant a les imatges originals com a les corregides, essent les diferències entre els percentatges de píxels correctament segmentats d'aproximadament mig punt.

Píxels amb només un component saturat. Si en comptes de corregir els píxels que tenen fins a dos components saturats només es corregeixen els píxels amb un sol component saturat, els resultats no són tan bons, tal i com es comenta tot seguit.

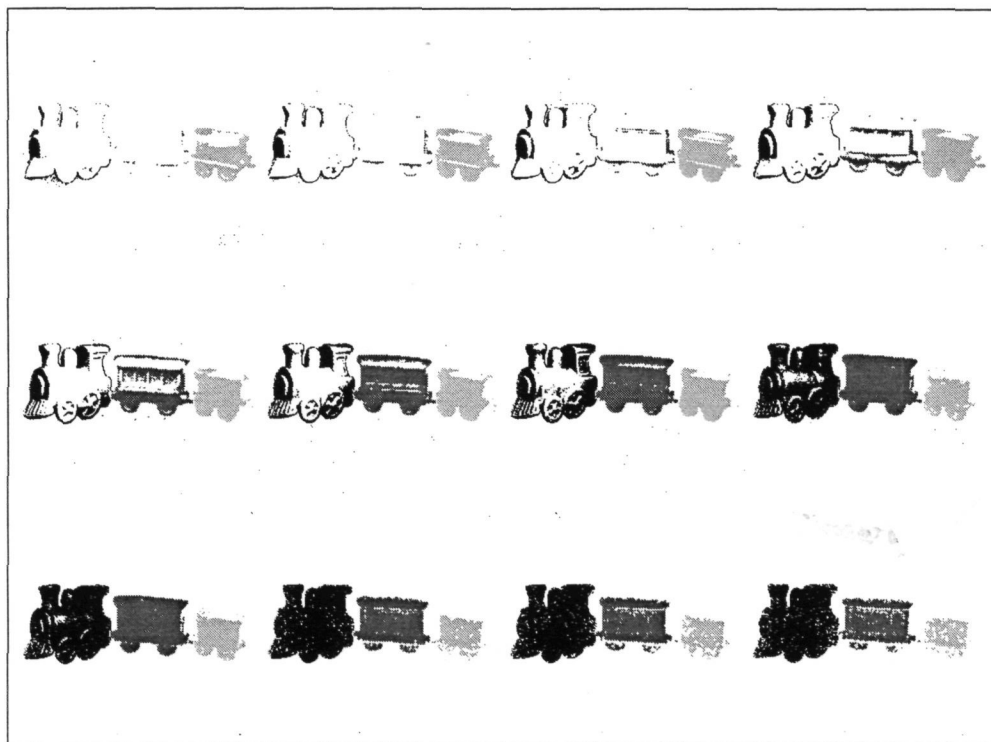


Original

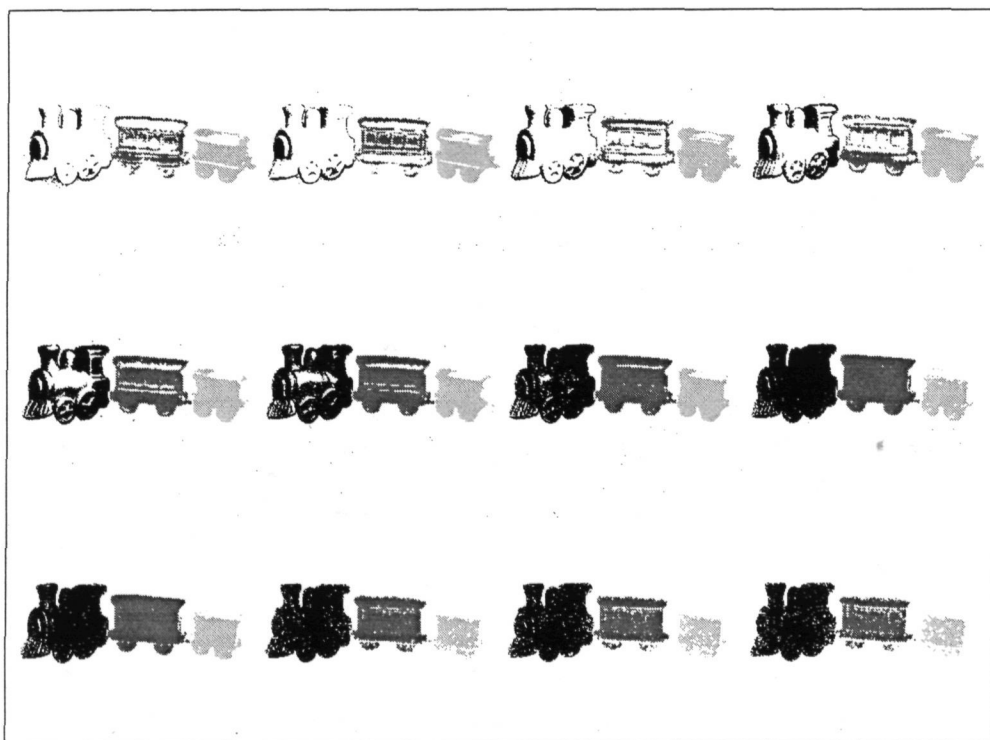


Corregida

Figura 6.12: Imatges originals (dalt) i corregides (baix) corresponents a la sèrie *tren sencer*.



Abans de corregir



Després de corregir

Figura 6.13: Segmentació corresponent a les imatges originals (dalt) i a les corregides (baix) corresponents a la sèrie *tren sencera*.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	8.1	13.4	3.3	1.7	3.3	3.1	77.4	77.4	84.0	82.2
b	10.6	16.8	4.0	2.1	6.2	5.9	68.9	68.9	79.1	77.0
c	14.1	24.2	5.3	2.4	9.5	8.6	57.7	57.7	72.6	68.7
d	19.3	38.1	7.7	3.0	15.1	14.1	37.0	37.0	59.9	54.1
e	32.0	67.7	12.5	2.1	18.1	16.0	7.7	7.7	38.3	25.8
f	41.4	83.0	14.4	2.2	7.7	7.1	0.9	0.9	23.1	10.2
g	54.8	93.2	13.4	0.9	1.0	0.9	0.0	0.0	14.4	1.8
h	84.7	96.4	8.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	0.1
i	91.5	94.2	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0
j	93.0	92.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k	91.8	91.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	90.3	90.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.4: Mesures sobre el resultat de la segmentació de la màquina a les imatges de la seqüència *tren sencer*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	2.0	50.7	6.3	2.9	60.5	15.5	13.6	13.6	80.4	32.0
b	4.9	50.5	11.0	6.5	45.5	8.1	6.0	6.0	62.5	20.6
c	11.2	40.7	16.4	9.3	23.4	4.1	2.0	2.0	41.8	15.3
d	29.5	52.2	19.6	9.0	7.2	1.2	0.3	0.3	27.1	10.5
e	61.9	86.0	19.3	4.5	0.7	0.0	0.0	0.0	20.0	4.5
f	86.7	92.6	16.6	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	16.6	3.1
g	95.9	96.8	12.2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	12.2	1.8
h	98.1	97.9	4.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.3
i	97.0	96.6	1.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.1
j	83.0	82.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k	78.3	76.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	72.8	73.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.5: Mesures sobre el resultat de la segmentació del vagó verd a les imatges de la seqüència *tren sencer*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	70.3	78.8	0.4	0.2	73.3	7.1	7.8	7.8	81.5	15.1
b	82.4	86.2	0.5	0.3	73.9	5.0	2.8	2.8	77.1	8.1
c	86.5	89.7	0.9	0.4	69.1	3.1	0.2	0.2	70.1	3.7
d	89.0	89.0	1.2	0.4	55.5	0.1	0.0	0.0	56.7	0.4
e	77.4	77.5	2.2	0.3	14.1	0.0	0.0	0.0	16.3	0.4
f	79.2	79.0	1.0	0.4	5.7	0.0	0.0	0.0	6.7	0.4
g	76.4	76.7	0.7	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	1.2	0.4
h	62.2	62.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	66.9	66.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	51.3	51.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k	47.4	47.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	41.1	41.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.6: Mesures sobre el resultat de la segmentació del vagó blau a les imatges de la seqüència *tren sencer*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

La figura 6.15 compara els resultats de la segmentació quan s'han corregit els píxels que tenen com a màxim dos components saturats amb els resultats aconseguits quan s'han corregit només els píxels amb un component saturat com a màxim. Tal i com es pot observar, la diferència més significativa es veu en l'objecte de color verd. En la màquina els efectes no són tan notables degut a que hi ha pocs píxels que tinguin exactament dos components saturats (si es mira la taula 6.4 es veu que el màxim es troba a la imatge *e* amb un 18.1%). En el vagó de passatgers, en canvi, en les tres primeres imatges hi ha un 60.5%, un 45.5% i un 23.4% de píxels amb exactament dos components saturats (taula 6.5), i tots aquests píxels no seran corregits si només es tenen en compte aquells que tenen com a màxim un component saturat. En el cas del vagó de càrrega, tot i tenir un percentatge de píxels amb exactament dos components saturats més gran que el vagó verd, els resultats de la segmentació són semblants degut a l'efecte que ja ha estat comentat abans dins de la sèrie *vagó blau*.

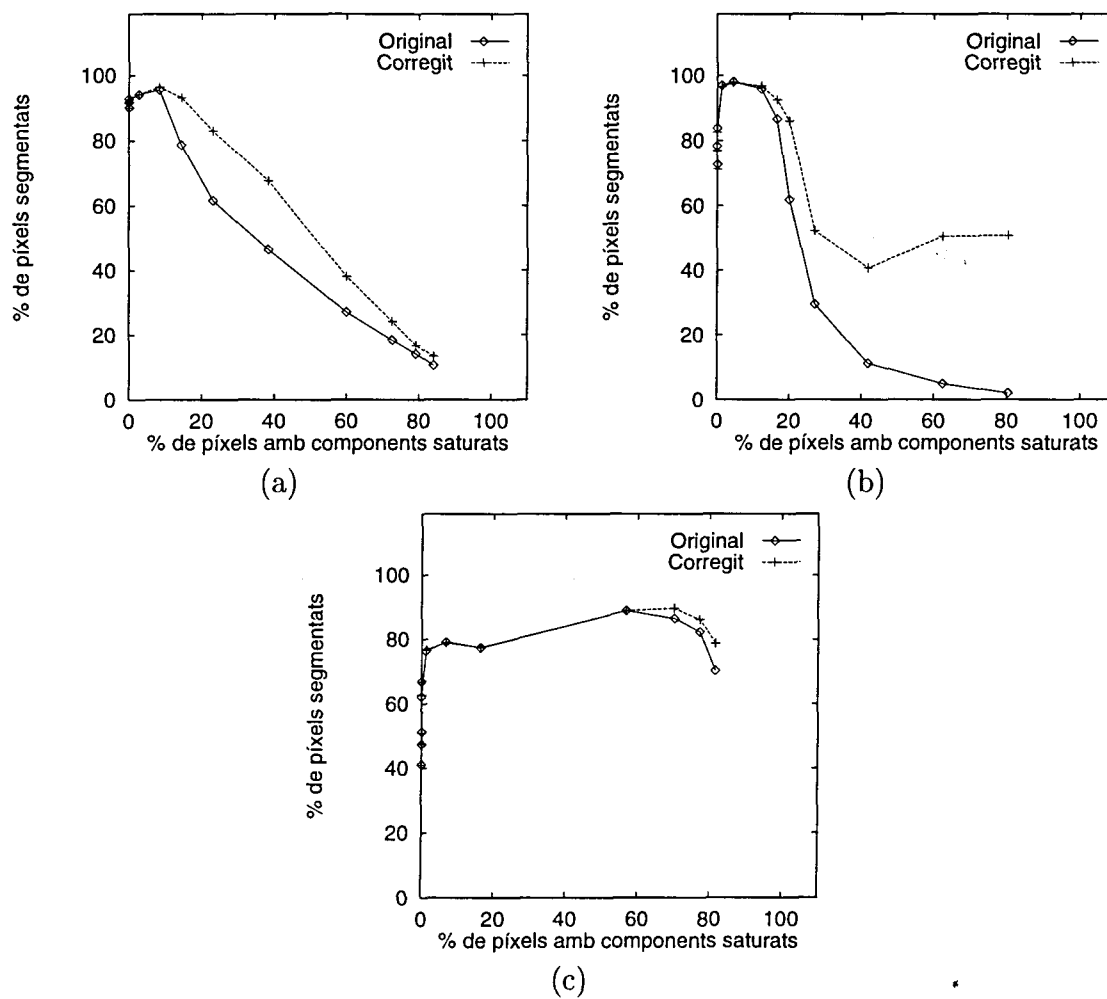


Figura 6.14: Comparació del percentatge de píxels segmentats abans i després de la correcció del color, respecte al percentatge de píxels saturats en la imatge original, de la sèrie *tren sencer*. Màquina (a), vagó passatgers (b), vagó càrrega (c).

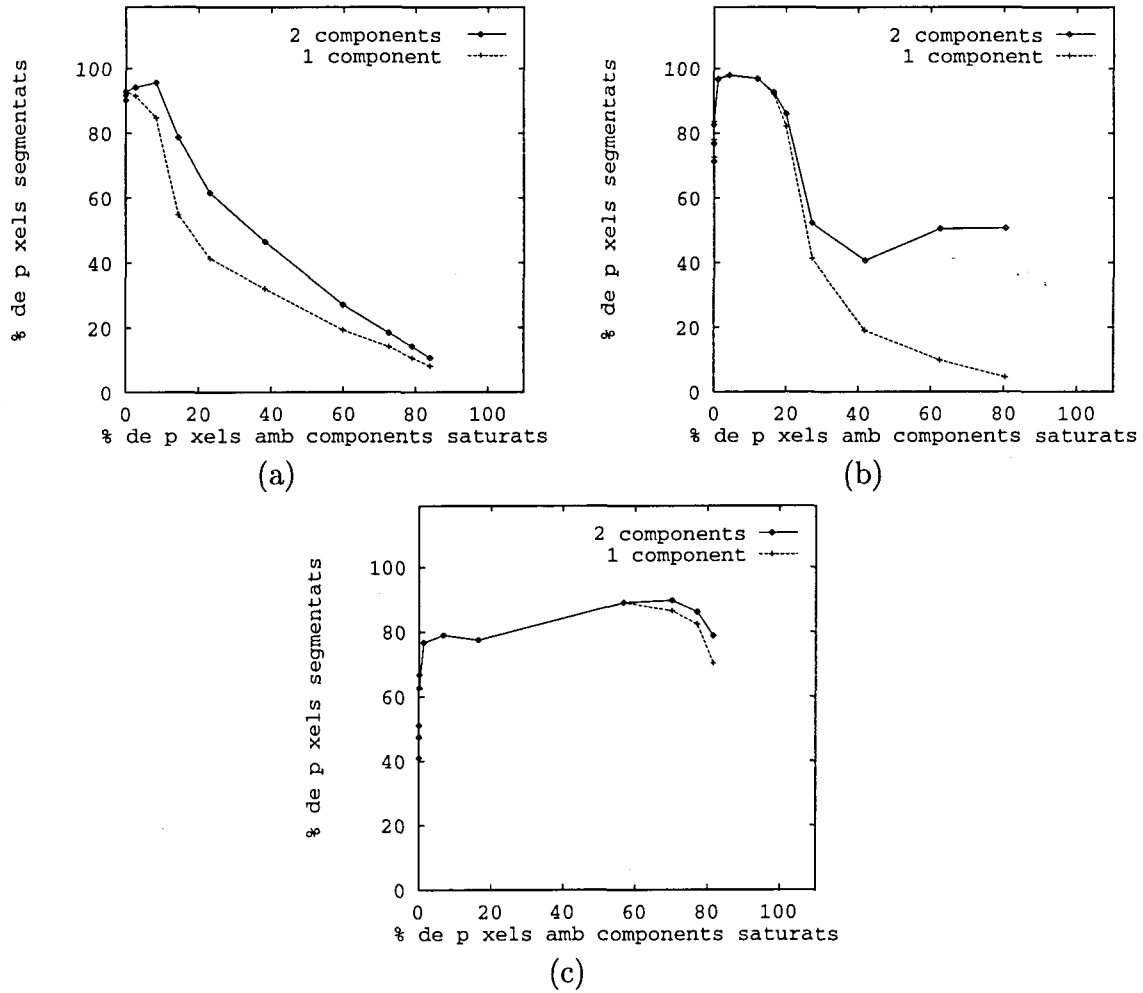


Figura 6.15: Comparació del percentatge de píxels segmentats quan s'han corregit els píxels amb com màxim 2 components saturats o els píxels amb com a màxim un component saturat, de la sèrie *tren sencer*. Màquina (a), vagó passatgers (b), vagó càrrega (c).

6.2.2 Conjunt d'imatges d'unes *pilotes*

En aquesta sèrie les imatges adquirides corresponen a tres pilotes de goma de color taronja, lila i groc. Les imatges adquirides i la seva correcció aplicant les rectes de l'equació 6.7 es mostren a la figura 6.16.

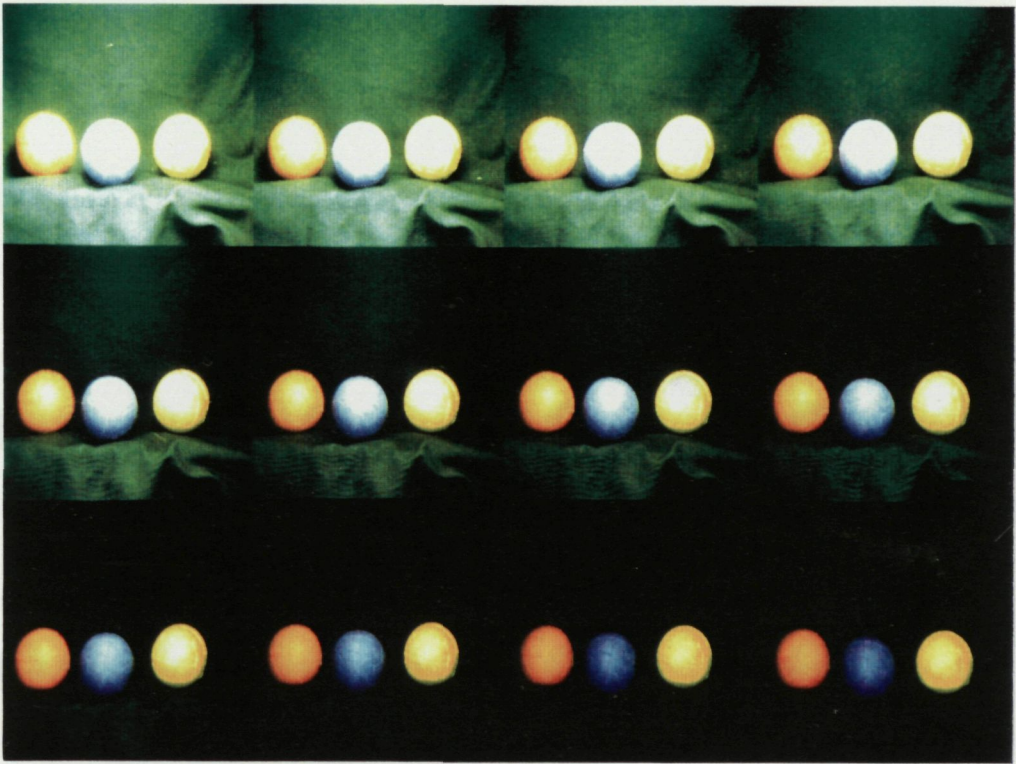
Les rectes obtingudes en el procés de caracterització del color són:

Pilota taronja	Pilota blava	Pilota groga	
$R = 2.01t - 0.04$	$R = 0.76t + 0.02$	$R = 1.26t + 0.02$	(6.7)
$G = 0.75t + 0.04$	$G = 0.71t + 0.01$	$G = 1.48t - 0.03$	
$B = 0.24t + 0.03$	$B = 1.57t - 0.02$	$B = 0.26t + 0.02$	

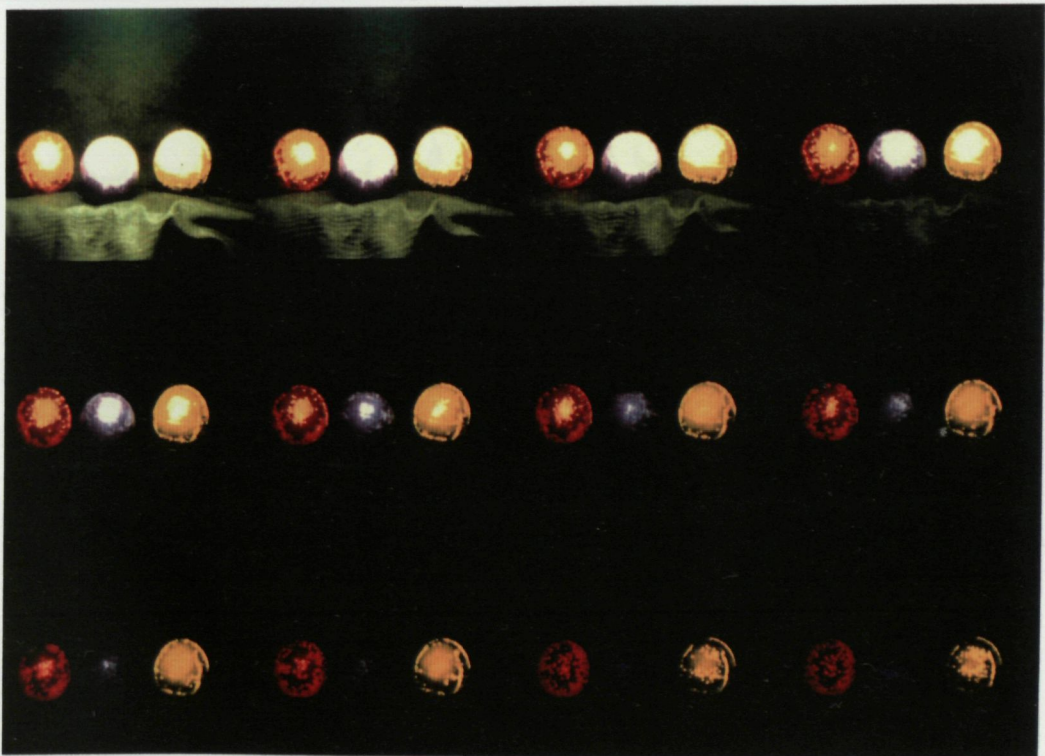
Els intervals de t utilitzats en la segmentació han estat: $[1, 20]$ per la pilota taronja, $[160, 180]$ per la pilota lila i $[45, 65]$ per la groga, i han estat obtinguts a partir de la imatge g .

Aquesta sèrie d'imatges s'ha inclòs en aquest capítol de resultats perquè il·lustren el cas en que es tracten objectes amb colors semblants. De fet, si s'observa la pilota taronja a les imatges originals es veu que la transició del taronja a la part no saturada fins al blanc a la part completament saturada passa pel color groc. Això provoca que a l'hora de segmentar, una part de la pilota taronja sigui identificada com a color groc, tal i com s'observa a la figura 6.17.

El mètode de correcció proposat no soluciona aquest problema, però tampoc empitjora els resultats: les regions erròniament segmentades són semblants en els dos casos, mentre que les regions correctament segmentades són més grans després de la correcció. Això pot observar-se comparant el resultat de la segmentació sobre les imatges originals i sobre les imatges corregides que es mostra a la figura 6.17.

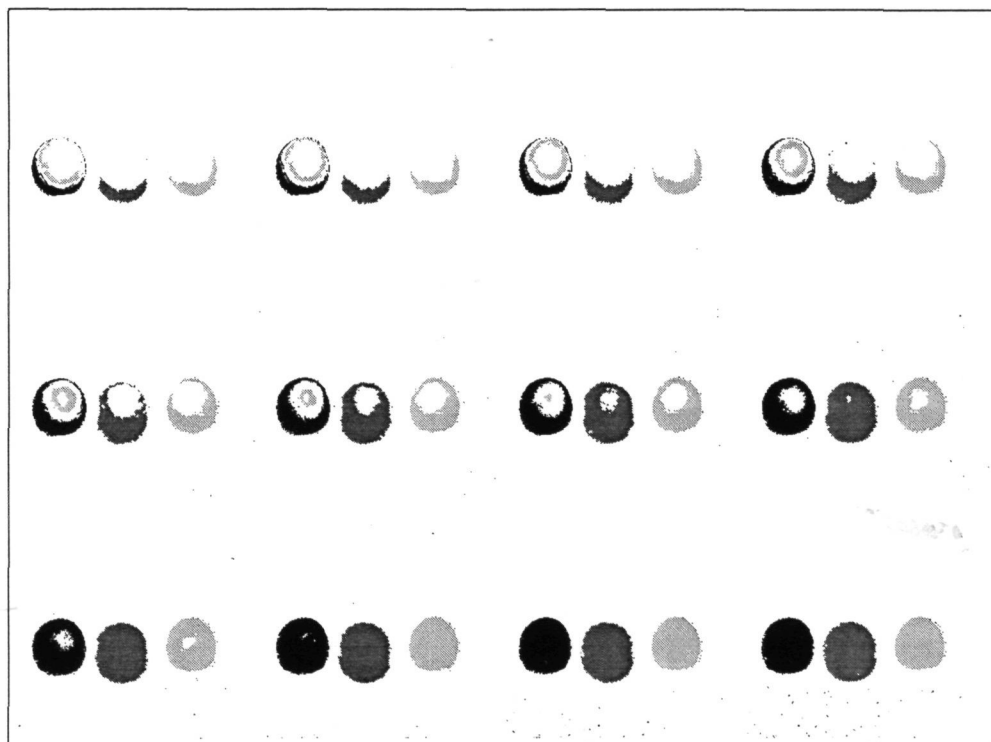


Original

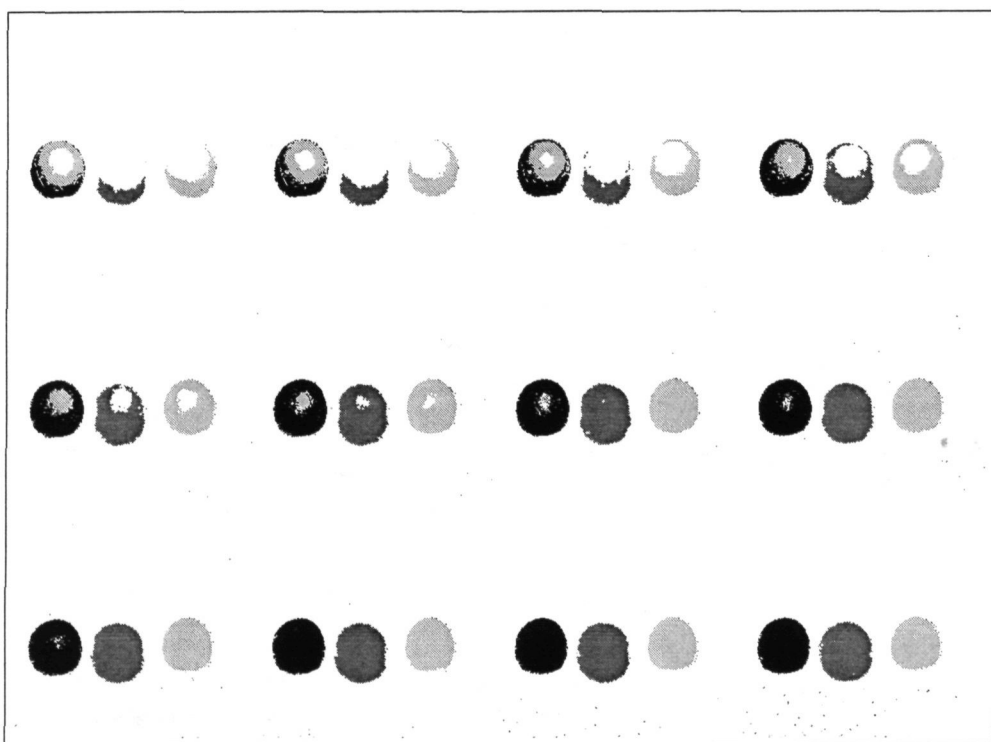


Corregida

Figura 6.16: Imatges originals (dalt) i corregides (baix) corresponents a la sèrie *pilotes*.



Abans de corregir



Després de corregir

Figura 6.17: Segmentació corresponent a les imatges originals (dalt) i a les corregides (baix) corresponents a la sèrie *pilotes*.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	20.2	31.5	5.0	1.2	54.4	9.8	9.9	9.9	69.3	20.9
b	23.9	39.1	6.4	1.3	50.7	6.2	4.9	4.9	61.9	12.3
c	27.8	48.6	7.7	1.3	44.8	4.5	1.0	1.0	53.6	6.8
d	35.1	62.6	10.0	1.3	32.6	0.6	0.0	0.0	42.7	2.0
e	46.3	79.2	12.3	0.9	16.5	0.0	0.0	0.0	28.8	0.9
f	56.2	87.9	13.1	1.2	6.6	0.0	0.0	0.0	19.7	1.2
g	65.0	92.0	12.8	1.5	0.8	0.0	0.0	0.0	13.6	1.5
h	77.7	95.0	10.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.8
i	88.5	96.2	8.8	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8	0.7
j	96.2	96.8	6.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	0.3
k	96.0	96.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
l	95.8	95.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.7: Mesures sobre el resultat de la segmentació de la pilota taronja a les imatges de la seqüència *pilotes*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	22.4	27.1	3.9	1.6	6.9	6.9	52.1	52.1	62.9	60.7
b	26.3	33.8	4.8	2.1	9.8	9.8	40.2	40.2	54.8	52.1
c	31.9	40.2	6.6	3.2	10.4	10.4	27.1	27.1	44.0	40.6
d	39.4	57.6	8.7	3.0	6.2	6.2	14.0	14.0	28.9	23.2
e	57.2	75.2	8.1	2.7	2.4	2.4	2.3	2.3	12.8	7.4
f	73.6	89.7	6.9	1.2	0.1	0.1	0.1	0.1	7.1	1.4
g	84.0	94.0	4.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.2
h	94.1	94.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0
i	95.5	95.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	95.3	95.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k	95.5	95.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	96.0	96.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.8: Mesures sobre el resultat de la segmentació de la pilota lila a les imatges de la seqüència *pilotes*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

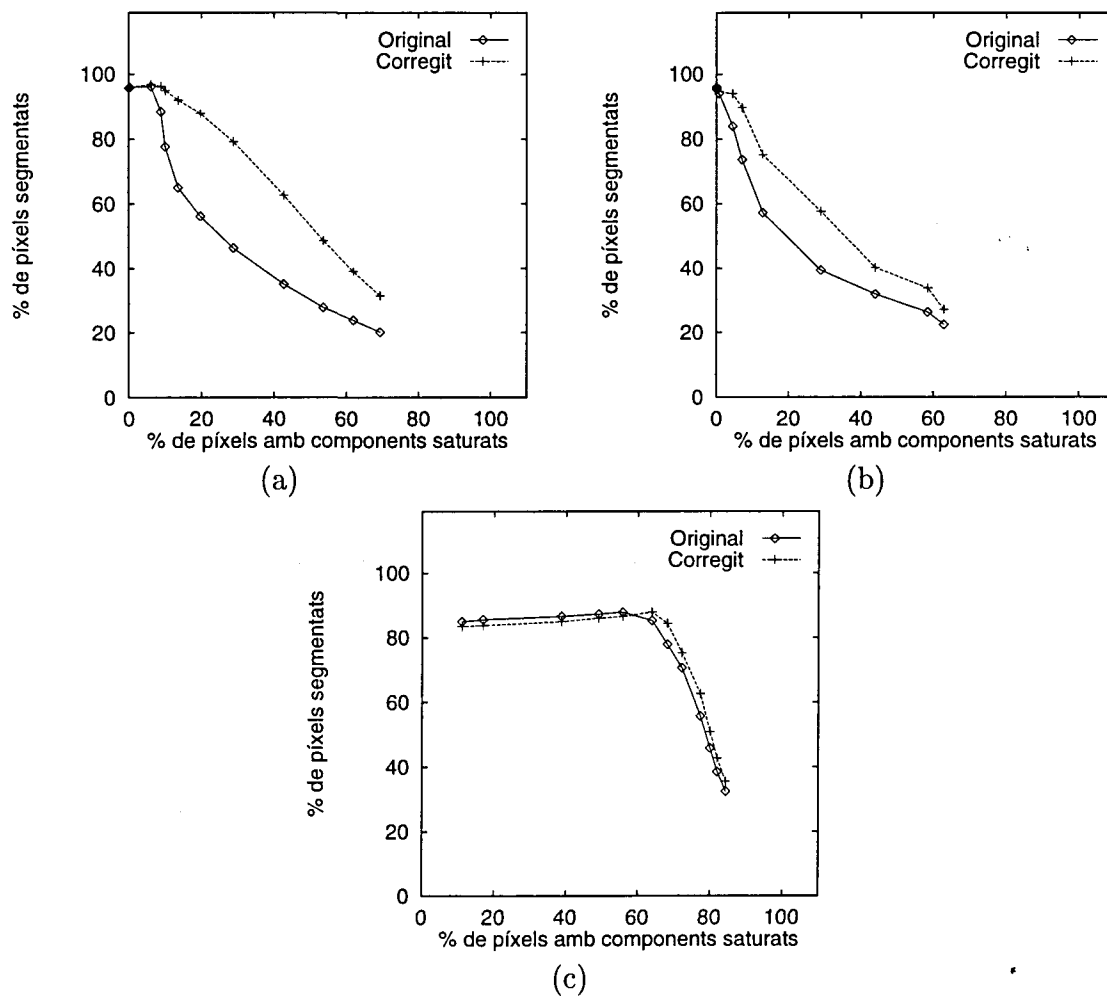


Figura 6.18: Comparació del percentatge de píxels segmentats abans i després de la correcció del color, respecte al percentatge de píxels saturats en la imatge original, de la sèrie *pilotes*. Pilota Taronja (a), pilota lila (b), pilota groga (c).

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	32.4	35.5	0.5	0.3	36.9	10.3	46.8	46.8	84.3	57.4
b	38.5	42.7	0.5	0.2	43.9	11.4	37.7	37.7	82.0	49.3
c	45.8	50.9	0.4	0.2	51.3	11.2	28.3	28.8	80.0	39.7
d	55.7	62.6	0.6	0.3	59.8	11.2	16.9	16.9	77.3	28.4
e	70.6	75.3	0.7	0.2	70.0	11.3	1.4	1.4	72.1	13.0
f	77.9	84.4	0.9	0.2	67.2	4.4	0.0	0.0	68.1	4.6
g	85.3	87.9	1.1	0.4	62.7	0.3	0.0	0.0	63.8	0.7
h	87.9	86.6	1.6	0.3	54.1	0.2	0.0	0.0	55.7	0.5
i	87.3	86.0	2.2	0.3	46.8	0.1	0.0	0.0	49.0	0.4
j	86.6	85.0	2.3	0.4	36.4	0.0	0.0	0.0	38.7	0.4
k	85.6	83.8	2.6	0.5	14.3	0.0	0.0	0.0	16.9	0.5
l	85.0	83.5	2.9	0.7	8.1	0.0	0.0	0.0	11.0	0.7

Taula 6.9: Mesures sobre el resultat de la segmentació de la pilota groga a les imatges de la seqüència *pilotes*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

6.2.3 Conjunt d'imatges d'uns *cables elèctrics*

Les imatges adquirides corresponen a cables elèctrics de color vermell, verd i blau. La funda dels cables és de material plàstic lluent, de forma que els cables presenten un component de reflexió especular.

La seqüència d'imatges es mostra a la part superior de la figura 6.19 i les imatges corregides aplicant les rectes mostrades a l'equació 6.8 es mostren a la part inferior d'aquesta mateixa figura.

Les rectes estimades són:

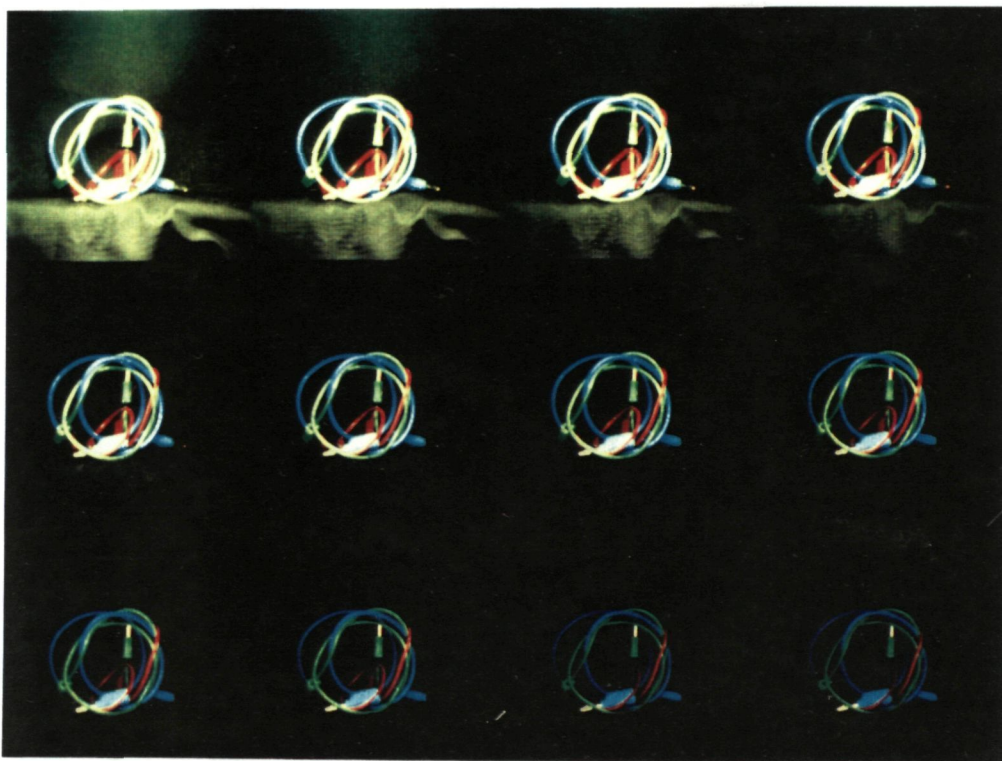
$$\begin{array}{lll}
 \text{Cables vermell} & \text{Cables verds} & \text{Cables blaus} \\
 R = 2.13t - 0.32 & R = 0.44t + 0.12 & R = 0.18t + 0.11 \\
 G = 0.47t + 0.22 & G = 1.90t - 0.22 & G = 0.84t + 0.03 \\
 B = 0.40t + 0.12 & B = 0.67t + 0.07 & B = 1.97t - 0.11
 \end{array} \quad (6.8)$$

Pel procés de segmentació, el resultat del qual es mostra a les figures 6.20 i 6.21, s'han utilitzat els intervals de to $[250, 10]$ pels cables vermells, $[80, 100]$ pels cables verds i $[140, 160]$ pels cables blaus, intervals obtinguts a partir de la imatge e . Cal comentar que en aquest cas, per tal d'observar millor les diferències, les imatges es mostren d'un tamany més gran i s'ha canviat una mica l'organització d'aquestes imatges, que ara és:

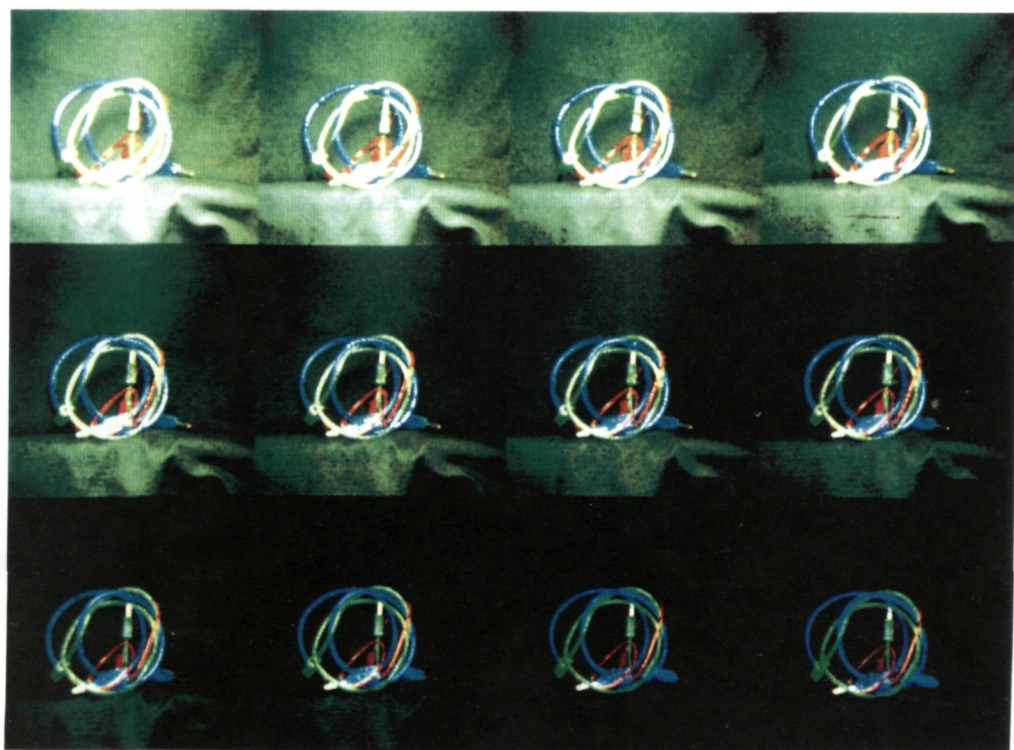
a	b	c
d	e	f
g	h	i
j	k	l

En aquesta sèrie d'imatges es veu que l'efecte més important del procés de correcció es posa de manifest en els cables blaus. Si s'observen les taules 6.10, 6.11 i 6.12, es veu que el màxim número de píxels saturats es dona en els cables blaus (el percentatge arriba fins al 64.3%), mentre que en els píxels corresponents als cables verds aquest percentatge arriba al 53.5% i en el cas dels cables vermells només arriba al 27%.

Igual que ens passava amb la sèrie *tren sencera*, a les imatges més fosques la segmentació perd eficàcia degut a la inestabilitat del to en regions amb poca il·luminació.

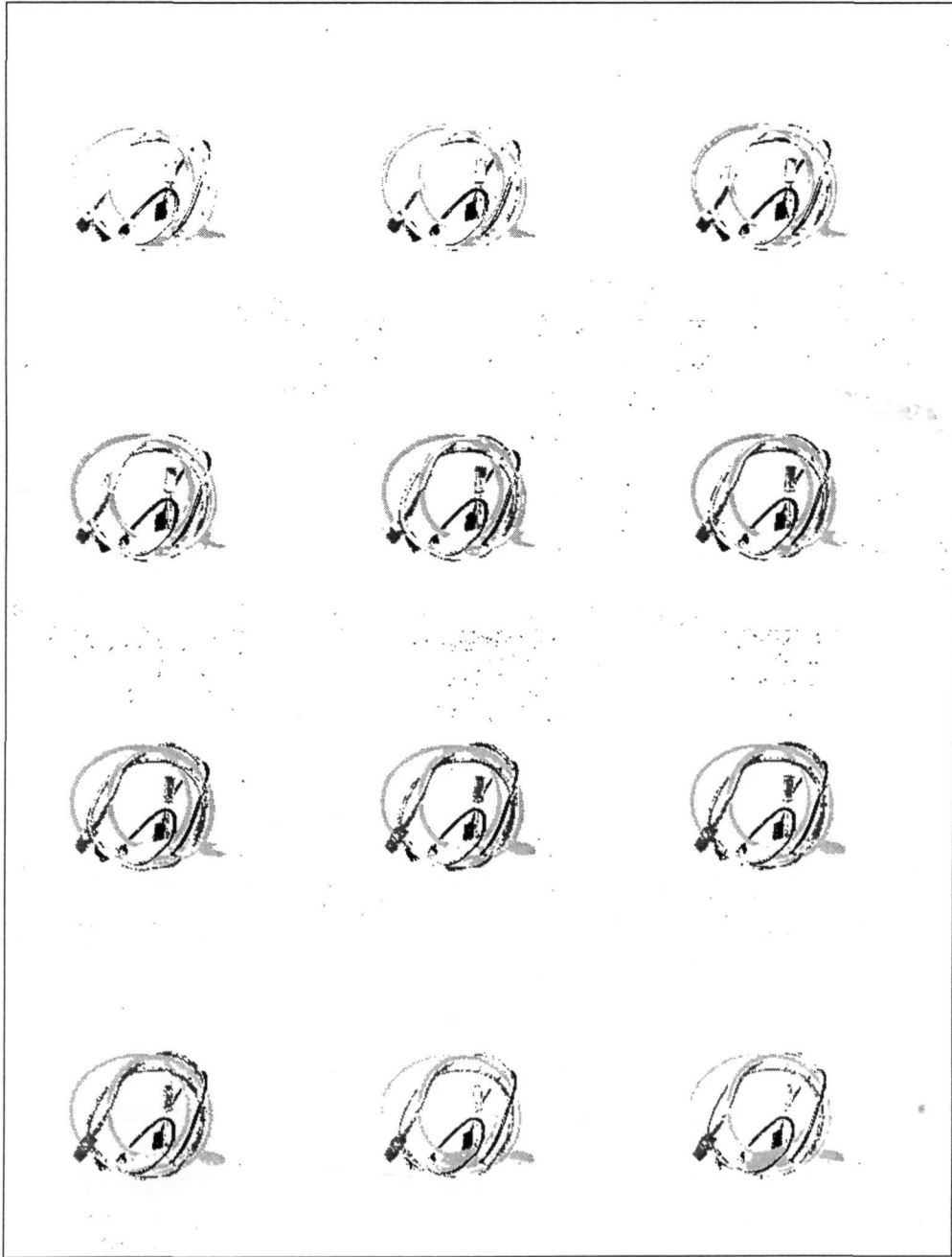


Original



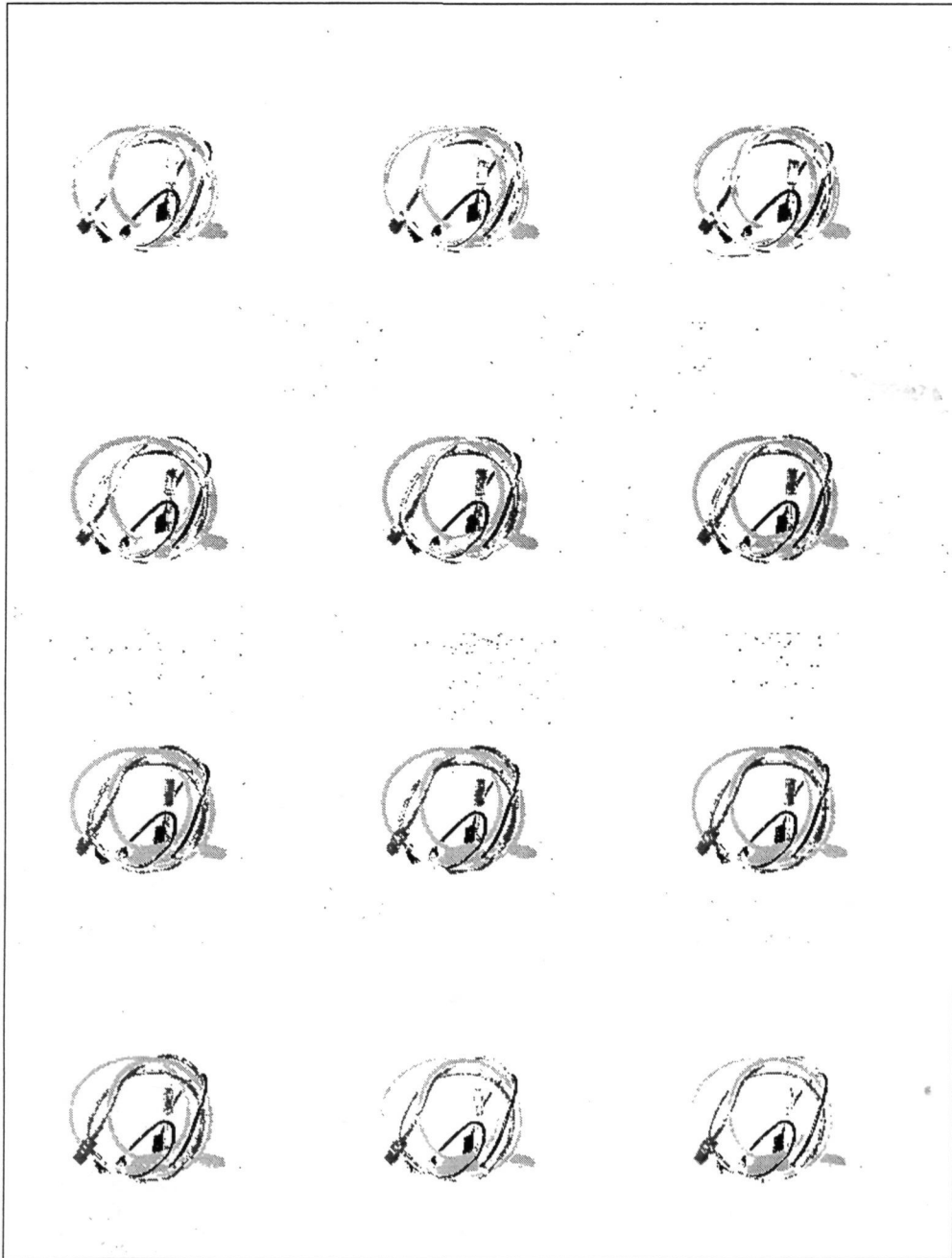
Corregida

Figura 6.19: Imatges originals (dalt) i corregides (baix) corresponents a la sèrie cables elèctrics.



Abans de corregir

Figura 6.20: Segmentació corresponent a les imatges originals corresponents a la sèrie *cables elèctrics*.



Després de corregir

Figura 6.21: Segmentació corresponent a les imatges corregides corresponents a la sèrie *cables elèctrics*.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	60.7	74.5	14.4	3.4	4.6	4.6	8.6	8.6	27.7	16.6
b	67.9	79.8	13.6	3.0	2.5	2.5	6.2	6.2	22.3	11.7
c	73.3	82.5	12.1	2.9	1.9	1.9	4.3	4.3	18.2	9.1
d	79.0	84.9	8.8	1.6	1.0	1.0	3.0	3.0	12.7	5.6
e	83.6	86.9	7.1	1.0	1.3	1.3	1.6	1.6	10.0	3.9
f	85.7	88.1	6.2	1.1	1.1	1.1	0.8	0.8	8.0	3.0
g	86.7	88.3	5.1	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	6.2	1.7
h	86.7	88.2	1.9	0.3	0.2	0.2	0.0	0.0	2.1	0.5
i	85.8	87.0	1.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.3
j	85.9	86.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
k	79.8	79.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	78.0	77.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.10: Mesures sobre el resultat de la segmentació dels cables vermells a les imatges de la seqüència *cables elèctrics*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	12.8	17.7	8.6	4.7	14.5	8.7	30.4	30.4	53.5	43.8
b	17.8	24.9	9.0	4.7	15.8	10.1	20.3	20.3	45.2	35.2
c	24.8	32.2	10.4	5.4	12.7	7.6	13.7	13.7	36.9	26.7
d	32.5	42.0	11.2	5.7	8.7	5.1	6.6	6.6	26.5	17.4
e	46.1	55.9	10.0	4.2	3.5	2.1	2.4	2.4	15.9	8.7
f	53.3	61.7	9.3	3.4	2.2	1.4	1.0	1.0	12.5	5.8
g	60.2	66.4	7.7	2.6	1.1	0.7	0.2	0.2	9.0	3.5
h	68.9	71.2	3.8	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	1.2
i	68.9	70.0	2.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.6
j	68.4	68.6	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2
k	48.5	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
l	45.3	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Taula 6.11: Mesures sobre el resultat de la segmentació dels cables verds a les imatges de la seqüència *cables elèctrics*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.

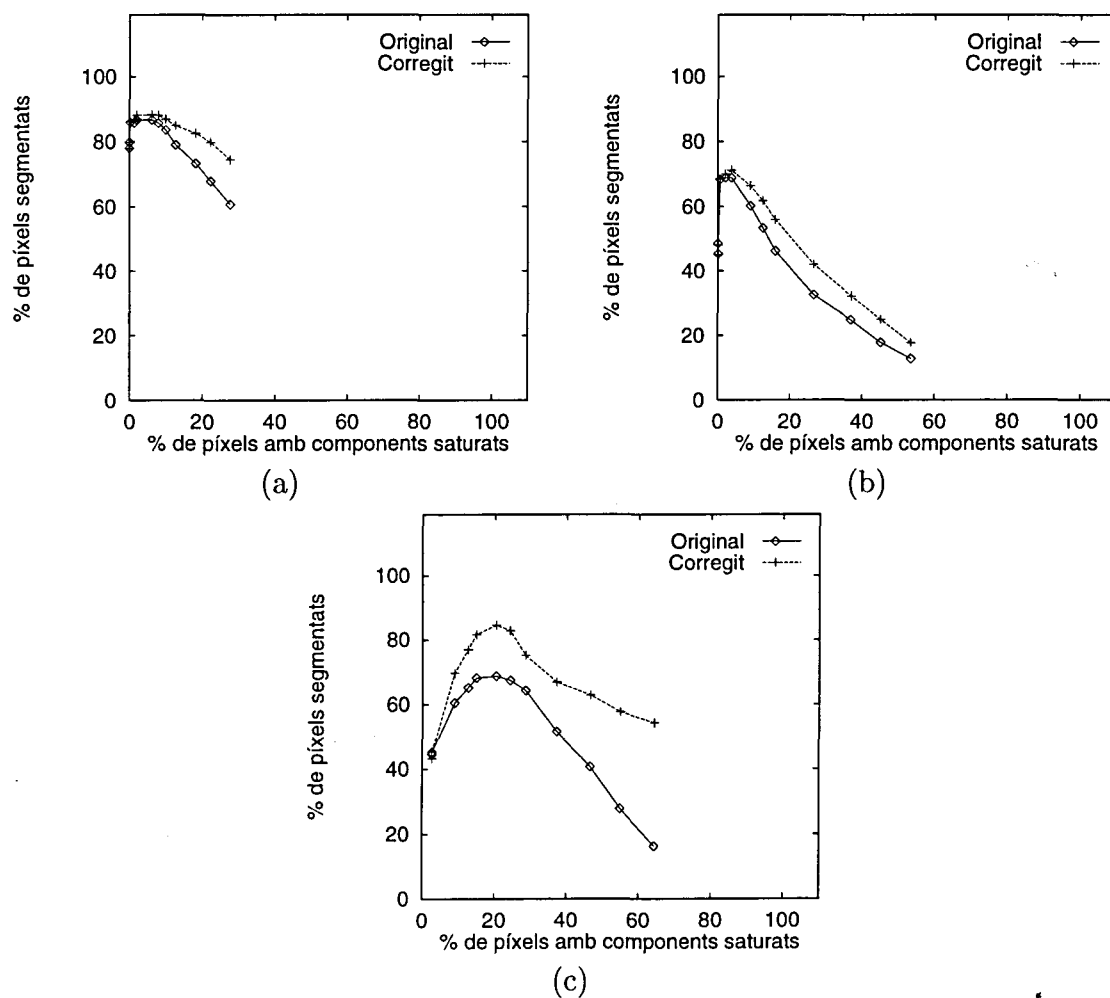


Figura 6.22: Comparació del percentatge de píxels segmentats abans i després de la correcció del color, respecte al percentatge de píxels saturats en la imatge original, de la sèrie *cables*. Cables vermells (a), cables verds (b), cables blaus (c).

Imatge	% Segmen.		% Sat. 1		% Sat. 2		% Sat. 3		% Total Sat.	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
a	16.3	54.2	6.4	2.6	38.5	5.3	19.3	19.3	64.3	27.2
b	27.8	57.6	8.4	3.6	30.6	3.3	15.9	15.9	54.9	22.8
c	40.7	62.8	9.7	4.3	23.4	2.9	13.5	13.5	46.6	20.7
d	51.5	66.9	10.4	4.3	16.5	3.0	10.2	10.2	37.2	17.5
e	64.3	75.2	9.3	3.5	17.1	6.6	2.2	2.2	28.6	12.3
f	67.5	82.9	8.5	2.4	15.5	2.6	0.3	0.3	24.3	5.3
g	68.8	84.6	7.0	1.9	13.3	0.6	0.1	0.1	20.4	2.6
h	68.2	81.7	4.5	1.5	10.4	0.0	0.0	0.0	14.9	1.5
i	65.2	77.0	3.4	1.2	9.2	0.0	0.0	0.0	12.6	1.2
j	60.5	69.7	2.9	1.0	5.9	0.0	0.0	0.0	8.9	1.0
k	45.2	45.3	2.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.3
l	44.6	43.3	2.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.2

Taula 6.12: Mesures sobre el resultat de la segmentació dels cables blaus a les imatges de la seqüència *cables elèctrics*, abans (A) i després (D) de la correcció. Les columnes Sat. 1, 2 i 3 indiquen el percentatge de píxels amb 1, 2 o 3 components saturats i la columna *Total Sat.* indica el percentatge total de píxels amb algun canal saturat.