

Estudi Comparatiu del Comportament Perceptual de Diferents Algorismes

Tone Mapping

Joaquín Cerdá Company

Resum— D'experiments diferents per avaluar tone mapping operators se n'ha fet de molts tipus diferents i amb molts objectius diferents. Nosaltres, en aquest treball, hem realitzat experiments psicofísics sobre 15 algorismes tone mapping diferents per tal d'obtenir un ranking des del punt de vista de la percepció humana. Per aconseguir aquest ranking, hem realitzat dos experiments diferents: un per estudiar la relació de tonalitats de grisos en la imatge tone mapped i en l'escena HDR real i un pairwise comparison dels 15 algorismes, observant l'escena HDR real just al costat del monitor CRT calibrat. Els resultats dels experiments han demostrat que, pel primer experiment, iCAM és el millor amb diferència, mentre que pel segon experiment, els millors han estat Kraw i KimK.

Paraules clau— HDR, tone mapping operator, experiment, psicofísic, pairwise comparison, ranking.

Abstract— There are a lot of different experiments to evaluate tone mapping operators. In this work, we performed psychophysics experiments with 15 different tone mapping algorithms to obtain a human perceptual ranking. To achieve this ranking, we performed two different experiments: one to study the relationship between gray tones, and the other performed a pairwise comparison of these 15 algorithms. In the first one, we matched the gray tones in the tone mapped image and in the HDR real scene. In the second one, we performed a pairwise comparison of tone mapped images, while watching the HDR real scene next to the CRT calibrated display. We built a ranking from the pairwise comparison results using the Balanced Rank Estimation method implemented by Wauthier et al.(2013). The results of the experiments showed that iCAM is the best tone mapping operator for the first experiment, while Kraw and KimK are the best for the second one.

Index Terms— HDR, tone mapping operator, experiment, psychophysic, pairwise comparison, ranking.

1. INTRODUCCIÓ

En la nostra vida quotidiana es donen, sense nosaltres pensar-hi, moltes situacions en les que observem escenes que en podríem anomenar *High Dynamic Range* (HDR). Una escena HDR es podria definir, de manera molt general, com un tipus d'escena en la qual el rang d'intensitat lumínica és molt gran. Per exemple, el rang dinàmic entre la llum del sol quan brilla i la de les estrelles és de 100 000 000:1 candeles[14]. Un exemple d'escena *High Dynamic Range* seria l'interior d'una església, ja que la diferència entre la intensitat de llum de l'interior de l'església i la intensitat lumínica de l'exterior, vista a través dels vitralls, és molt gran.

El *Sistema Visual Humà* (HVS) és capaç d'adaptar la seva visió a un rang més petit d'intensitat (10 000:1 candeles).

Aquesta adaptació és possible gràcies a: la pupila, els cons i els bastons, les cèl·lules horitzontals, les cèl·lules bipolars, les cèl·lules amacrines, les cèl·lules ganglionars, les cèl·lules interplexiformes i el còrtex visual primari[1],[2].

Tal com es mostra en la figura 1, el fet de l'existència d'aquest ampli rang dinàmic d'intensitat és un greu problema per a les noves tecnologies, ja que tant els *devices* com els *displays* creats fins ara tan sols són capaços de captar/mostrar un rang encara més petit (100:1 candeles) que el captat per l'ull humà[3]. Això ha portat al món de *Image Processing* a crear diferents mètodes per tal de poder mostrar en els monitors imatges de les escenes HDR.

-
- E-mail de contacte: ximcer@outlook.com
 - Menció realitzada: Computació.
 - Treball tutoritzat per: Xavier Otazu Porter (Departament de Ciències de la Computació).
 - Curs 2013/14

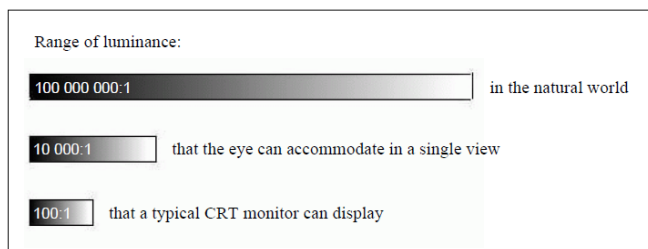


Fig. 1. Per tal de poder mostrar el rang dinàmic del món real en un *display* estàndard, necessitem desenvolupar eines com els *tone mapping operators*. Figura extreta de Motto and Otazu[4].

Així doncs, per obtenir tota la informació de l'escena, s'han de fer fotografies en diferents temps d'exposició, de manera que s'ompli tot el rang dinàmic. Posteriorment, de cada imatge extreta es recullen les dades de la regió d'interès (la part de la informació que no està ni saturada ni cremada) i es construeix una imatge HDR. El problema és que aquesta imatge HDR creada torna a tenir un rang dinàmic molt més gran que el rang del monitor, així que s'ha de tractar amb un *tone mapping operator* (TMO) per transformar aquesta imatge HDR en una imatge *Low Dynamic Range* (LDR) que pugui ser mostrada en un monitor estàndard (figura 2).

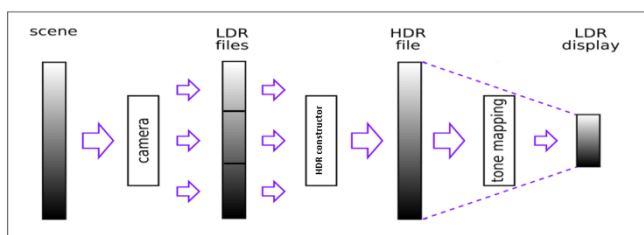


Fig. 2. *Workflow* de com mostrar una escena HDR en un monitor LDR. Imatge modificada de Motto and Otazu[4].

L'article està organitzat de la següent manera: en la secció 2 s'enumeren els objectius del nostre treball. En la secció 3 es parla de l'estat de l'art dels experiments realitzats i s'enumeren els *tone mapping operators* utilitzats. En la secció 4 s'explica la metodologia que hem aplicat per dur a terme el treball. En la secció 5 es mostren els resultats obtinguts i, per acabar, en la 6 s'exposen les conclusions a les quals hem arribat i es proposen treballs futurs.

2. OBJECTIUS

L'objectiu del nostre treball ha estat:

Obtenir un ranking de diferents algorismes *tone mapping*, utilitzant diferents criteris:

- Estudi del comportament perceptual en les relacions de grisos en la imatge *tone mapped* i en l'escena HDR real.
- Estudi del comportament perceptual de les imatges *tone mapped* respecte l'escena HDR.

3. ESTAT DE L'ART

Els *tone mapping operators*, tal com s'ha explicat en la Secció 1, són algorismes utilitzats per reduir el gran rang dinàmic de les imatges HDR a un rang que pugui ser mostrat per un *display* estàndard.

Actualment, existeix una gran varietat de *tone mapping operators*, ja que ha estat un camp força investigat, en el món de *Image Processing*.

En la literatura, s'han desenvolupat múltiples maneres de comparar els diferents TMOs, tant teòriques [4] com psicofísiques [5], [6], [7], [8], [9], per tal de demostrar que el seu algorisme és millor, que està al nivell de la resta o, simplement, com a investigació.

Nosaltres ens hem volgut basar en la branca de la psicofísica, ja que, en el nostre coneixement, no existeix cap classificació realitzada des del punt de vista psicofísic amb la mateixa escena real, en un entorn controlat, al costat de la imatge *tone mapped*.

Per exemple, Ferwerda et al.[5] va basar el seu model computacional d'adaptació visual en experiments psicofísics. En els seus experiments, buscava resultats empírics del llindar de visibilitat, d'aparença del color, d'agudesa visual i de la sensibilitat al llarg del temps, causada pels mecanismes d'adaptació del *Sistema Visual*. Drago et al.[6] va realitzar un experiment psicofísic en el que intentava fer un ranking entre 6 TMOs d'aquella època. Primer de tot van valorar com de similars o no eren els resultats. Posteriorment, per entendre les dissimilituds, van observar el contrast aparent de la imatge, el nivell de detall perceptual i el realisme aparent (*natureless*). Ledda et al.[7] va realitzar un experiment psicofísic on va realitzar comparacions entre 6 TMOs i la imatge HDR mostrada en un monitor HDR. El seu objectiu no era obtenir un ranking, sinó validar aquests operadors i determinar les impressions dels participants entre les imatges produïdes i les mostrades en el monitor HDR. Kuang et al.[8], en la publicació del seu nou model, va realitzar un experiment psicofísic per tal de validar-lo respecte 6 operadors més diferents. El van dividir en dues parts: una en la qual no es veia l'escena real i una altra en la que sí que es veia. En la primera part, demanaven quina imatge *tone mapped* preferien, basant-se en la impressió general de la qualitat com el contrast, color, nitidesa, aparença natural, etc. En la segona part, sí que es veia l'escena real i demanaven una avaluació general de la imatge. Yoshida et al.[9] va realitzar un experiment psicofísic per saber com les imatges *tone mapped* són percebudes pels humans i quins són els atributs de les imatges més importants en temes d'aparença. Es comparaven 7 operadors diferents i es demanava als subjectes que puntuessin la naturalitat (*natureless*), el contrast general, el *brightness* general i la reproducció de detall, tant en la part fosca com en la brillant. Aquests experiments, però, no van ser realitzats en un entorn controlat (*dark room*). Les seves conclusions són que els 7 TMOs són percebuts molt diferent quan són comparats amb l'escena real i que no hi ha cap atribut d'aparença que tingui una influència prou gran en la percepció de la naturalitat.

Nosaltres, en el nostre treball, hem volgut anar més enllà i hem creat una escena HDR real, per tal que l'observador

pugui veure-la en la realitat en un entorn controlat (*dark room*). Li hem mostrat dues imatges *tone mapped* al seu costat, d'una en una, per tal que ens indiqués quina d'elles s'assemblava més a la escena HDR real. Per tant, hem desenvolupat un sistema d'avaluació basat en l'experimentació psicofísica per tal d'obtenir els *tone mapping operators* que tenen uns resultats més semblants a l'escena HDR real, des del punt de vista de la percepció humana.

3.1. Tone Mapping Operators Utilitzats

Hi ha diferents tipus de *tone mapping operators*. La diferenciació més utilitzada és entre globals i locals. Els operadors globals són aquells que utilitzen una funció igual per a tots els píxels, independentment de la seva posició espacial. Solen ser computacionalment molt eficients, però tenen un menor contrast i una major pèrdua de detall. Alguns exemples d'operadors globals són: Kim and Kautz[10], Drago et al.[11], Reinhard and Devlin[12] i Ferwerda et al.[5]. En canvi, els operadors locals són aquells que basen els seus càlculs en els píxels veïns. Aquest tipus d'operadors tenen un major contrast i un nivell de detall més alt, però poden tenir problemes de *halos* en les vores dels objectes on hi ha un contrast alt. Els operadors locals estan més inspirats en el HVS, ja que el nostre *Sistema Visual* fa una adaptació local. Alguns exemples són: Ashikhmin[13], Fattal et al.[14], Durand and Dorsey[15], Krawczyk et al.[16], Meylan et al.[17], Otazu[18], Kuang et al.[8] i Li et al.[19]. Existeix un altre tipus que serien els operadors mixtes, és a dir, que segons com s'executin poden ser globals o locals. Un exemple és Reinhard et al.[20]. Un altre exemple seria Ferradans et al.[21], ja que està constituït per dues fases: la primera és global i la segona és local. En aquest cas, es pot executar la primera fase sense haver d'executar la segona, però, a través dels resultats obtinguts, han vist que si també s'executa la segona els resultats milloren.

Els *tone mapping operators* que hem utilitzat en el nostre experiment són:

Ashikmin (*Ashi*) [13]

Tone mapping operator local basat en les funcionalitats de les etapes primàries del *Sistema Visual Humà*, però no en el seu disseny. Primer estimen l'adaptació lumínica a nivell local, després apliquen una funció simple per comprimir els valors d'intensitat en el rang desitjat i, finalment, es reintrodueixen els detalls que s'hagin pogut perdre.

Drago et al. (*Drag*) [11]

Tone mapping operator global basat en el mètode de compressió logarítmica dels valors de luminància, utilitzant diferents bases depenent del contingut de l'escena per tal de preservar correctament el contrast i els detalls. Aquest operador, amb la compressió logarítmica, imita a la resposta humana envers la llum.

Durand and Dorsey (*Dura*) [15]

Tone mapping operator local. Descomposa la imatge

en dues escales: la capa base i la capa de detall. La capa base és obtinguda utilitzant el *bilateral filter*, que calcula els pesos dels píxels segons una funció processada sobre la intensitat, que fa decreixer els pesos dels píxels que tenen una gran diferència d'intensitat. La capa de detall es calcula dividint la intensitat d'entrada entre la capa base. En la capa base es redueix el contrast, mentre les magnituds de la capa de detall no es modifiquen, fent preservar el detall.

Fattal et al. (*Fatt*) [14]

Tone mapping operator local que manipula els camps de gradient de la imatge lumínica. La seva idea és identificar els gradients grans a diverses escales i atenuar les seves magnituds, alhora que es mantenen les seves direccions inalterades.

Ferradans et al. (*Ferr*) [21]

Tone mapping operator mixt que està separat en dues etapes. En la primera etapa s'aplica un mètode global que implementa l'adaptació visual, basada en experiments de la percepció humana. En particular, es dona molta importància a la saturació dels cons. La segona etapa realça el contrast a nivell local, basat en un model variacional inspirat en el fenomen de la visió del color.

Ferwerda et al. (*Ferw*) [5]

Tone mapping operator global basat en el seu model computacional de l'adaptació visual, calculat gràcies a experiments psicofísics sobre el llinard de visibilitat, aparença del color, agudesesa visual i sensibilitat durant el temps d'adaptació causat pels mecanismes d'adaptació del *Sistema Visual*. El model d'adaptació pot ser utilitzat per determinar com s'hauria de mostrar la imatge en el *display* de manera que la imatge final provoqui la mateixa sensació visual que l'escena real.

iCAM06 (*iCAM*) [8]

Tone mapping operator local basat en el model d'aparença del color iCAM06, que retorna els atributs perceptuals de cada píxel, com *lightness*, cromaticitat, matís, contrast i nitidesa. El model invers pot tenir en compte les condicions de la vista final i generar l'efecte perceptual desitjat en el resultat.

Kim and Kautz (*KimK*) [10]

Tone mapping operator global que basa la seva compressió lumínica en una funció sigmoïdal.

Krawczyk et al. (*Kraw*) [16]

Tone mapping operator local inspirat en la *anchoring theory*. Aquest TMO descomposa la imatge HDR en àrees (*frameworks*) de luminància consistent i calcula, localment, els valors de *lightness*.

Mertens et al. (Mert) [22]

Tècnica que fusiona imatges de diferents temps d'exposició (*exposure fusion*). Utilitzant aquesta tècnica no cal construir una imatge HDR. Es guia per la qualitat de mesures com la saturació i el contrast. Seleccionen els píxels "bons" de la seqüència i els combinen per crear la imatge resultant.

Meylan et al. (Meyl) [17]

Tone mapping operator local derivat d'un model del processament de la retina. Primer se li aplica un algorisme *tone mapping* a la imatge mosaic capturada pels sensors (la HDR) i, després, se li introdueix una variació de la classe *center/surround* dels algorismes *tone mapping* locals. La implementació del processament de la retina només està parcialment acceptada per la literatura.

Otazu (Otaz) [18]

Tone mapping operator local inspirat en el funcionament del *Sistema Visual Humà*. Realitza una descomposició del contrast en multiresolució. Aquesta representació en multiresolució del contrast, aplicada al canal d'intensitat de la descomposició del color en l'espai *opponent*, és processat pel model de saturació no lineal de les neurones V1 (Otazu et al, 2010 *Journal of Vision* 10(12) 5).

Reinhard et al. (Rein) [20]

Tone mapping operator mixt, ja que pot ser executat com a global o local. Primer de tot realitza un escalat del rang dinàmic (global) i, després, es pot realitzar un *dodging and burning* (local). La tècnica de *dodging* fa decrementar la luminància per incrementar el contrast. La tècnica *burning* fa que un píxel que estigui en una part relativament fosca sigui menys comprimit. En el nostre treball aquest operador ha estat executat de la forma global, ja que així és per defecte[23].

Reinhard and Devlin (ReDe) [12]

Tone mapping operator global. Utilitza un model de l'adaptació dels fotoreceptors, que pot ser descrit com un ajustament automàtic al nivell general d'il·luminació. El nivell d'adaptació cromàtica s'obté al interpol·lar els píxels vermells, verds i blaus i els valors de luminància. Així doncs, simultàniament, aconsegueix una adaptació dels nivells de luminància alhora que una adaptació cromàtica.

Yuanzhen Li et al. (Yuan) [19]

Tone mapping operator local basat en tècniques de processament d'imatge per escala. Utilitza un banc de filtres d'anàlisi i filtres de síntesis per reconstruir el senyal i aplica un control de guany local a les subbandes dels senyals.

Les lletres en cursiva que estan entre parèntesis, incloses en cada descripció, són el nom que utilitzarem a partir d'ara per referir-nos a l'operador.

Molts d'aquests algorismes han estat extrets del HDR Toolbox for Matlab[23] i tots han estat executats de la seva manera per defecte.

4. METODOLOGIA

Per tal d'assolir els diferents subobjectius, hem dissenyat dos experiments psicofísics diferents que ens han servit per:

- 1) Establir una classificació dels TMOs que reproduïen millor les relacions entre les tonalitats de grisos percebudes en les cares dels cubs.
- 2) Determinar un ranking dels algorismes *tone mapping* que obtenen resultats més naturals respecte les escenes HDR reals.

De cara als dos experiments, hem creat tres taules de referència iguals, amb 65 tonalitats de grisos diferents. Podeu consultar els valors de luminància mesurats amb un espectroradiòmetre en la secció A1 de l'Apèndix. Aquesta taula ha estat creada en l'espai Lab, per tal que els observadors poguessin diferenciar visualment entre les diferents tonalitats. Seguidament, hem construït diferents cubs, les cares dels quals eren tonalitats de grisos que apareixen a la taula creada, i hem muntat 3 escenes HDR diferents, posant una taula de referència, dos cubs amb cares de diferents tonalitats i objectes de diferents colors a cada escena. A l'hora de construir les escenes HDR, hem tingut en compte que els colors Red, Green, Blue i Yellow tinguin una representativitat semblant. Hem il·luminat les escenes amb una bombeta incandescent de 100W, per tal de crear el *High Dynamic Range*, i hem realitzat 25 fotografies de cadascuna per temps d'exposició que van des dels 15 segons fins a 1/6000 segons. La càmera amb la que s'han fet les fotografies és una *Sigma SD10* amb un sensor de tres capes: una per Red, una per Green i l'altra per Blue. Les imatges s'han guardat en format RAW i s'han llegit amb el software de la càmera (*Sigma Photo Pro*), gràcies al qual s'han pogut transformar a imatges sRGB de 16 bits. Amb les imatges extretes, hem construït tres imatges HDR, una de cada escena, amb el HDR Toolbox de Matlab[23]. Cal indicar que, en el cas del Mert, hem passat com a paràmetre una imatge HDR lineal (la mateixa que s'ha utilitzat per a tots els TMOs) i ell ha reconstruït la pila d'imatges LDR.

D'ara en endavant, cada vegada que diguem que es mostra una imatge en el monitor CRT tindrem en compte que aquest monitor ha estat calibrat prèviament i que aquesta imatge ha estat processada amb un canvi d'espai de color i una *gamma correction*. Com que la targeta gràfica *Visage* té un espai de color propi, les imatges *tone mapped* han hagut de ser convertides de l'espai sRGB a l'espai XYZ, del XYZ al xyL i del xyL al RGB de la *Visage*. També cal mencionar que s'ha tingut en compte la *gamma correction*, ja que totes les imatges procedents del HDR Toolbox de Matlab[23] han estat guardades amb una gamma de 2.2, excepte ReDe, que el seu valor és de 1.6, i Mert, que el seu

valor és de 1. Per la resta de *tone mapping operators* utilitzats els valors han estat: Ferr 2.2, iCAM 2.4, Meyl 1, Otaz 1 i Yuan 2.2. Abans de fer el canvi d'espai de color, s'han linealitzat les imatges i, en l'espai RGB de la Visage, se'ls hi ha afegit la *gamma* del monitor per mostrar-les correctament.

Primer experiment: *Matching* tonalitats de grisos

En aquest experiment, només hem utilitzat les dues primeres escenes ja que la tercera contenia un reflex produït per la font d'il·luminació i això podia introduir errors en les nostres mostres. Així doncs, vam demanar als subjectes de l'experiment que fessin un *matching* de les tonalitats dels grisos de les cares dels cubs amb les tonalitats de la taula de referència, indicant les coordenades que van considerar (veure figura 3). És molt important puntualitzar que nosaltres els hi vam demanar explícitament que el *matching* el fessin entre la tonalitat gris que percebien de la cara del cub, sense descomptar il·luminació ni altres efectes, amb la tonalitat de gris que percebien de la taula de referència.

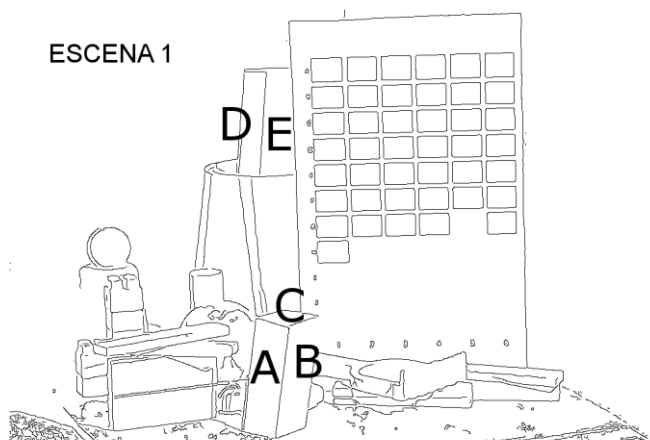
Dies més tard, vam demanar, als mateixos subjectes, que realitzessin el mateix tipus de *matching* entre les cares dels cubs i la taula de referència, però en les imatges *tone mapped* dels diferents TMOs, mostrades en el monitor CRT.

En total hem utilitzat 8 subjectes per la part del *matching* en l'escena HDR real i 3 per la part del *matching* en les imatges *tone mapped*. Pel primer cas, han estat 5 homes i 3 dones i, pel segon, 3 homes. En tots dos casos, el rang d'edat ha estat entre 20 - 54 anys. Pel primer cas, el temps aproximat ha estat d'uns 5 minuts per escena, mentre que pel segon cas ha estat d'uns 15 minuts per escena, ja que hi havien 15 TMOs diferents. En el primer cas, 5 dels 8 observadors eren naïve i en el segon tots 3 tenien coneixements de l'objectiu final.

Segon experiment: *Pairwise Comparison*

Aquest experiment va consistir en un *pairwise comparison* (comparació entre parells) entre les imatges *tone mapped*, alhora que s'observava l'escena HDR real just al costat del monitor (figura 4). Vam situar al subjecte en la mateixa posició des d'on s'havien realitzat les fotografies de l'escena i es va controlar que les dimensions percebudes en les imatges del monitor corresponguessin a les dimensions percebudes de l'escena real. Així doncs, cada vegada se li mostraven dues imatges *tone mapped* diferents al subjecte i havia d'escollir quina d'elles reproduïa millor l'escena HDR del seu costat. Les imatges es presentaven al subjecte d'una en una per tal que no hi hagués cap efecte sobre l'altra imatge *tone mapped* i ell ho controlava tot (la transició entre imatges i la selecció de la millor) a través d'un *joystick*. Vam donar al subjecte un temps il·limitat per fer les comparacions. Un cop feia la comparació d'un parell d'imatges, se li mostrava un altre parell diferent, fins realitzar totes les comparacions possibles. En cap moment el subjecte va tenir coneixement de quin algorisme *tone mapping* havia produït aquelles imatges.

En total hem utilitzat 6 subjectes per realitzar aquest ex-



Cara A:
 Cara B:
 Cara C:
 Cara D:
 Cara E:

Fig. 3. Formulari que se li va entregar als observadors per tal que ens indiquessin les coordenades a les que es corresponien, dins de la taula de referència, les cares visibles dels cubs. Exemple de l'escena 1.

periment. Dels 6 subjectes, hi ha hagut 2 dones i 4 homes entre 20 i 45 anys. El 50% dels subjectes han estat naïve i no tenien res a veure amb el món de *Image Processing*. L'experiment ha durat uns 25 minuts per escena. Entre escena i escena s'ha obligat al subjecte a descansar, com a mínim, 5 minuts i se l'ha obligat a sortir de l'ambient de l'experiment.

Cal afegir que ens hagués agradat poder utilitzar un major nombre de *tone mapping operators*, però el fet de realitzar un *pairwise comparison* ens ha obligat que l'observador realitzés $n \times (n - 1) / 2$ comparacions on n és igual al nombre d'algorismes a avaluar.

En la secció A2 de l'Apèndix trobareu totes les imatges *tone mapped* linearitzades, obtingudes a partir dels 15 operadors escollits per fer l'experiment. Només es mostraran les imatges de l'escena 2.

5. RESULTATS

Tal com s'ha explicat a la secció 5, aquest treball s'ha dividit en dos experiments psicofísics que ens han servit per establir:

- 1) Quin dels *tone mapping operators* reproduïa millor les relacions de tonalitats de grisos percebudes entre les cares dels cubs.
- 2) Quin operador és el que obté un resultat perceptual més semblant a l'escena HDR real.

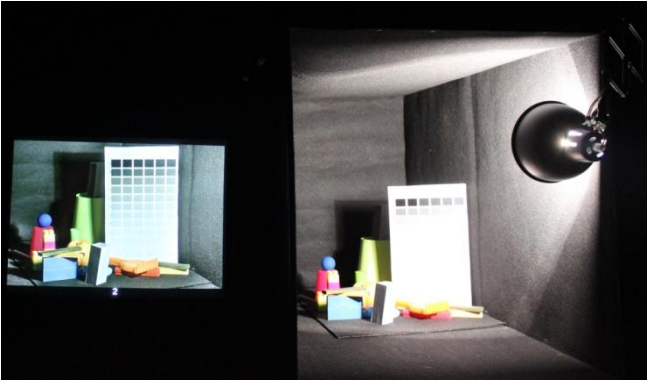


Fig. 4. Imatge que mostra la situació que veia l'observador en el moment que feia el pairwise comparison.

Primer experiment: *Matching* tonalitats de grisos

Per la primera part d'aquest experiment, vam lliurar un formulari on els observadors indicaven les coordenades de la taula de referència que corresponien a cadascuna de les cares visibles dels cubs. Per la segona part, en canvi, vam lliurar un formulari que seguia el mateix estil, però contenia una graella, on cada fila corresponia a un operador identificat per un número a l'atzar, de manera que l'observador no sabés quin operador estava avaluant.

Un cop vam obtenir les dades dels subjectes, vam recollir les de la primera part i vam passar els valors de les coordenades que ens havien assenyalat els subjectes als valors de luminància corresponents que havíem mesurat amb l'espectroradiòmetre. Amb aquestes dades, hem calculat la mitjana (L_{obs}) i la desviació estàndard (σ_{obs}) per cada cara de cada cub. Aquests valors han estat els que hem pres com a referència per acabar extraient els resultats finals de l'experiment.

De la segona part, vam recollir les dades i vam passar els valors de coordenades indicades, de cada cara per cada operador, als valors de luminància corresponents mesurats per l'espectroradiòmetre. Amb aquestes dades, hem calculat la mitjana (L_{TMO}) i la desviació estàndard (σ_{TMO}) per cada cara visible de cada cub per cadascun dels 15 algorismes que s'han presentat en la secció 3.

Posteriorment, hem calculat l'error per cada algorisme en una escena segons la fórmula:

$$Error_{TMO_j} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

On $j \in [1..n]$. Donada una cara visible i ,

$$D_i = |L_{obs_i} - L_{TMO_i}| \quad (2)$$

on L_{obs_i} és la mitjana dels valors de luminància dels observadors en l'escena real per la cara i i L_{TMO_i} és la mitjana dels valors de luminància dels observadors en la imatge *tone mapped* per un operador j per la cara i .

$p_i = 1/\Delta D_i$, on $\Delta D_i = \sigma_{obs_i} + \sigma_{TMO_i}$. σ_{obs_i} és la desviació estàndard dels observadors en l'escena real per la cara i i σ_{TMO_i} és la desviació estàndard dels observadors en la imatge *tone mapped* de l'operador j per la cara i .

Així doncs l'error final de l'experiment per cada algorisme ha estat:

$$ErrorTotal_{TMO_j} = \sum_{i=1}^m Error_{TMO_{jm}} \quad (3)$$

on m és el nombre d'escenes avaluades, que en el nostre cas és 2, $i, j \in [1..n]$.

El ranking final, segons aquest experiment, amb els valors $ErrorTotal_{TMO_j}$ els podeu veure en la Taula 1.

Posició Ranking	Algorisme	ErrorTotal _{TMO} (cd/m ²)
1	iCAM	7.4585
2	ReDe	10.9138
3	Drag	11.7937
4	Dura	12.0678
5	Meyl	12.1041
6	Otaz	13.0275
7	Rein	13.1809
8	Kraw	15.5557
9	KimK	17.1820
10	Yuan	18.9869
11	Ashi	19.8166
12	Ferr	20.6225
13	Mert	20.6343
14	Ferw	23.0437
15	Fatt	27.8681

Taula 1. En aquesta taula es mostra el ranking final, ordenat per l' $ErrorTotal_{TMO}$ comès per cada algorisme en l'experiment 1 del treball.

Segon experiment: *Pairwise Comparison*

Per aquest experiment, vam recollir les dades de les comparacions en una matriu:

$$Comp_{i,j} \begin{cases} 1, & i \text{ millor que } j \\ 0, & j \text{ millor que } i \end{cases}$$

on $i, j \in [1..n]$.

Un cop tots els subjectes van realitzar l'experiment, vam sumar les matrius *Comp* respectives amb l'objectiu de començar a construir el ranking, obtenint la matriu *CompTotal*.

Algorismes que construeixen un ranking a partir de les dades d'un *pairwise comparison* n'hi ha uns quants. Negahban et al.[24] elabora un ranking a partir de les dades recollides per un *pairwise comparison*. El problema és que ell segueix el model de *Bradley-Terry-Luce* (BTL), on cada objecte té una puntuació associada que determina la probabilitat del resultat del *pairwise comparison* entre els objectes. Com que nosaltres no teníem aquesta puntuació

associada, hem seguit el mètode de ranking proposat per Wauthier et al.[25], més concretament, ens hem centrat en el *Balanced Rank Estimation* (BRE), que prediu el ranking amb una uniformitat aproximada al llarg de tota la classificació. En la Taula 2 us presentem la classificació final segons aquest mètode de rankeig.

També, pel nostre compte, hem realitzat un altre mètode de ranking molt més simple, basat en la suma per files de la matriu *CompTotal*:

$$ValorTMO_i = \sum_{s=1}^t \sum_{r=1}^m \sum_{j=1}^n CompTotal_{i,j} \quad (4)$$

Donat un *tone mapping operator* i on $i \in [1..n]$, t és el nombre de subjectes, m és el nombre d'escenes i n és el nombre de *tone mapping operators* utilitzats. Us presentem el seu resultat en la Taula 3.

Així doncs, segons el primer experiment, els TMOs que reproduïen millor les relacions perceptuals entre les tonalitats de grisos que apareixen en les escenes HDR són: iCAM, ReDe i Drag. En canvi, segons el segon experiment, el del *pairwise comparison*, els TMOs que reproduïen millor l'escena real són: Kraw, KimK i Ferw.

Podem observar, segons els resultats, que, en el primer experiment, iCAM està molt per sobre de la resta, això pot ser degut a que el seu model de color reproduïx molt bé les relacions entre les tonalitats de grisos percebudes. També observem que els operadors Kraw i KimK, en el segon experiment, estan destacats respecte la resta.

Posició Ranking	Algorisme	Valor segons BRE Ranking[25]
1	Kraw	24
2	KimK	32
3	Ferw	68
4	Rein	74
5	Ferr	75
6	Drag	114
7	Yuan	184
8	Otaz	212
9	Dura	230
10	iCAM	245
11	Ashi	354
12	Meyl	356
13	Mert	368
14	ReDe	372
15	Fatt	422

Taula 2. En aquesta taula es mostra el ranking del segon experiment segons el mètode de ranking *Balanced Ranking Estimation* de Wauthier et al.[25].

Posició Ranking	Algorisme	ValorTMO
1	Kraw	219
2	KimK	215
3	Ferw	204
4	Rein	194
5	Ferr	193.5
6	Drag	174
7	Yuan	139
8	Otaz	125
9	Dura	116
10	iCAM	110.5
11	Ashi	54
12	Meyl	53
13	Mert	47
14	ReDe	45
15	Fatt	10

Taula 3. En aquesta taula es mostra el ranking del segon experiment segons el nostre mètode propi de fer la suma per files de la matriu *CompTotal*.

6. CONCLUSIÓ

En aquest treball s'han dut a terme dos experiments psicofísics sobre 15 algorismes diferents *tone mapping*, amb l'objectiu de poder construir un ranking que reflecteixi quin són els algorismes, perceptualment parlant, millors.

En el primer experiment hem vist que el millor, per diferència, ha estat el iCAM, però, pel segon experiment, han estat el Kraw i el KimK. Per tant, el iCAM és l'algorisme que reproduïx millor les relacions de les tonalitats de grisos percebudes, mentre que el Kraw i el KimK són els algorismes que els subjectes han escollit com que tenen resultats més semblants a l'escena HDR real.

Gràcies a aquestes observacions, podem concloure que, per determinar quin algorisme té un millor comportament perceptual, tenim en compte la visió general de la imatge, com per exemple els objectes en la part fosca, les ombres, el color dels objectes de la part brillant, la intensitat general de la imatge, etc. Així doncs, un operador que reproduïx els cubs i les taules de referència com el iCAM, però que la resta de la imatge fos com el Kraw o el KimK, seria el millor algorisme perceptual, ja que seria consistent en els dos criteris.

Un treball futur necessari seria ampliar el nombre de subjectes del segon experiment, ja que així l'error de les mostres es reduïrien.

Aquests resultats poden ser utilitzats per desenvolupar un nou *tone mapping operator* que tingui en compte tot el que s'ha après en aquest experiment.

Si realitzéssim un experiment amb els *tone mapping operators* i un *eye-tracker*, podríem saber quins punts de la imatge prenen els subjectes com a referència.

AGRAÏMENTS

Vull agrair als Drs. Xavier Otazu i Alejandro Párraga les hores que han dedicat a ensenyar-me els conceptes de

l'àmbit i la paciència que han tingut amb els meus errors de novell.

També voldria agrair a Banterle et al.[23] el seu *Toolbox* per Matlab i a tots els autors que han compartit el seu codi, ja que ha simplificat bastant la feina d'obtenir imatges *tone mapped*.

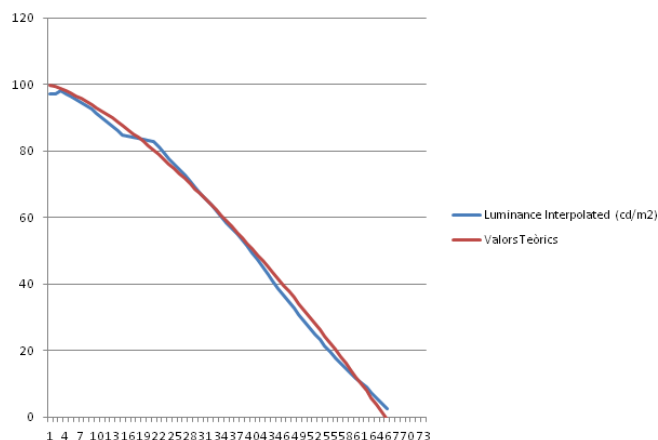
I, per últim, donar les gràcies a en Joan Mariné.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Snowden, P. Thompson and T. Troscianko, *Basic Vision an introduction to visual perception*, chapter 1-2, 2006.
- [2] A.C. Guyton and J.E. Hall, *Tratado de Fisiología Médica*, chapter 50-51, 2006.
- [3] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik and P. Debevec, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting*, chapter 6, 2005.
- [4] O. Motto and X. Otazu, "Evaluating Tone Mapping Operators for High Dynamic Range Images", Master in Computer Vision and Artificial Intelligence, unpublished.
- [5] J.J.A. Ferwerda, S.N. Pattanaik, P. Shirley and D.P. Greenberg, "A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis", In Proceedings of ACM SIGGRAPH, ACM Press, 249-258, 1996.
- [6] F. Drago, W.L. Martens, K. Myszkowski and H.-P. Seidel, "Perceptual Evaluation of Tone Mapping Operators", In ACM SIGGRAPH Conference Abstracts and Applications, 2003.
- [7] P. Ledda, A. Chalmers, T. Troscianko and H. Seetzen, "Evaluation of Tone Mapping Operators using a High Dynamic Range Display", In Proceedings of ACM SIGGRAPH, Annual Conference on Computer Graphics, pp. 640-648, 2005.
- [8] J. Kuang, G.M. Johnson and M.D. Fairchild, "iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering", *J. Vis. Commun. image R.* 18, 406-414, 2007.
- [9] A. Yoshida, V. Blanz, K. Myszkowski and H.-P. Seidel, "Perceptual Evaluation of Tone Mapping Operators with Real-World Scenes", *Proc. Human Vision and Electronic Imaging 10, SPIE*, pp. 192-203, 2005.
- [10] M.H. Kim and J. Kautz, "Consistent Tone Reproduction", *Proceeding Computer Graphics and Imaging*, 2008.
- [11] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen and N. Chiba, "Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes", *Proc. of EUROGRAPHICS*, P. Brunet and D.W. Fellner, eds., vol. 22 of *Computer Graphics Forum*, 419-426, 2003.
- [12] E. Reinhard and K. Devlin, "Dynamic Range Reduction inspired by Photoreceptor Physiology", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 11, no. 1, pp. 13-24, 2005.
- [13] M. Ashikhmin, "A Tone Mapping Algorithm for High Contrast Images", *Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering*, 2002.
- [14] R. Fattal, D. Lischinski and M. Werman, "Gradient Domain High Dynamic Range Compression", In Proceedings of ACM SIGGRAPH, ACM Press, 249-256, 2002.
- [15] F. Durand and J. Dorsey, "Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images", In Proceedings of ACM SIGGRAPH, ACM Press, 257-266, 2002.
- [16] G. Krawczyk, K. Myszkowski and H.-P. Seidel, "Lightness Perception in Tone Reproduction for High Dynamic Range Images", *Proc. of EUROGRAPHICS*, M. Alexa and J. Marks, eds., vol. 24, no 3, 2005.
- [17] L. Meylan, D. Alleysson and S. Susstrunk, "Model of retinal local adaptation for the tone mapping of color filter array images", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, no. 9, 2007.
- [18] X. Otazu, "Perceptual tone-mapping operator based on multiresolution contrast decomposition", *ECVP*, 2012.
- [19] Y. Li, L. Sharan and E.H. Adelson, "Compressing and Companding High Dynamic Range Images with Subband Architectures", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no.3, pp. 836-844, 2005.
- [20] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda, "Photographic Tone Reproduction for Digital Images", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, no.3 pp. 267-276, 2002.
- [21] S. Ferradans, M. Bertalmio, E. Provenzi and V. Caselles, "An Analysis of Visual Adaptation and Contrast Perception for Tone Mapping", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 33, no. 10, 2011.
- [22] T. Mertens, J. Kautz, F. Van Reeth, "Exposure Fusion", *15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp. 382-390, 2007.
- [23] F. Banterle, A. Artusi, K. Debattista and A. Chalmers, "Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice", *AK Peters, CRC Press*, 2011.
- [24] S. Negahban, S. Oh and D. Shah, "Iterative Ranking from Pairwise Comparisons", *Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS)*, P. Barlett, F. Pereira, C. Burges, L. Bottou, K.Q. Weinberger, eds., MIT Press, pp. 2483-2491, 2012.
- [25] F.L. Wauthier, M.I. Jordan and N. Jojic, "Efficient Ranking from Pairwise Comparisons", *Proceeding of 30th International Conference on Machine Learning*, 2013.

APÈNDIX

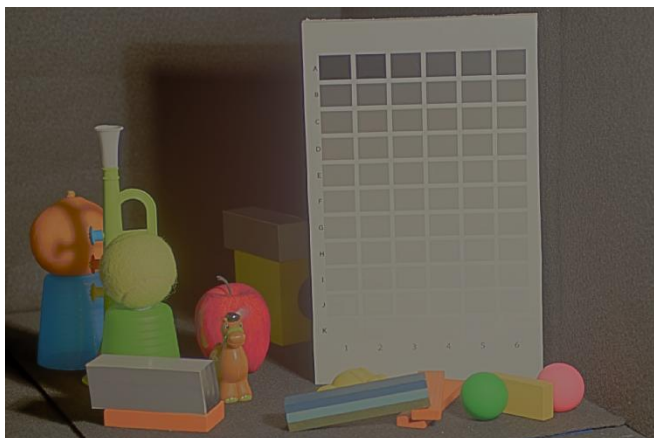
A1. CORBA DE LUMINÀNCIES DE LA TAULA DE REFERÈNCIA



En aquest gràfic podem observar els valors empírics mesurats amb el espectroradiòmetre sobre la taula de referència que contenia l'escena HDR. De color blau estan les mesures extremes amb el espectroradiòmetre i de color vermell és l'equació que segueix aproximadament: $y = 100 - 0.2658x^{1.5}$.

A2. IMATGES TONE MAPPED

Les imatges que es mostren en aquest apartat han estat linealitzades.



Ashikhmin[13].



Fattal et al.[14].



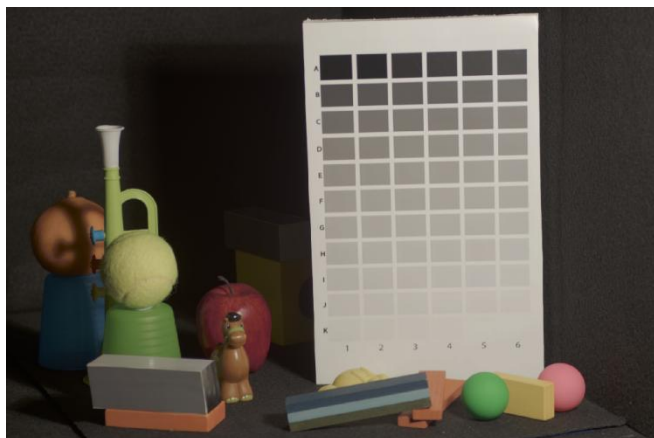
Drago et al.[11].



Ferradans et al.[21].



Durand and Dorsey[15].



Ferwerda et al.[5].



Kuang et al.[8].



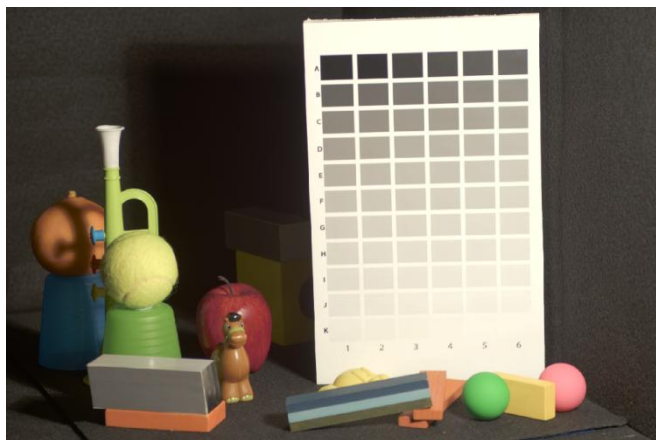
Mertens et al.[22].



Kim and Kautz[10].



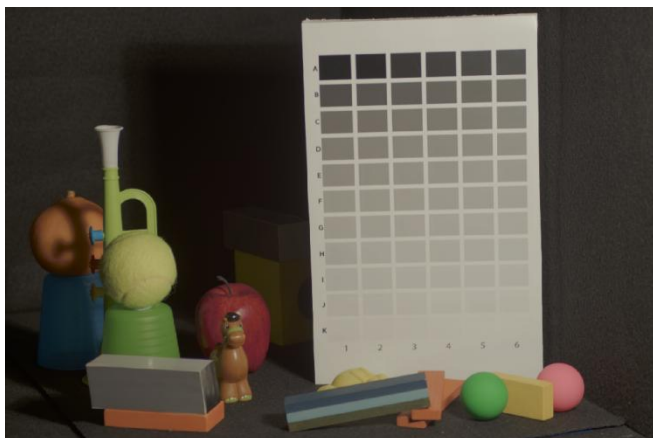
Meylan et al.[17].



Krawczyk et al.[16].



Otazu[18].



Reinhard et al.[20].



Reinhard and Devlin[12].



Li et al.[19].

A3. GLOSSARI

Lightness: Quantitat perceptual, mesurada pel Sistema Visual Humà, que descriu la quantitat de llum reflectida d'una superfície normalitzada pel nivell d'il·luminació [16].

Brightness: Percepció creada per la luminància d'un objectiu visual.

Luminància: Mesura fotomètrica de la intensitat lluminosa per unitat d'àrea de la llum que viatja en una direcció determinada.