
La il·luminació

PID_00250746

Llogari Casas
Álvaro Ulldemolins

Temps mínim de dedicació recomanat: 6 hores





Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

1. Conceptes bàsics	5
1.1. Espectre visible	5
1.2. Barreja de colors	6
1.3. La nostra percepció de la llum	7
1.4. Temperatura de color	7
2. Els llums i la renderització	10
3. El comportament de la llum	11
3.1. Llei del quadrat invers	11
3.2. Reflexió	12
3.3. Refracció	14
4. La qualitat de la llum	16
4.1. Intensitat	16
4.2. Color	17
4.3. Suavitat	18
4.4. Patró	19
4.5. Animació	20
4.6. Ombres	20
5. Tipus de llums	23
5.1. Llums estàndard	24
5.1.1. Llum omni	24
5.1.2. Llum <i>spot</i>	26
5.1.3. Llum <i>direct</i>	28
5.1.4. Llum <i>sky lighth</i>	30
5.1.5. Llum d'àrea	32
5.2. Llums fotomètriques	33
6. Les ombres	35
6.1. La importància de les ombres	35
6.2. Tecnologia de les ombres	36
6.2.1. Il·luminació directa	37
6.2.2. Il·luminació global	37
6.2.3. Utilització de les ombres	38
7. Tècniques d'il·luminació bàsiques	45
7.1. Il·luminació en tres punts	45
7.1.1. Llum principal	48
7.1.2. Flaix compensatori primari	50
7.1.3. Llum posterior	54

7.1.4.	Relació llum principal-flaix compensatori	56
7.1.5.	Il·luminació en <i>array</i>	58
8.	Tècniques d'il·luminació avançades	62
8.1.	Distribució de la llum	62
8.2.	<i>Raytracing</i>	63
8.3.	Radiositat	66
8.4.	<i>Photon mapping</i>	67
8.5.	<i>Final gathering</i>	69

1. Conceptes bàsics

Estem tan acostumats a la llum que sovint no ens parem a pensar que és fonamental per a l'existència humana. La llum dicta les nostres activitats, influeix en la nostra manera de pensar i afecta la nostra percepció de totes les coses.

A continuació veurem uns quants conceptes referents a la llum i com s'interrelacionen a l'hora de crear una composició en 3D.

1.1. Espectre visible

En la nostra vida diària, estem envoltats per diferents ones, des de rajos X fins a ones de ràdio. La diferència principal entre aquestes rau en **la longitud d'ona**, que forma part de l'espectre electromagnètic, el qual va des de les curtíssimes ones de rajos X fins a les llargues longituds d'ona dels senyals radioelèctrics. Entre aquests dos extrems, hi ha una **petita banda que resulta visible** per a nosaltres, la **llum**.



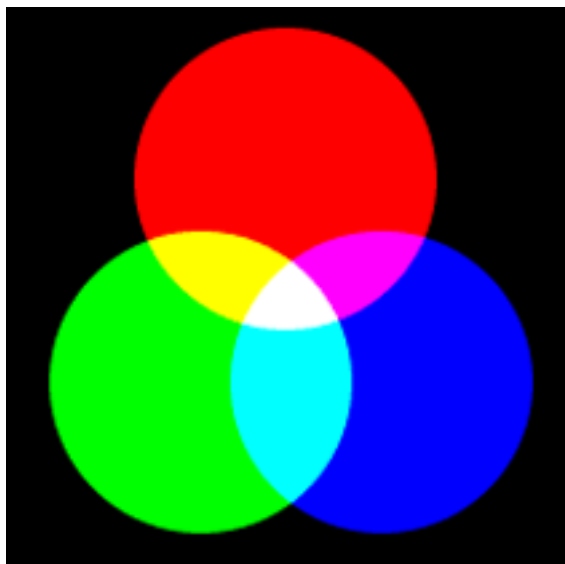
La llum visible és a prop de la banda dels rajos X, ja que la seva longitud d'ona és baixa, aproximadament entre 400 nanòmetres¹ i 800 nanòmetres. A aquesta subsecció es denomina l'**espectre visible**. Pujant per aquest espectre, ens trobem amb una infinita gamma de colors, des del violeta, blau, verd groc, taronja i vermell, fins a sortir de l'espectre visible i trobar la radiació infraroja, la qual experimentem com a calor.

⁽¹⁾Bilionèsima part d'un metre.

En un entorn digital, la banda que podem representar està marcada, normalment, per les limitacions de la pantalla de visualització i del format del fitxer en el qual s'exporta la imatge final, i es poden representar centenars, milers o milions de colors.

1.2. Barreja de colors

Aquest espectre de colors, està representat en el nostre monitor usant **tres colors: vermell, verd i blau (RGB, per *red*, *green* i *blue* en anglès)**. Aquests són els **tres colors primaris de la llum**. La barreja additiva d'aquests tres colors ens dóna la llum blanca que coneixem. Això ho podem demostrar en 3D si superposem tres llums RGB: allà on se superposen, veuríem el color blanc.



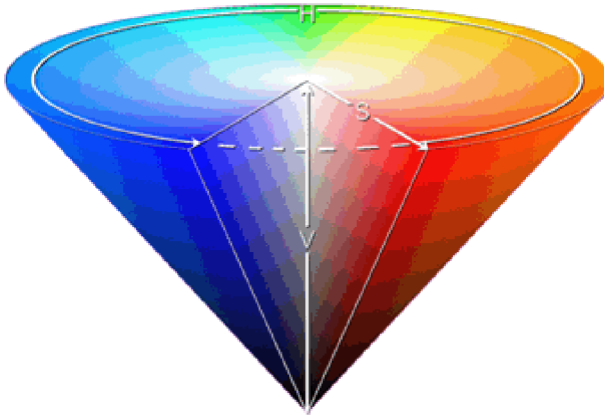
Vermell, verd, blau. Espai de colors additiu

La **barreja subtractiva** funciona al revés, comença amb un fons blanc i barreja els tres colors primaris per a aconseguir el **negre**. Aquesta barreja s'utilitza, per exemple, en les impressores, però en lloc d'utilitzar els colors primaris, utilitza els complementaris: cian, magenta i groc. Les màquines professionals també afegixen el negre, i així donen lloc a la famosa combinació CMYK, utilitzada àmpliament en impressió.



Cian, magenta, groc. Espai de colors subtractiu

Normalment en els paquets de modelatge 3D s'utilitza la barreja additiva RGB, encara que també hi ha un altre model anomenat **HSV** (*hue, saturation, value*) que està compost per un altre patró de modificació de la llum mitjançant els paràmetres de to, saturació i lluentor. Aquest model es defineix com un con, en el qual tal com es puja o es baixa i s'apropa o s'allunya del centre, es va modificant el valor del color que s'obté.



1.3. La nostra percepció de la llum

Quan treballem amb l'ordinador, la nostra targeta gràfica ens fa creure que veiem un "color vertader", però en realitat veiem una interpretació molt restringida de l'espectre visible. De fet, només veiem la combinació de tres LED de la pantalla, vermell, verd i blau, que conformen un píxel que ha de representar colors d'altres longituds d'ona.

La raó per la qual nosaltres podem percebre l'espectre sencer sense restriccions és la manera d'operar que té l'ull humà. Els nostres ulls només responen a tres parts de l'espectre visible, gràcies al mostreig d'uns receptors fotosensibles anomenats **cons**. Hi ha tres tipus de cons, localitzats a la nostra retina, cadascun dels quals respon a la llum de diferents longituds d'ona. Aquests tres tipus es corresponen majoritàriament amb el vermell, el verd i el blau, però no estan limitats a aquests colors.

1.4. Temperatura de color

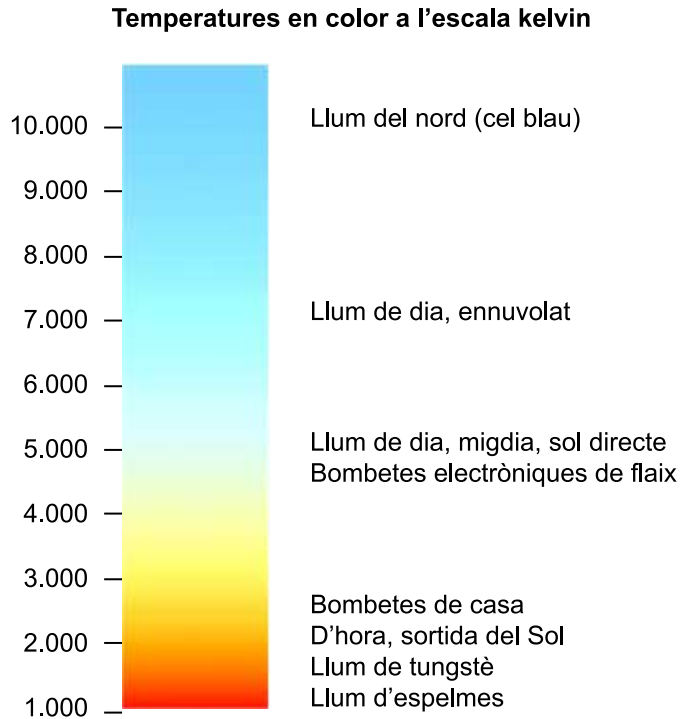
La manera de mesurar la temperatura de color radica en l'escala centígrada, però en els paquets 3D s'utilitza àmpliament l'escala amb graus kelvin.

$$K = C - 273$$

Restant 273 a la temperatura centígrada obtenim la temperatura en graus kelvin.

Els graus kelvin

La raó d'aquest canvi prové del fet que la temperatura kelvin comença en el zero absolut, punt de congelació de l'aigua. Així que el zero absolut són - 273 graus centígrads.



Normalment, en la majoria de paquets 3D s'utilitzen graus kelvin per a mesurar la temperatura dels diferents tipus de llums que componen el paquet, per això és important conèixer bé els valors més generals que s'utilitzen a l'hora de crear una escena en 3D.

Temperatures de color comunes	Kelvin
Espelma	1.900
Llum del sol: matinada o crepuscle	2.000
Bombeta de 100W	2.865
Llum de tungstè de 500W-1K	3.200
Fluorescent	3.200-7.500
Llum de tungstè de 2000W-10K	3.275-3.400
Llum del sol: molt d'hora / molt tard	4.300
Llum del sol: tarda	5.000
Llum de dia	5.600
Cel	6.000-7.000
Llum del sol d'estiu amb cel blau	6.500
Llum del cel	12.000 - 20.000

Basat en la seva investigació, es va establir l'escala de temperatura de color, que és la més utilitzada en el món físic de disseny d'il·luminació. Un llum de tungstè de 2 K té una temperatura de color de 3.275 K, per la qual cosa el seu rang emet una llum propera al final del color groc en l'espectre visible; aquest punt es considera llum blanca, ja que conté prou longituds d'ona dels altres components de color.

Cal recalcar que el color de la temperatura és el color visible que veiem, i no la temperatura a la qual es posa el filament.

2. Els llums i la renderització

Hi ha una relació entre els diferents tipus de llums que s'utilitzen per a il·luminar una escena en un programa d'animació 3D i el motor de càlcul que utilitza el nostre programari per a obtenir (renderitzar) una imatge.

Efectivament, la **renderització** d'una escena és el procés pel qual es genera una imatge 2D a partir d'una escena 3D, en la qual es calculen i s'apliquen les diferents llums, efectes i materials, amb la finalitat d'obtenir una imatge fotorealista.

En la majoria de paquets 3D hi ha, almenys, un **motor de renderització** o, com també se sol anomenar, **motor de càlcul**, per a generar aquesta imatge final. En molts es pot incorporar un programari extern o ja inclòs en la mateixa aplicació com un altre motor de renderització secundari, amb la finalitat d'augmentar les possibilitats del programari i la qualitat de la imatge resultant. Moltes vegades, aquest segon motor porta implícita una sèrie de millores amb les quals són compatibles les característiques del programa 3D, però de vegades no totes les eines del programari són compatibles i s'hi afegeixen altres eines semblants en funcionament, les quals sí que suporten el nou motor.

En el nostre cas, molts dels llums que vénen amb el programari són compatibles, però per a aprofitar al màxim tots els beneficis del motor assíduament és millor utilitzar els llums específics que subministra el mateix motor. L'ús és exactament el mateix, però el motor diferencia el tipus de llum i aplica un altre càlcul amb el qual s'obtenen millors resultats.

3. El comportament de la llum

La llum obeeix a un grup de regles determinades, algunes rellevants i que ens faran falta per a treballar en animació per ordinador: la llei del quadrat invers, la reflexió i la refracció.

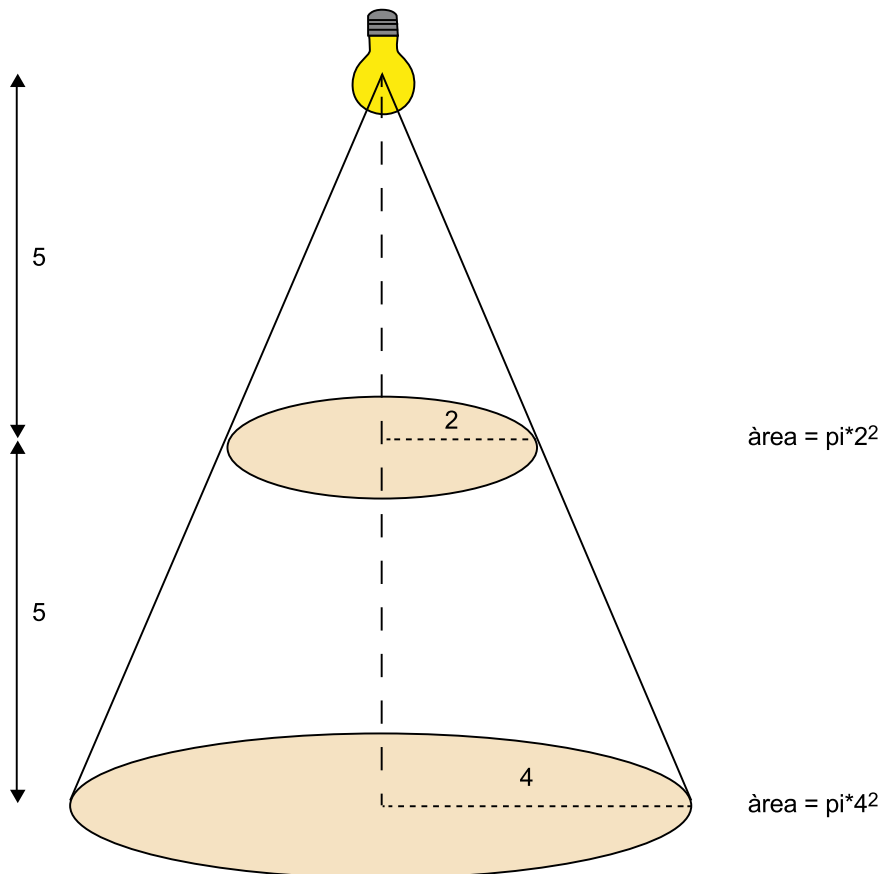
A continuació veurem amb més detall cadascuna d'aquestes regles.

3.1. Llei del quadrat invers

Aquesta regla explica com s'atenua la llum segons la distància a què estigui, i és aplicable a tots els tipus de radiació.

$$I = 1/d$$

Vegem-ne un exemple. Imaginem un foc, com més a prop siguem més ens cremem, però no és el mateix ser a 50 cm que a 2 m, la calor que es desprèn no disminueix uniformement. En aquest efecte veiem la llei del quadrat invers en acció.



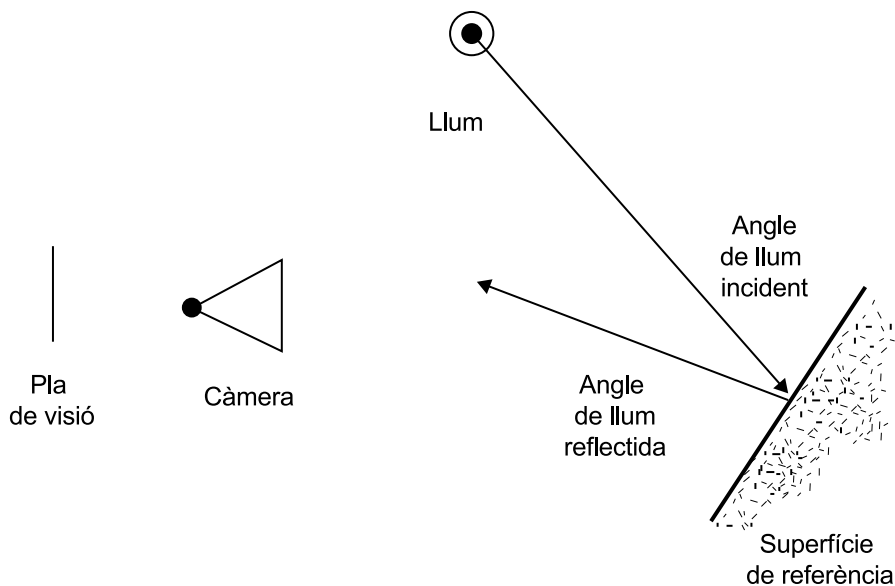
Aquesta llei també és aplicable a la lluminositat de la llum (energia d'emissió per segon), la qual altera la brillantor que percep el visionador. Veiem que una llum brilla més com més a prop en som.

Normalment, en la majoria de paquets 3D podem configurar aquest paràmetre (caiguda de la llum) perquè tingui un comportament irreal i que la llum s'atenuï de manera lineal (valor per defecte en molts programaris) o, al contrari, perquè segueixi les regles físiques del món real i tingui una atenuació quadràtica.

3.2. Reflexió

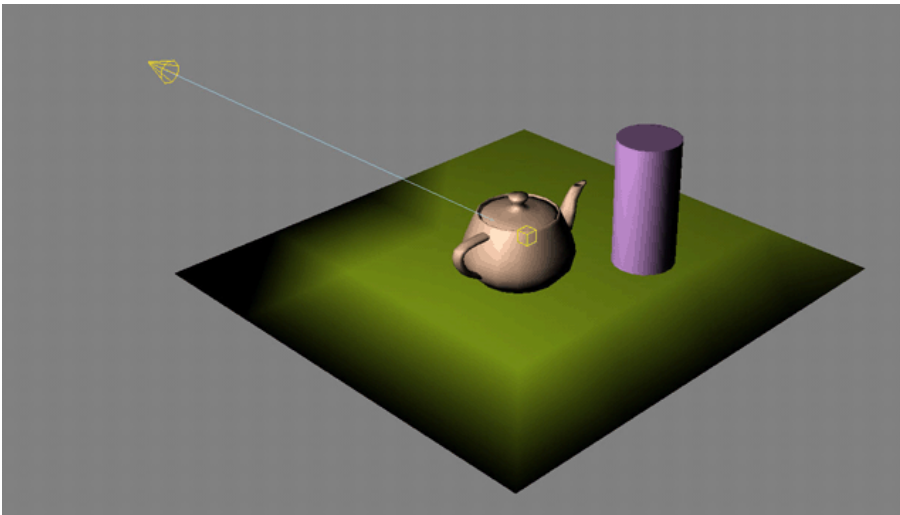
La llum també obeeix a la **regla de la reflexió** que explica **com es reflecteix la llum sobre una superfície**.

Aquesta llei ens diu que l'angle de reflexió és igual a l'angle d'incidència, el qual és calculat en referència a la superfície normal del punt d'incidència. O sigui, la **llum es reflecteix en el mateix angle en el qual es projecta**.

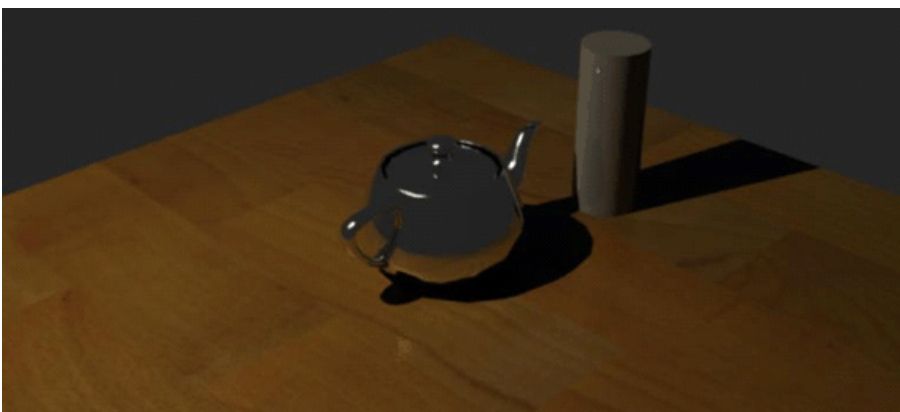


Aquesta característica llum rebotada no la podem visualitzar en el visor de treball del programa 3D fins que no duguem a terme el procés *de render*², ja que és necessari un procés bastant costós des del punt de vista computacional i, de moment, la tecnologia no permet seguir-lo en temps real. Actualment només veiem la llum projectada.

⁽²⁾ Càlcul de la integració de tots els elements d'una escena, juntament amb la llum i els materials per a obtenir una imatge.



Un altre aspecte destacat de la reflexió de la llum és el **tipus de material sobre el qual es reflecteix**. S'ha de tenir en compte que no es reflectirà de la mateixa manera sobre una superfície d'un material com ara el vidre, que reflecteix moltíssim la llum, que sobre una superfície de fusta, que absorbeix molta llum i gairebé no la reflecteix. Per tant, per a obtenir els millors resultats, hem de **valorar el tipus de material que estarà assignat a l'objecte que volem il·luminar**.

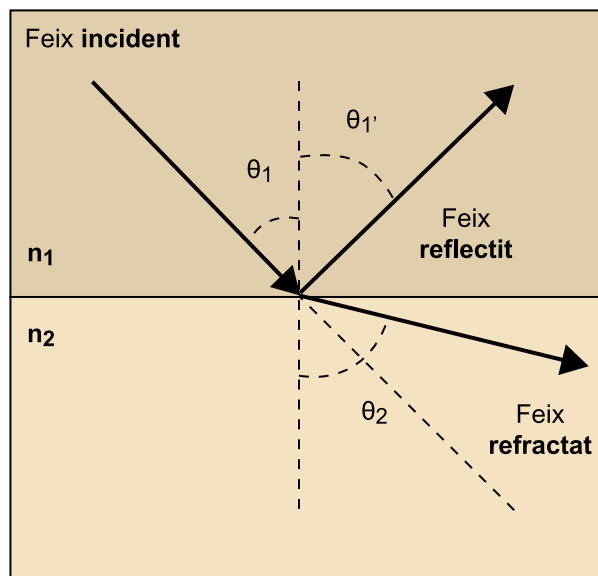


La majoria dels paquets 3D disposen d'una extensa gamma de materials amb propietats configurables per al reflex i l'absorció de la llum que fan que l'objecte que estem il·luminant sigui més realista.

3.3. Refracció

La refracció descriu com es deforma la llum quan travessa un objecte, obeint la llei de Snell, que concerneix materials transparents i semitransparents. Bàsicament, ens diu l'índex de refracció quan la llum passa pel material.

Aquest índex es calcula prenent la velocitat de la llum en un buit i dividint-la per la velocitat de la llum en el material. atès que la llum no viatja mai més ràpid que en el buit, aquest valor mai no serà més baix d'1.0.

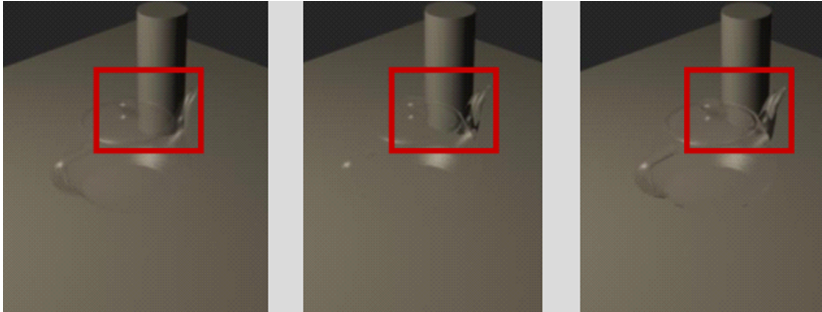


Índexs de refracció

Material	IOR
Aire	1,003
Alcohol	1,329
Aigua	1,330
Gel	1,500
Maragda	1,570
Rubí	1,770
Cristall	2,000
Diamant	2,149

Igual que en la propietat de reflexió, també disposem de paràmetres en els materials dels paquets 3D per a modificar aquesta característica.

En l'exemple següent veiem un mateix objecte amb diferents nivells de refracció. La base del cilindre es deforma en observar-ho a través de la tetera.



D'esquerra a dreta, IOR = 1.0, IOR = 1.02 i IOR = 1.04

4. La qualitat de la llum

Quan ens referim a la **qualitat de la llum** intervenen molts factors, i sovint d'una manera bastant subjectiva. Si preguntem a diferents directors de fotografia, cadascun ens donarà una versió bastant personal del que a ell li suggereix o creu que és la qualitat de la llum; les seves descripcions, sovint relatives a intensitat, color, patró i moviment de les ombres, ens donaran una idea de com podem ajustar una llum, però sovint també apareixeran conceptes com la motivació que volem representar o l'ambient que volem crear.

Per aquest motiu, definim una sèrie de conceptes que s'han de tractar i estudiar amb la finalitat d'entendre d'una manera precisa el concepte de la llum.



4.1. Intensitat

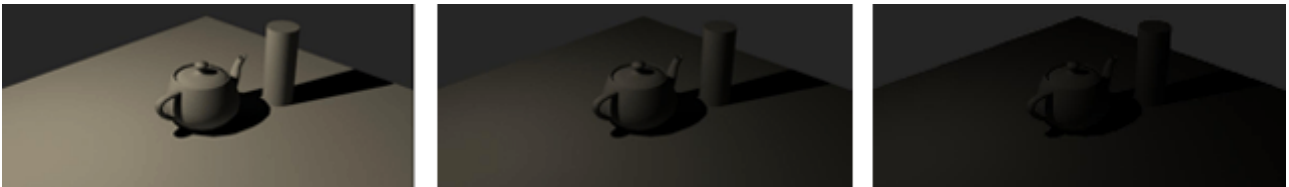
Òbviament, la **intensitat** és la **primera característica i la més remarcable de la llum**. La llum amb una intensitat elevada és el que anomenem en l'escena **llum dominant**, que crearà en la composició les ombres més marcades.

En el món real, quan es grava una escena, s'utilitzen els controls d'exposició perquè es capturi la llum que ens interessa de l'escena. En el món 3D, en canvi, no tenim aquest control, ja que no hi ha res, per la qual cosa la intensitat del punt de llum afecta directament la brillantor i el contrast de la imatge generada.

En el programari 3D, la intensitat d'una llum normalment està controlada pel seu color i el seu factor de multiplicació o brillantor. A part, també hi ha un **control d'atenuació** (*decay*) d'aquesta intensitat que ens permet controlar com va desapareixent la llum.

En el món real totes les llums tenen una atenuació proporcional a la regla del quadrat invers, explicada en l'apartat anterior, que estableix que la intensitat disminueix de manera quadràtica en proporció a la distància a què es troba de la font.

En gràfics per ordinador, l'atenuació es pot representar com la regla del quadrat invers o amb altres models. Sovint, aquesta regla és massa restrictiva i gràcies al programari podem especificar el punt inicial de caiguda de la llum, per a obtenir uns resultats més realistes. Per exemple, s'ha pogut fer que la caiguda tingui un comportament lineal, la qual cosa ens donaria una predicció més propera del que hauríem de veure.



D'esquerra a dreta, sense atenuació, atenuació lineal i atenuació per quadrat invers.

4.2. Color

Les similituds i les diferències dels colors d'il·luminació d'una escena ens poden ajudar a determinar-ne l'atmosfera.

Per exemple, amb colors més neutres donem un to més fosc.

Els colors també tenen propietats emocionals i la gent reacciona de manera diferent depenent de l'associació que tinguin amb cada color. No obstant això, hi ha colors que evocuen respostes similars en la gent. L'ús de colors freds enfront de colors calents per part dels artistes ha estat constant durant segles.



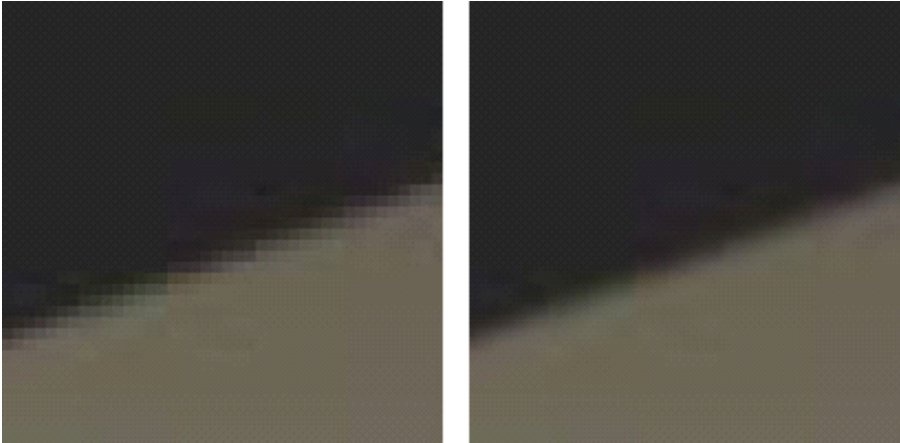
El color és extremadament útil per a reforçar el tipus de font de llum que representa. Una llum blava ens pot ajudar a representar una escena trista o una calma serena, mentre que una llum vermella s'utilitza normalment per a la guerra o la passió.



4.3. Suavitat

La suavitat de la llum està molt difosa en el món real, i s'utilitza àmpliament en el món del cinema. En gràfics per ordinador, no apareix tant com caldria.

Pensem que amb un programari 3D no és tan difícil fer aparèixer rangs de llum de forta a suau; normalment amb les configuracions preestablertes que ofereixen aquests programaris obtenim unes ombres molt marcades amb contorns sense aliàsing (efecte visual tipus dents de serra o graó), però en el món real, gairebé mai no observem aquest fenomen, gairebé sempre la llum és suau.



A l'esquerra, sense aliàsing i a la dreta, amb aliàsing.

Per a resoldre aquest problema podem utilitzar una sèrie d'elements com mapes d'ombres i il·luminació global.

4.4. Patró

Les aproximacions per a recrear aquest aspecte de la llum en 3D varien des del modelatge d'un objecte davant de la llum, que produeix un **efecte de patró**, fins a l'ús d'imatges de textures per a provocar que la llum actui com si fos un projector. En 3D podem utilitzar aquesta tècnica com a imatges d'escala de grisos aplicats a les llums, en les quals el negre pur bloqueja tota la llum, i el blanc pur permet passar la llum, a manera de plantilla. Per a obtenir un patró en moviment cíclic, tant es poden utilitzar imatges fixes (jpg, tiff, tga, etc.) com arxius animats (.avi, etc.),.

Vegeu també

Veurem aquests conceptes en l'apartat "Les ombres".



Físicament, col·locant objectes davant de les llums, es treballa de la mateixa manera que amb la utilització de patrons. No obstant això, si la finestra no actua bé en el procés de renderització, és millor utilitzar una imatge que actui com a patró projectada des de la llum.

4.5. Animació

L'animació no és una característica que normalment s'associï a la llum, especialment si pensem en fotografies o pintures, però és una qualitat molt comuna, per exemple, en indicadors de cotxes, el parpelleig de llums de neó o l'ocàs del sol. En tots aquests exemples, podem trobar l'animació del moviment de la llum, de la seva potència o de la seva caiguda.

En la majoria dels paquets 3D, **tots els paràmetres que corresponen a una llum són animables** –color, intensitat, ombres, direcció, efectes, etc.–, i es controlen fàcilment mitjançant interruptors d'encesa/apagat o amb corbes d'animació.

4.6. Ombres

Les ombres ens donen realisme a l'escena, consistència i unió en la composició.

No cal pensar en les ombres com allò en què les coses estan amagades (encara que són molt útils per a ocultar imperfeccions), sinó que les ombres ens ensenyen coses que d'una altra manera seria impossible de veure.

El **disseny de les ombres és una tasca tan important com el disseny de la llum**. Només cal que ens fixem en el temps que es necessita per a calcular les ombres quan fem el processament (renderització) d'una escena; segons el tipus d'ombres utilitzat, es fa servir un **algorisme** o un altre, que ens donarà les diferents qualitats i temps.

Vegeu també

Les ombres són un factor clau a l'hora de definir una llum, per això les veurem més endavant, en l'apartat "Les ombres".

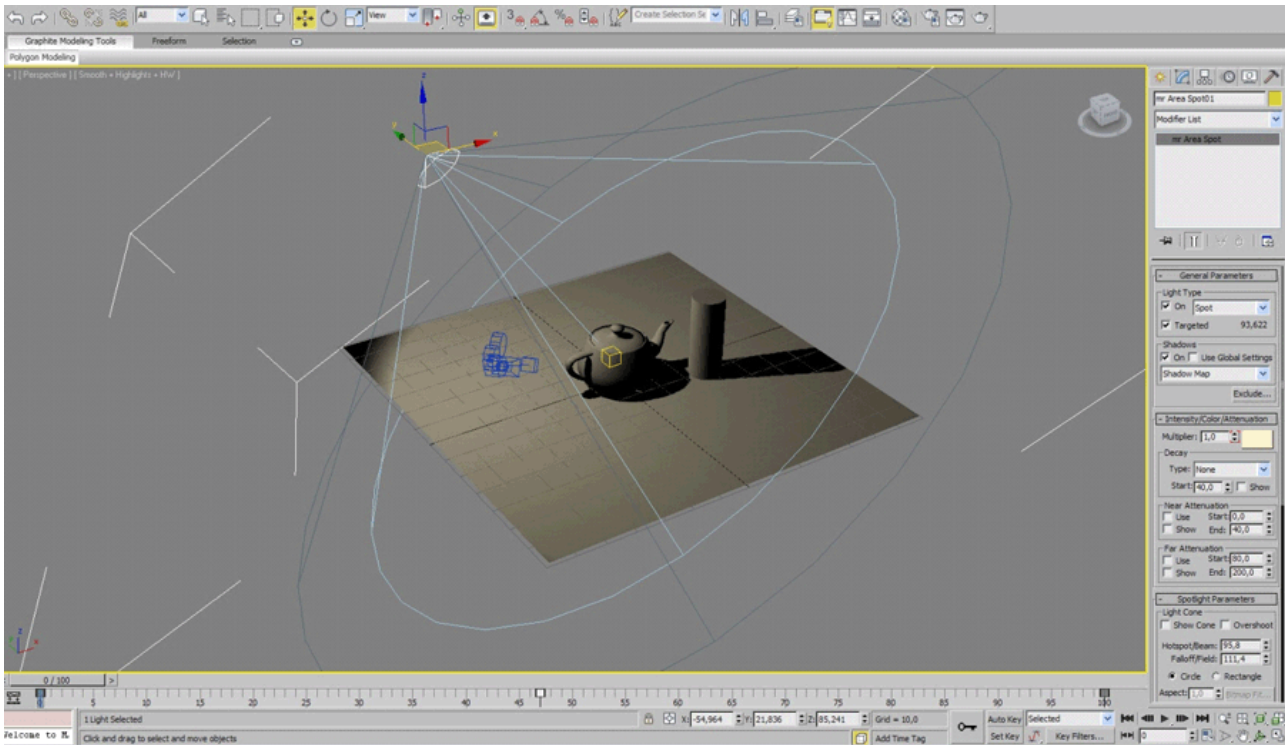


Aquests diferents **algorismes** han evolucionat molt al llarg del temps i els podem classificar en diversos tipus:

- Integració de polígons d'ombra amb l'algorisme **scan line** (el càlcul de la imatge es fa línia a línia). Les ombres es calculen al mateix temps que la imatge en el procés de renderització.
- Generació d'ombres basada en transformacions i retallades. Les ombres s'emmagatzemen i es precalculen en una base de dades.
- Volums d'ombra. Un procés de dos passos en els quals es crea el volum d'ombra considerant cada font de llum i determinant si hi ha algun objecte poligonal en l'ombra.
- Càlcul d'ombra usant el **Z buffer**. S'obté l'ombra fent operacions en un contenidor de profunditat dels objectes de l'escena.
- Càlcul de l'ombra en un traçador de rajos recursiu. S'obté l'ombra traçant rajos des de la llum emissora fins als objectes de l'escena i calculant les interaccions amb aquests.

- Càlcul de l'ombra pel mètode de radiositat. Es calcula la llum que emet cada objecte de l'escena segons les propietats de la seva superfície i es calcula l'ombra a partir d'aquesta intensitat.

En 3D s'utilitzen tots aquests tipus depenent del tipus de llum i del tipus de generació d'ombres que se seleccioni. A més, actualment la tecnologia ens permet veure un previ d'on i com quedarà l'ombra en la finestra de treball, segons la posició de la llum emissora, abans d'iniciar el procés de renderització.



5. Tipus de llums

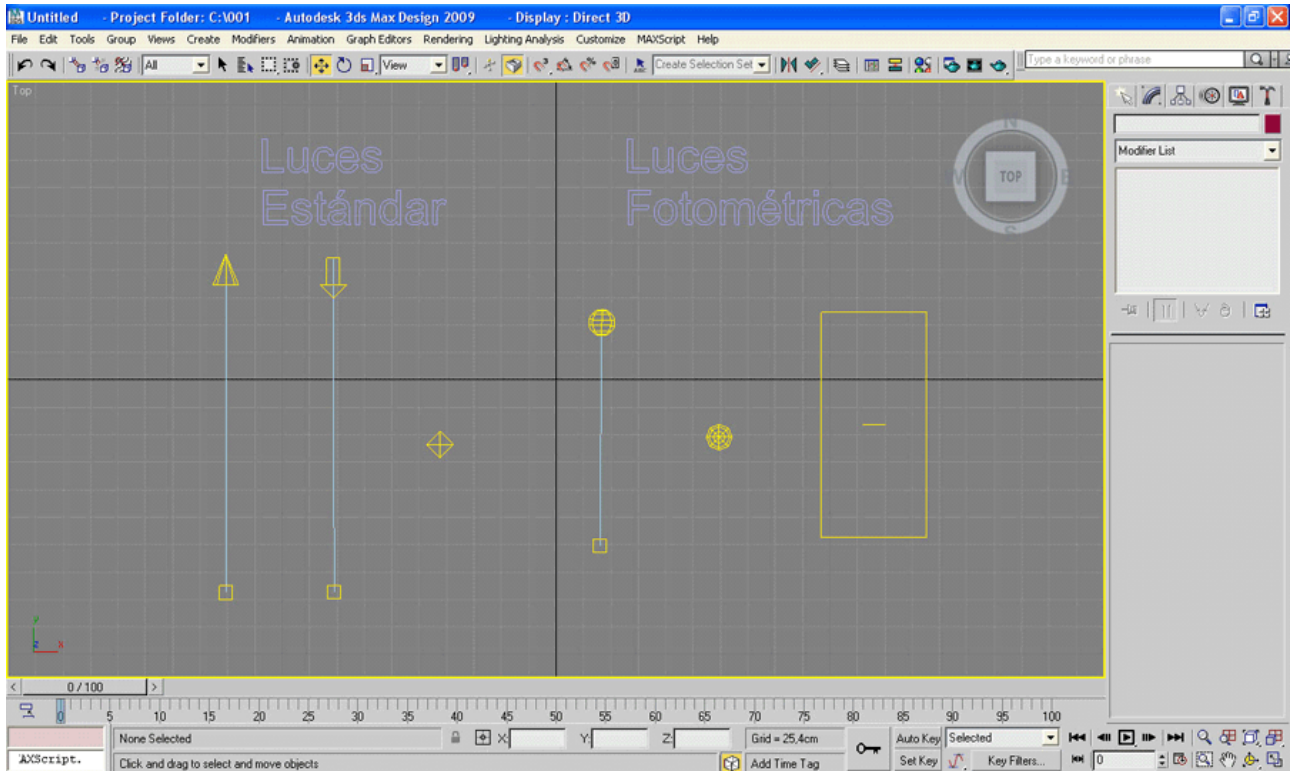
Il·luminar bé una escena, a diferència de simplement il·luminar-la, és una tasca àrdua. Podem crear una escena posant una sola llum i l'escena estaria il·luminada, i podem il·luminar una escena ajustant les llums i posicionant-les per a crear un esquema correcte d'il·luminació; per a això hem de conèixer els diferents tipus de llums que inclou el programari i les seves característiques, entenent les seves diferències i per a què es pot utilitzar cadascuna.

En alguns paquets de programari hi ha una llum per defecte que il·lumina l'escena que es crea. En el moment en què s'afegeix algun altre tipus de llum, aquesta llum per defecte desapareix perquè no afecti el procés creatiu.

En molts programaris d'animació 3D hi ha **dos grans grups de llums**:

- **Llums estàndard**
- **Llums fotomètriques**

Tal com veurem a continuació, les **llums estàndard** són molt versàtils i es poden utilitzar per a simular qualsevol tipus d'il·luminació, des de la procedent del sol fins a la procedent d'una bombeta. El color de la llum, la intensitat i la caiguda només són alguns dels paràmetres que podem controlar per a obtenir els millors resultats. També tenen un procés de renderització curt, la qual cosa cal tenir en compte quan treballem en una producció. L'única pega, per posar-ne alguna, és que **no estan basades en la il·luminació física**, per la qual cosa els valors amb què controlem els paràmetres d'aquest tipus de llums no es corresponen amb el món real. Per tant, els resultats que obtenim són ficticis, ja que en el món real una llum mai no tindria aquest tipus de comportament.



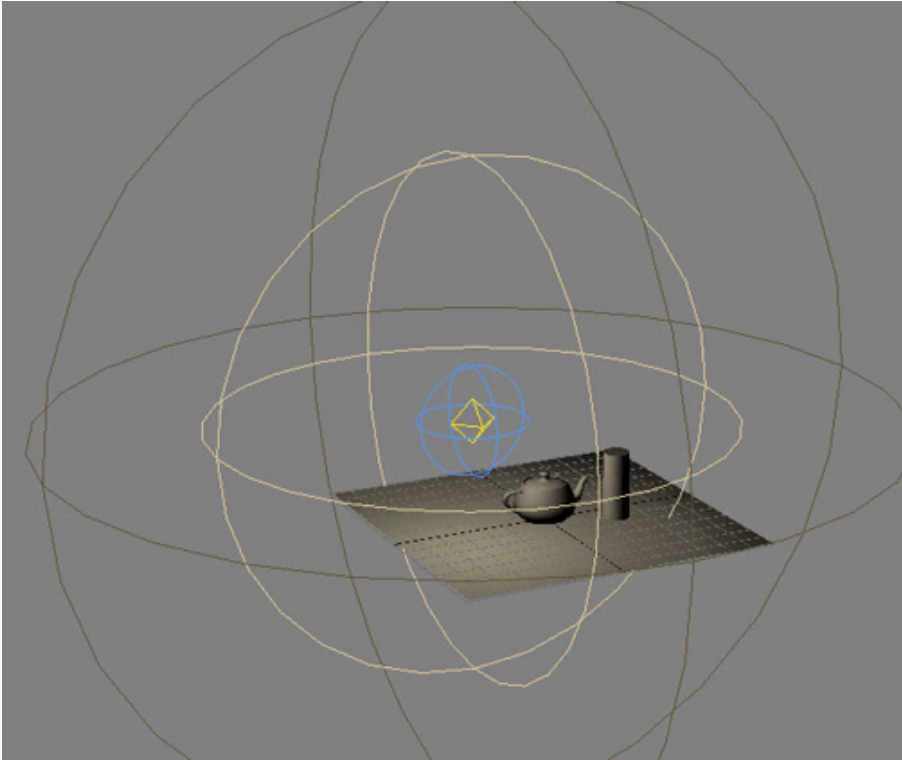
D'altra banda, les **llums fotomètriques** no són tan flexibles. Podem pensar que és un desavantatge, però aquí en rau la seva potència. A l'inrevés que les llums estàndard, les llums fotomètriques **estan basades en la il·luminació física del món real** i estan construïdes al voltant dels paràmetres d'energia de la llum com la distribució, la intensitat i la temperatura de color. Això fa que siguin molt atractives a l'hora de generar una imatge real amb la finalitat d'obtenir una molt bona aproximació física en el procés de la renderització.

5.1. Llums estàndard

5.1.1. Llum omni

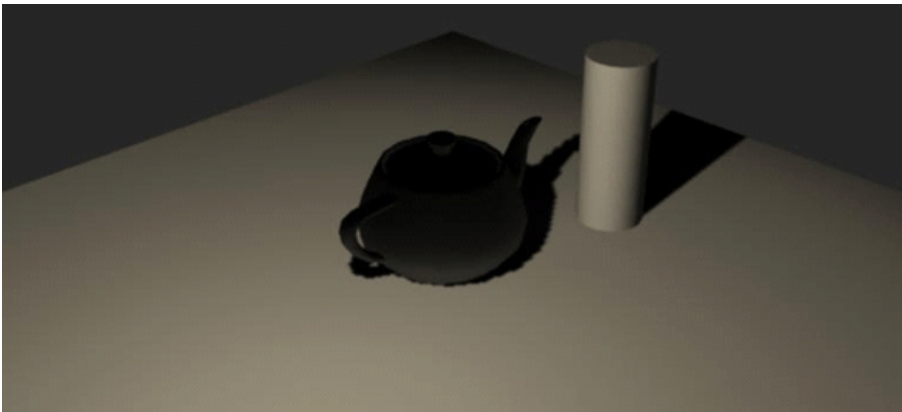
La **llum omni** té una il·luminació en què el punt d'origen dispara la llum de manera radial, des d'un punt central infinitament petit. S'anomena **omni** perquè distribueix la llum de manera omnidireccional en les tres dimensions.

És fàcil d'utilitzar, encara que en el món real no trobarem llums que actuïn d'aquesta manera, ja que la majoria dels llums no emeten la llum en totes direccions, especialment els llums elèctrics, que tenen patrons de distribució definits.



Amb aquest tipus de llums, que normalment s'utilitzen com a flaixos compensatoris³, si el programari ho permet, una pràctica habitual és restringir els objectes que estan il·luminats per aquestes llums per a tenir una il·luminació local controlada.

⁽³⁾Llum secundària que complementa la llum principal.



La llum només afecta el terra i el cilindre.

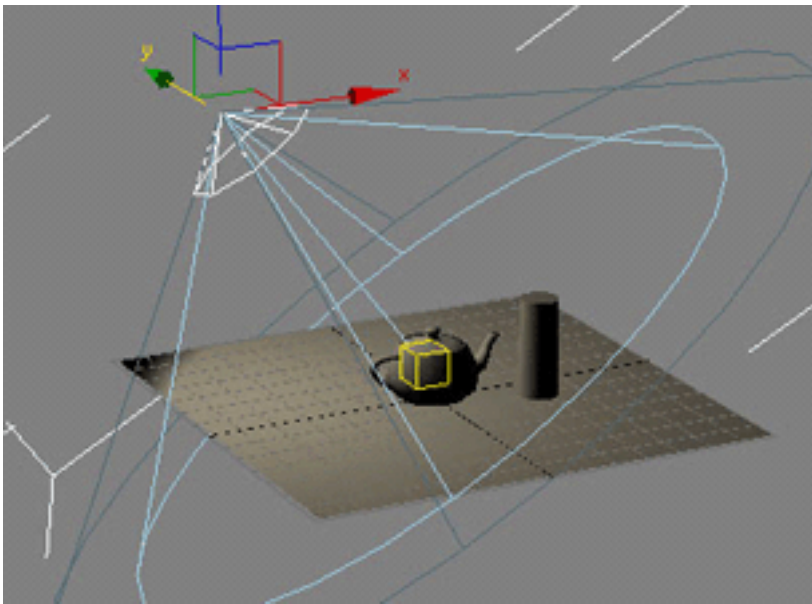
Això vol dir que des del programari, per mitjà dels paràmetres de les llums, podem fer que una determinada llum afecti un determinat objecte o no. Aquesta característica es dona en tots els tipus de llums.

Quan estiguem il·luminant una escena, és molt fàcil afegir aquest tipus de llum més vegades del que necessita l'escena. Hem de tenir en compte que una llum omni equival a sis llums *spot*, per la qual cosa el temps de renderització aug-

mentarà pel fet d'utilitzar aquest tipus de llums. Per aquest motiu, la podem utilitzar, però sempre cal tenir en compte que si l'objecte a il·luminar només necessita una llum *spot* en lloc d'una omni és millor no afegir llums de més.

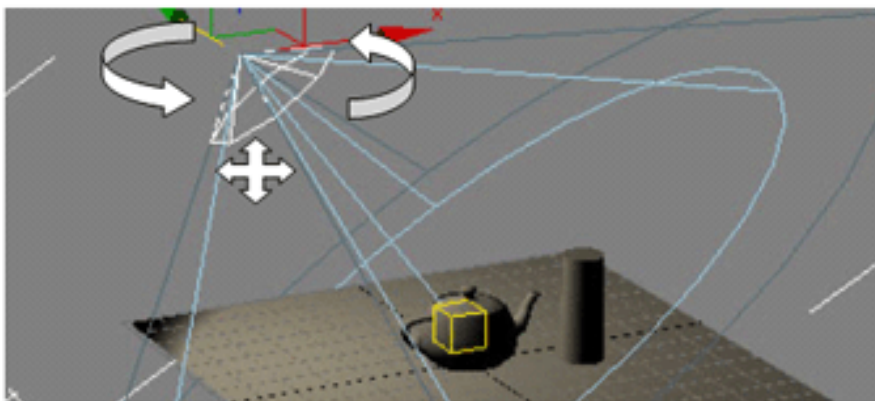
5.1.2. Llum *spot*

La característica principal d'aquest tipus de llums és la facilitat de control en termes de direcció. Igual que els llums omni, els llums *spot* emeten la llum des d'un punt infinitament petit, però a diferència d'aquests, la seva il·luminació està confinada dins d'un con.

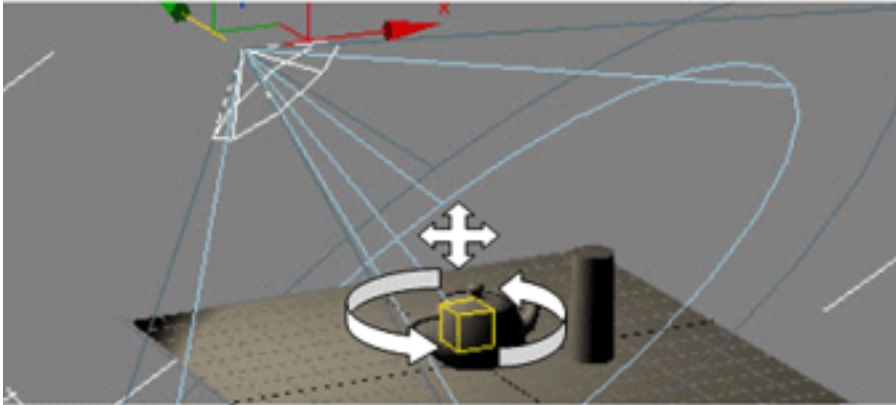


Aquest tipus de llums s'han de col·locar en l'escena d'una manera específica. Això es pot fer de diferents maneres:

- **Mètode A.** Col·locar el llum lliurement i fer-lo rotar fins que il·lumini l'objecte correctament. No és el mètode més simple, però potser és el que més s'apropa al comportament d'un llum real.



- **Mètode B.** Sovint dona més bons resultats donar al llum un objectiu, amb el qual, una vegada s'ha posat el llum a l'origen, podem apuntar cap a l'objecte que cal il·luminar. Alternativament, també podem vincular el llum a l'objecte 3D, perquè, si movem la llum, no perdem l'objecte que estem il·luminant; i, al revés, si l'objecte es mou, també es mou la llum.

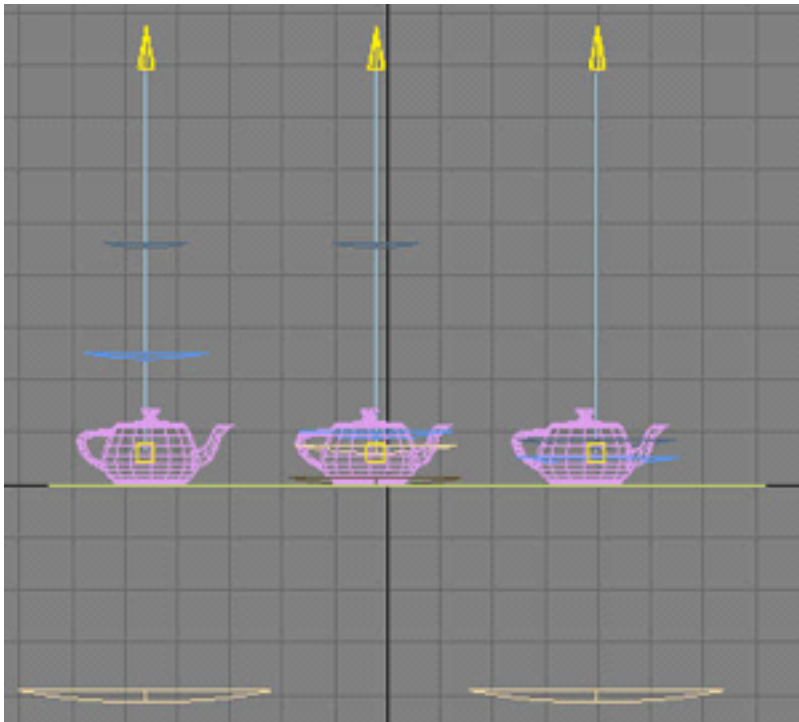


Igual que manipulem l'orientació del llum *spot*, també en podem controlar el con, definit en dos valors angulars:

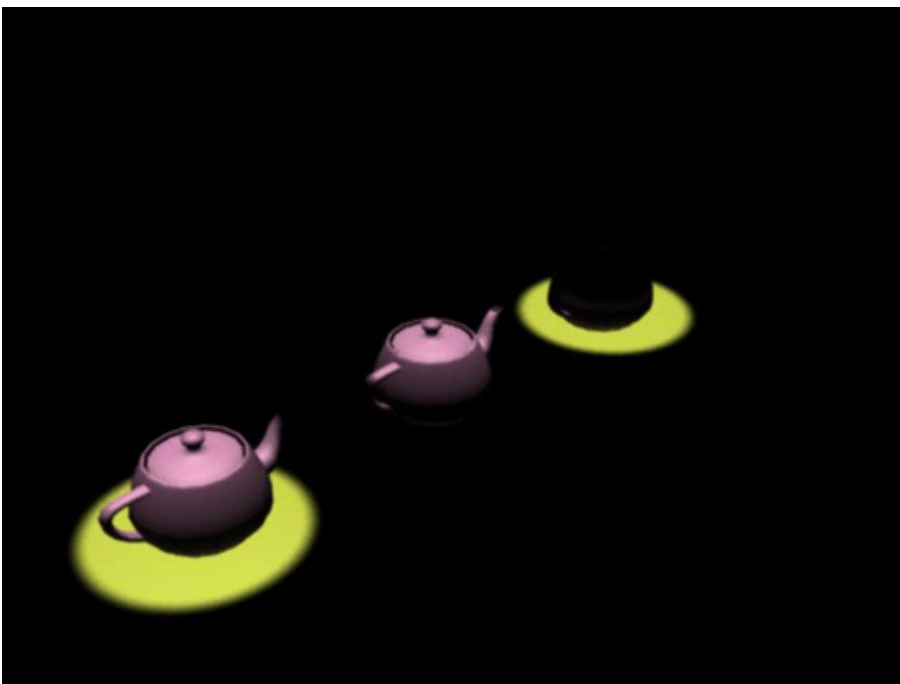
- Un defineix el punt d'il·luminació màxim.
- I l'altre defineix la caiguda.

La intensitat de la llum cau gradualment del 100% (en el punt il·luminació màxim) al 0% en l'angle de caiguda.

Variant aquests dos valors, controlem la suavitat de la llum en els límits del con. Amb una petita diferència de valors, la llum apareix definida durament com un cercle o es va difuminant suaument. Aquesta és una tècnica molt efectiva per a definir una il·luminació tènue en regions molt específiques.



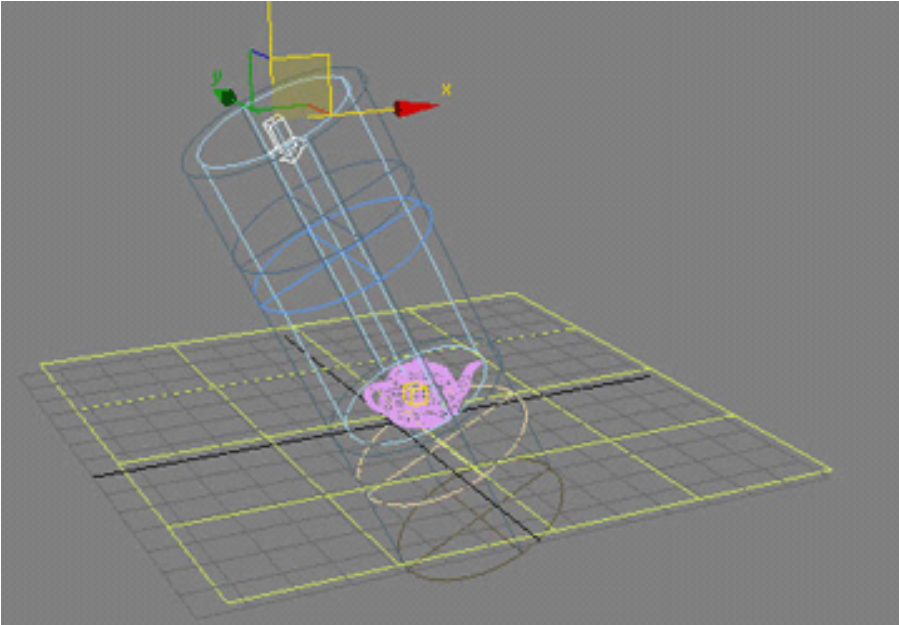
Vista d'un visor amb diferents atenuacions



Resultat

5.1.3. Llum *direct*

Les llums *direct* són molt semblants a les llums *spot*, però amb la diferència que la llum es projecta com rajos paral·lels en una única direcció. Aquestes llums s'utilitzen normalment per a simular la llum del sol.

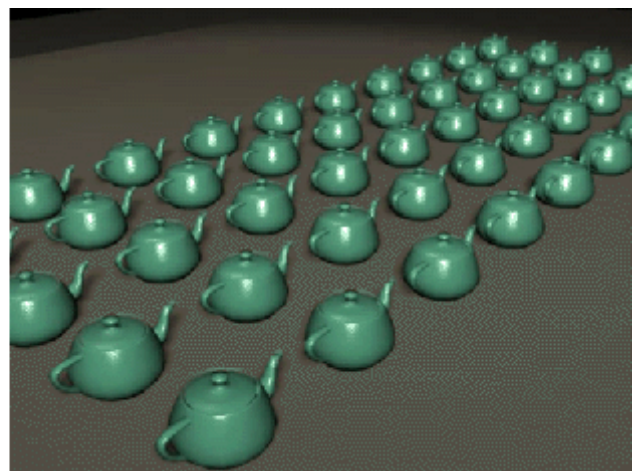
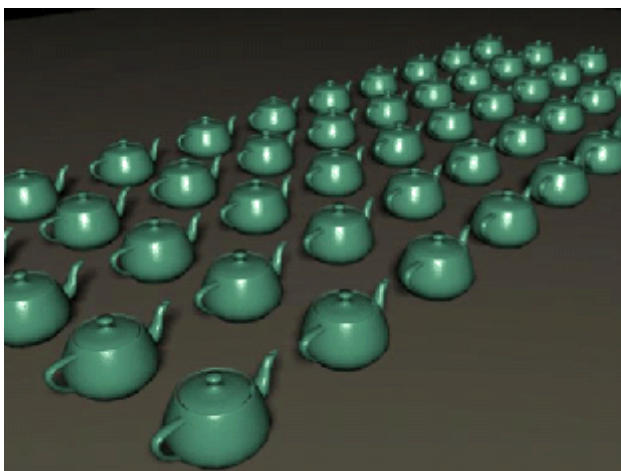


La manera de controlar-les també és similar al cas de les llums *spot*, és a dir, o bé fent rotar la llum per ella mateixa, o bé movent l'objectiu cap a l'objecte a il·luminar.

Aquestes llums normalment s'utilitzen per a simular la llum del sol. Però no només s'utilitzen per a això, ja que sovint també s'usen com a flaixos compensatoris. També s'utilitzen per a completar la llum ambiental, de manera que es poden il·luminar grans àrees, la qual cosa produeix una distribució de la reflexió de la llum de manera uniforme.

Vegem-ne un exemple: aquí tenim una escena amb un nombre d'objectes posats en fila i amb dues llums, una *spot* de llum principal, en el mateix angle que la càmera, i una altra llum *direct* posada darrere dels objectes en vertical i amb poc angle per a completar la il·luminació.

Vista top (zenital)

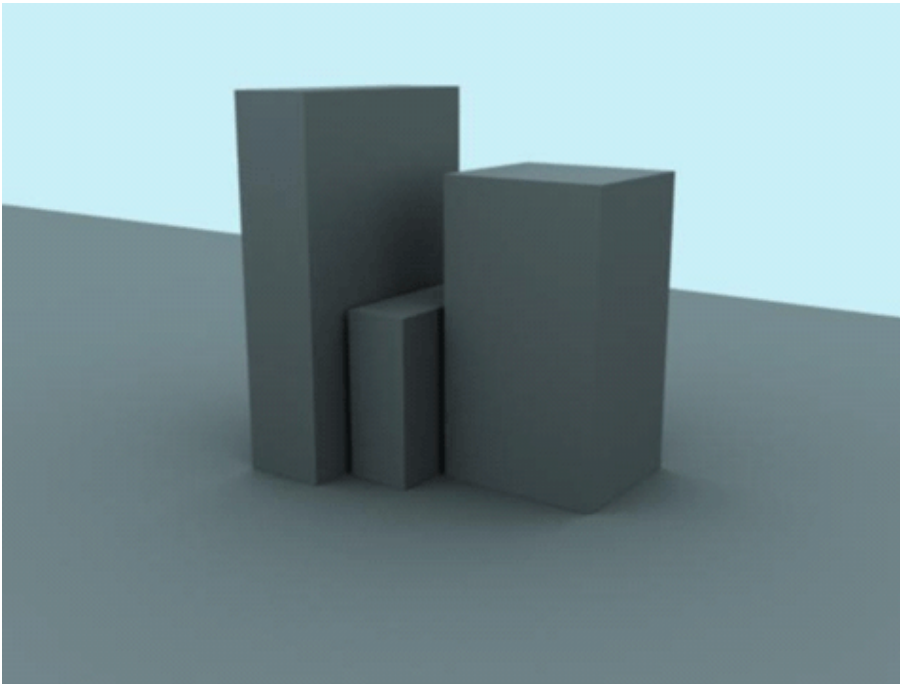


A l'esquerra, sense llum *direct* i a la dreta, amb llum *direct*

5.1.4. Llum *sky light*

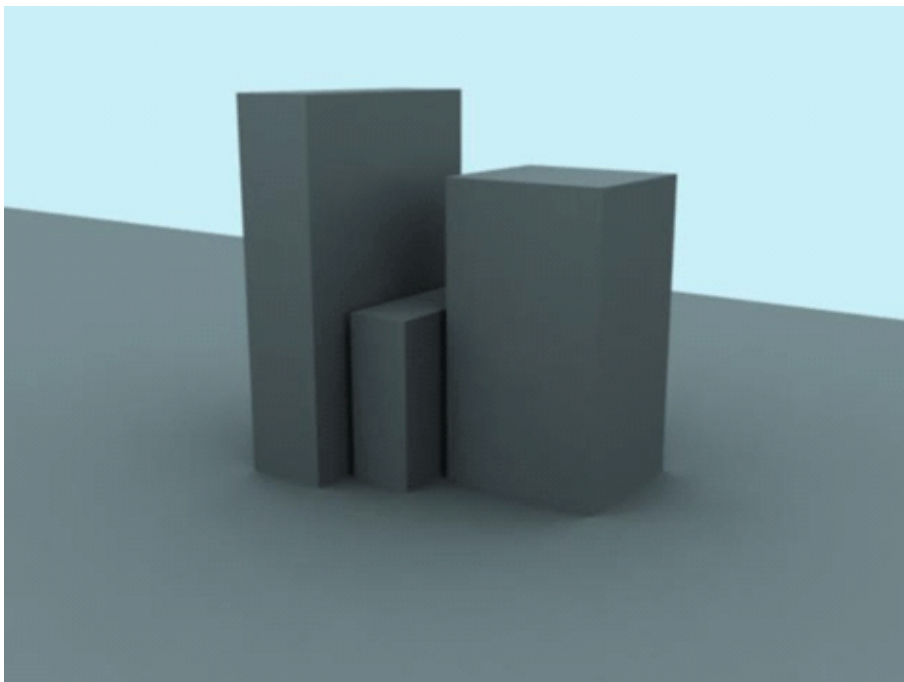
La llum *sky light* s'utilitza normalment per a il·luminar escenes exteriors de dia. La seva llum actua com si tota l'escena tingués una cúpula per sobre de l'escenari que il·luminés tots els objectes.

Aquest tipus no té controls d'ombra, les ombres que apareixen es calculen automàticament en el procés de la renderització.



Sky light sense *light tracer*: 1 minut 40 segons

Cal esmentar que per a obtenir els millors resultats en el millor temps possible és recomanable utilitzar-la conjuntament amb un dels mòduls de simulació d'il·luminació global anomenat *light tracer*, que amb els seus paràmetres ens permet obtenir una imatge amb una alta qualitat, encara que no amb un càlcul físicament real.



Imatge amb *light tracer* (valors per defecte): 8 segons

La llum *sky light* té alguns controls de color i intensitat, encara que podem assignar una imatge al paràmetre de color i així, en lloc de projectar un únic color, projecta els colors de la imatge.

Cal destacar que les **imatges HDR** (*high dynamic range imaging*) funcionen particularment bé en aquests casos. Amb les imatges HDR s'aconsegueix il·luminar correctament totes les zones d'una imatge encara que aquestes continguin diferents lluminositats; el que s'arriba a aconseguir és que, malgrat els diferents nivells de lluminositat de l'escena, s'obtingui una imatge molt detallada. Normalment, aquesta tècnica s'utilitza per a fer que un objecte reflecteixi l'entorn sobre el qual està situat.

Per exemple si hem d'integrar un objecte 3D en una escena d'una pel·lícula, podem tenir l'escenari gravat en una imatge HDR, que té tota la llum tal com es va gravar el dia de l'enregistrament; en utilitzar aquest escenari en el programari 3D, veiem com la seva llum s'integra perfectament en l'objecte, encara que l'escenari sigui una imatge i l'objecte sigui un polígon 3D.



Imatge amb teteres en 3D i entorn amb imatge HDR

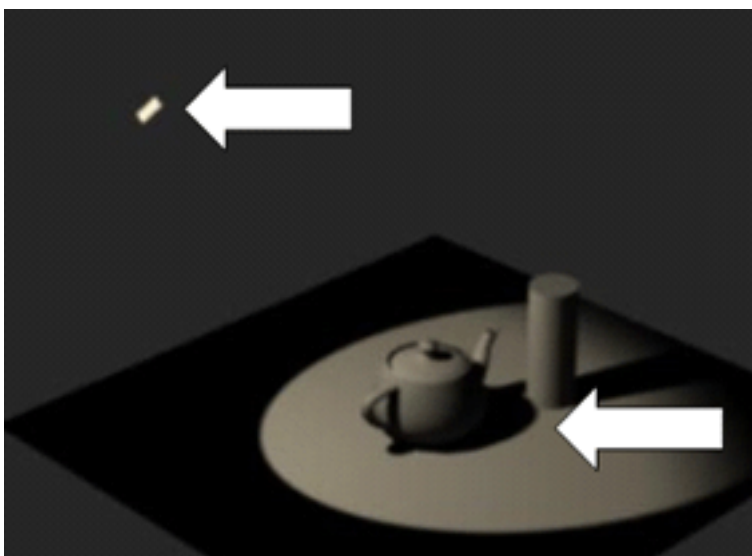
5.1.5. Llum d'àrea

A diferència dels llums *omni*, *spot* i *direct*, que emeten la llum des d'un punt infinitament petit, els **llums d'àrea** ens proveeixen d'una llum amb una grandària física determinada, que es pot iniciar a través d'un cercle o d'un rectangle. Aquest fet repercuteix directament en la qualitat de la generació de les ombres.

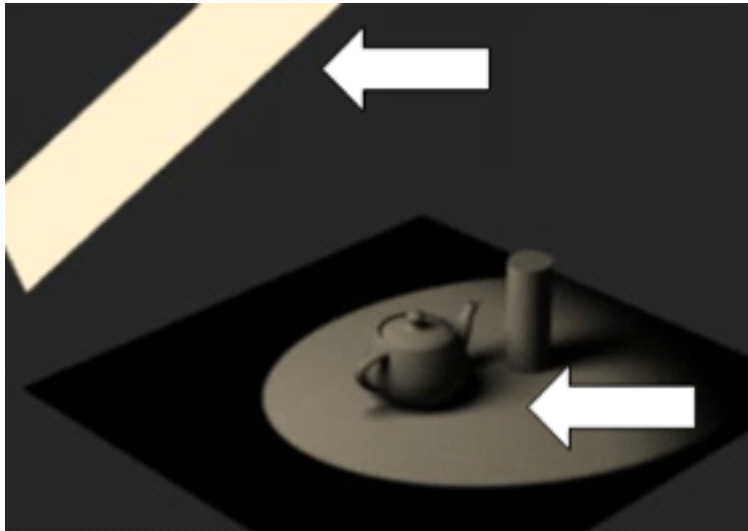
Fixem-nos en l'exemple. Hem generat la mateixa renderització però amb grandàries diferents de la llum d'àrea utilitzant, en aquest cas, un rectangle; a més, hem fet que ens renderitzi la llum per a veure la diferència de grandària. Observem la diferència de qualitat en les ombres.

Exemple

És com si poséssim paper de ceba davant un focus per a dispersar la llum.



Grandària: 5 × 5



Grandària: 90 × 45

Com es pot veure en l'exemple, com més gran sigui la llum d'àrea, més suaus seran les ombres, encara que no tindrem tant domini de la il·luminació. La llum començarà a envoltar els objectes que són més grans.

Al contrari, si la mateixa llum es fa cada vegada més petita, les seves ombres seran cada vegada menys suaus, arribaran a tenir les arestes dures i podran arribar a veure l'efecte d'aliàsing (dent de serra).

Amb els llums d'àrea obtenim uns bons resultats. L'únic problema és que necessiten una càrrega computacional bastant elevada i això ens porta a temps de càlcul molt llargs. Per aquest motiu, normalment s'utilitzen en la renderització final de producció o per a generar imatges fixes.

5.2. Llums fotomètriques

Abans de començar aquest apartat cal dir que **no tots els programaris 3D ofereixen la possibilitat de treballar sobre la base de llums fotomètriques.**

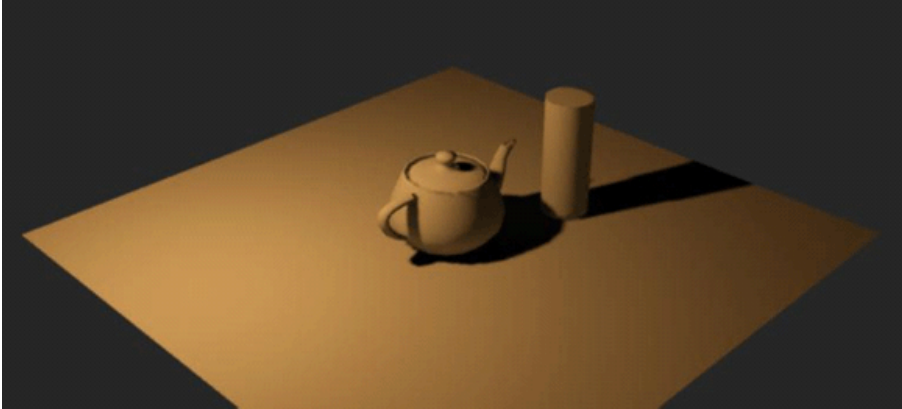
La **fotometria** és una mesura de les propietats de la llum. Quan utilitzem **llums fotomètriques**, el programa ens dóna una simulació basada en la propagació de les característiques de la llum seleccionada a través del seu entorn real.

El resultat no és solament una llum molt realista, sinó que a més és **físicament exacta**, per la qual cosa les escenes que s'obtenen amb aquest tipus de llums necessiten mesures correctes si el que es vol és obtenir una renderització amb un aspecte realista.

Exemple

Per exemple: una bombeta de 40 W, una halògena de 50 W, etc.

Ens podem imaginar una bombeta de 40 W que il·lumina una habitació, i la mateixa bombeta que il·lumina un estadi de futbol; òbviament, en el segon cas no es veurà res. És per això per què és tan important utilitzar unes bones mesures per al tipus de llum que vulguem usar.



Escena il·luminada amb una bombeta de 40 W

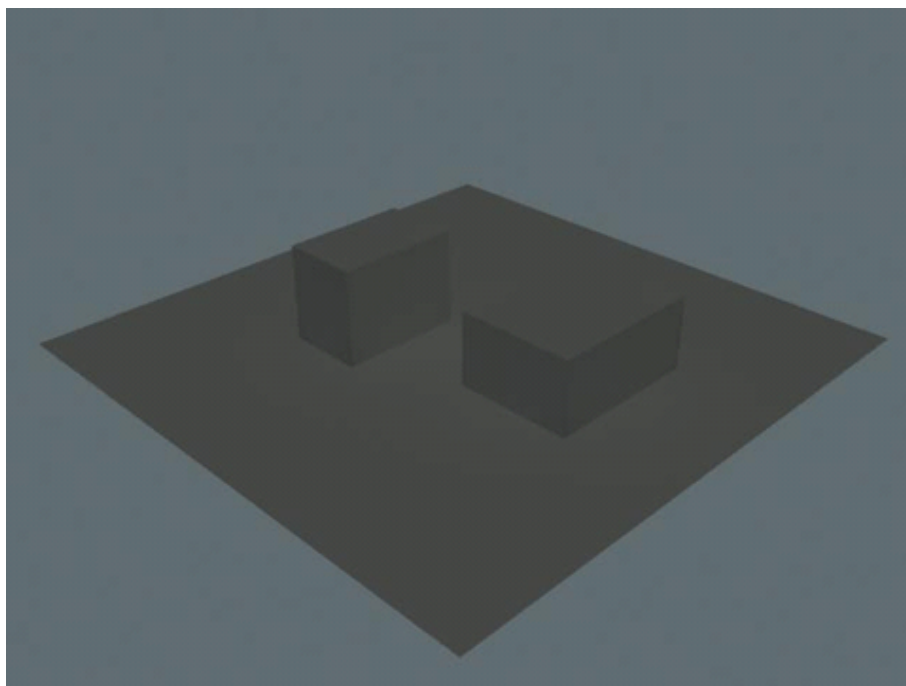
6. Les ombres

6.1. La importància de les ombres

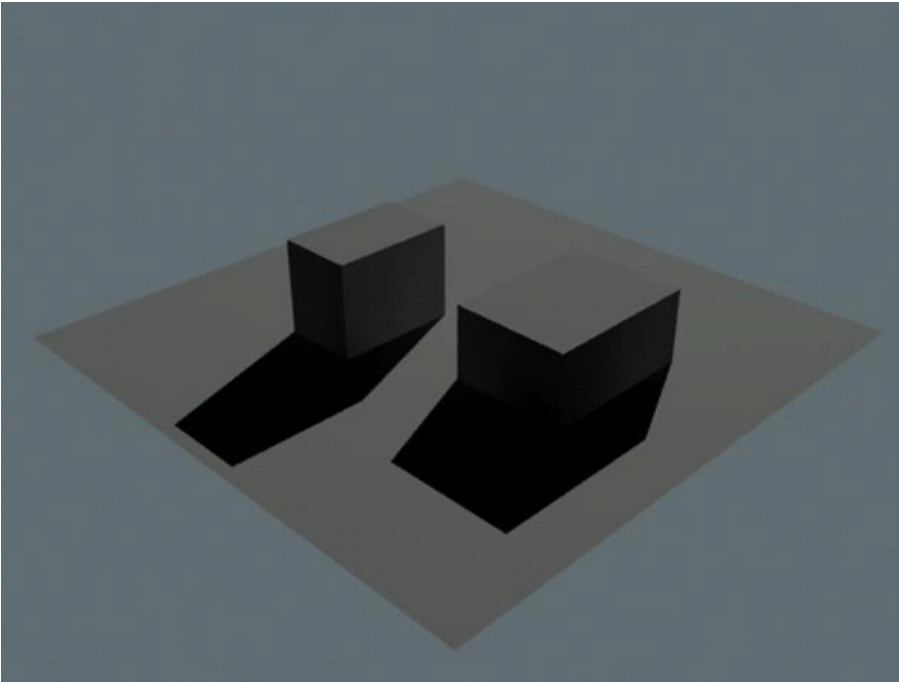
Les ombres es podrien considerar com allò on les coses s'oculten o es perden, però constitueixen un element d'il·luminació que actualment és vital per a la composició i definició de les relacions espacials. És per això per què no podem obviar el concepte d'ombra.

L'ull humà capta molta informació de les ombres, no solament per a saber on està col·locat l'emissor de llum, sinó també per a saber de què està fet l'objecte, el lluny que és i com es relaciona espacialment amb l'entorn. Per això és important generar unes bones ombres quan il·luminem una escena. Les ombres varien moltíssim de qualitat i de forma segons sigui l'entorn d'il·luminació. L'habilitat per a reproduir aquestes característiques d'una manera correcta és un dels punts forts per a obtenir imatges fotorealistes.

La **funció més òbvia d'una ombra** consisteix a donar-nos una idea visual de la **profunditat** i la **posició**. Tal com veiem en la figura següent, sense ombres és difícil jutjar on estan localitzats els elements respecte a l'entorn. La grandària relativa dels cubs ens dóna una idea sobre la seva profunditat en la imatge, però sense saber si tots els cubs tenen la mateixa grandària no ho podem assegurar.



No obstant això, si hi ha les ombres, és fàcil intuir la posició dels cubs. La grandària dels diferents objectes és aparent i podem veure quins estan suspesos en l'espai i quins són a terra.



En aquesta última imatge també podem veure que les ombres ajuden a millorar el rang tonal de la renderització, és a dir, a discriminar els objectes que apareixen en l'escena encara que els colors siguin molt semblants; fixem-nos que la base i les dues caixes tenen el mateix color i, sense ombres, és bastant difícil diferenciar-les.

Si volem que l'audiència accepti una escena que és impossible, les ombres són una gran eina que ens ajuda a convèncer que el que veu és el que passa. Sense la subtil aplicació de les ombres, l'escena més fotorealista serà poc creïble: l'ull humà està tan acostumat a veure ombres que de seguida percep un objecte que no les té.

6.2. Tecnologia de les ombres

Per a saber com funcionen les ombres i quina tecnologia s'utilitza per a generar-les, abans hem d'estudiar quins mètodes les generen.

Òbviament, podem suposar que perquè en una escena hi hagi una ombra, prèviament hi ha d'haver una llum i un objecte que s'interposi davant aquesta llum per a generar l'ombra.

En el món 3D, la manera en què es reparteix la llum des del focus fins a l'objecte il·luminat i que genera l'ombra es pot dividir en **dos tipus d'algorismes**:

- Algorismes d'il·luminació **directa**.

- Algorismes d'il·luminació **global** (GI).

Cadascun d'aquests algorismes recrea la llum i les ombres d'una manera diferent, per la qual cosa és important saber com funciona cada tipus.

6.2.1. Il·luminació directa

Aquest primer mètode es compon d'una escena amb llums i objectes. Les llums reparteixen la llum directament sobre els objectes, tret que hi hagi algun objecte en el camí, i en aquest cas es calculen les ombres.

La **il·luminació directa** només calcula la llum que és rebuda sobre un objecte per una font de llum. La llum que rebota a terra o en altres superfícies i torna a l'entorn no es calcula amb aquest mètode.

Normalment, en utilitzar aquesta tècnica és més fàcil tenir control sobre les llums, ja que és l'operador qui decideix què s'il·lumina i amb quina llum. El problema amb què ens podem trobar és que acabem tenint moltíssimes més llums en l'escena del que havíem planejat al principi.

D'altra banda, si utilitzem la il·luminació directa per a calcular una escena amb poques llums i amb el repartiment d'ombres per defecte, normalment obtindrem unes ombres negres pures (fixem-nos en la imatge anterior). Per això, en determinats casos, és necessari utilitzar la **il·luminació global**.

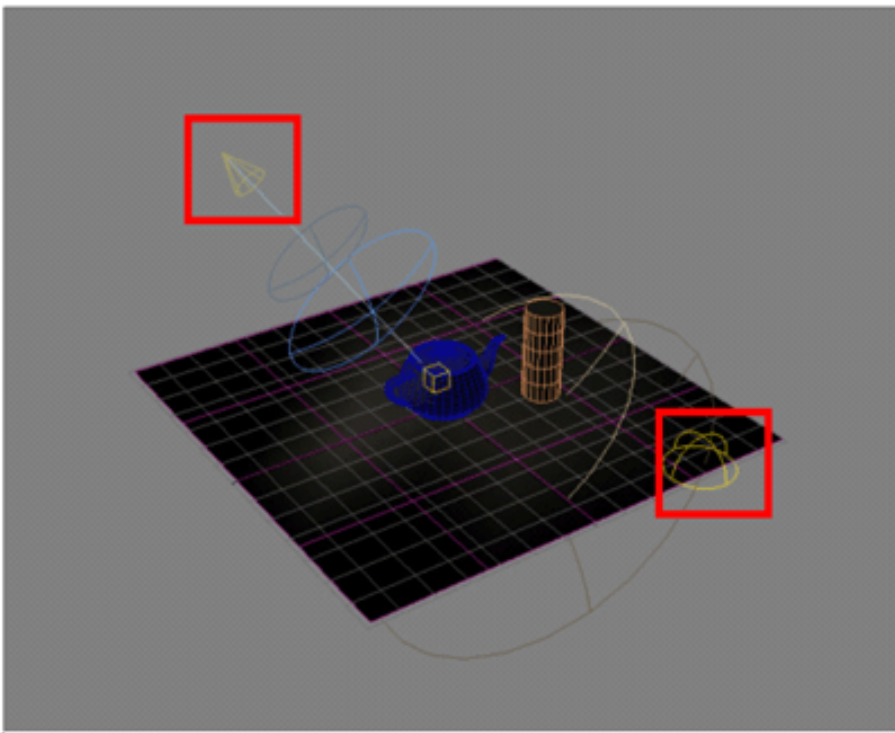
6.2.2. Il·luminació global

La **il·luminació global** (GI) intenta modelar, no solament el component de llum directa, sinó també la llum indirecta que s'introdueix quan un raig de llum topa amb una superfície, rebota i torna a l'escena o cap a un altre objecte.

En la vida real, els objectes que no estan directament il·luminats són menys visibles però no invisibles; en el món 3D no, ja que si l'objecte no és dins d'un entorn il·luminat, no apareix en la renderització. Per a intentar solucionar aquest defecte podríem intentar afegir una mica de llum ambiental a l'escena, però com ja hem vist en el capítol anterior, això ens tnyiria l'escena completament. Aquest component de llum ambiental no ens permet canviar paràmetres d'intensitat i de color en el món real, per la qual cosa hem de recórrer al que denominem *il·luminació global*.

Podríem pensar que necessitaríem col·locar centenars de llums perquè la il·luminació fos perfecta, les ombres fossin suaus i la llum tingués aquest efecte fotorealista, però la veritat és que normalment obtenim els millors resultats utilitzant poques fonts de llum.

Així, en lloc d'utilitzar moltes llums per a il·luminar cada objecte d'una escena i un motor de renderització normal, utilitzem una única llum per a generar la il·luminació global i un motor de renderització que suporti il·luminació global. D'aquesta manera, aprofitem les propietats dels materials dels objectes de l'escena per fer que un únic emissor emeti llum i que aquesta es propagui pels rebots entre els objectes dispersos en l'escena.



No obstant això, aquesta tècnica té un problema i és el temps de procés que necessita, ja que fer un càlcul semblant comporta una càrrega computacional bastant elevada. A més, perdem qualsevol control que poguéssim tenir sobre la il·luminació dels objectes, com en la il·luminació directa.

6.2.3. Utilització de les ombres

El fet que la generació de l'ombreig d'una escena sigui un dels punts més costosos a l'hora de calcular una escena no és l'únic punt que s'ha de tenir en compte a l'hora d'il·luminar una escena. De vegades, les consideracions visuals poden dictar que, per a projectar ombres, simplement són necessàries una o dues llums. Per aquest motiu ens hem de fer una sèrie de preguntes.

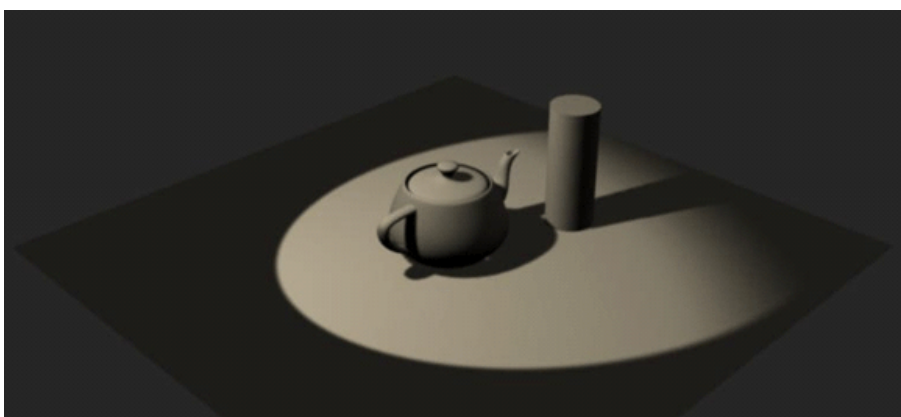
- Cal una ombra per a donar realisme a l'escena?
- Amb un sol ombreig podem il·luminar correctament tota l'escena?

- Quina ombra necessitem utilitzar per a generar determinat tipus d'efecte?



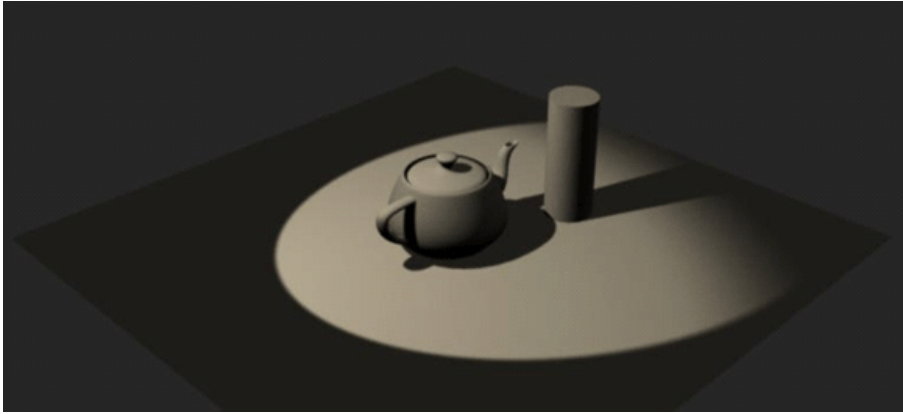
Per a contestar a aquestes preguntes, necessitem saber de quins tipus d'ombres disposem en un món 3D i quines són les característiques que ens ofereix cada tipologia:

- Generació per mapa d'ombres (*shadow map*).



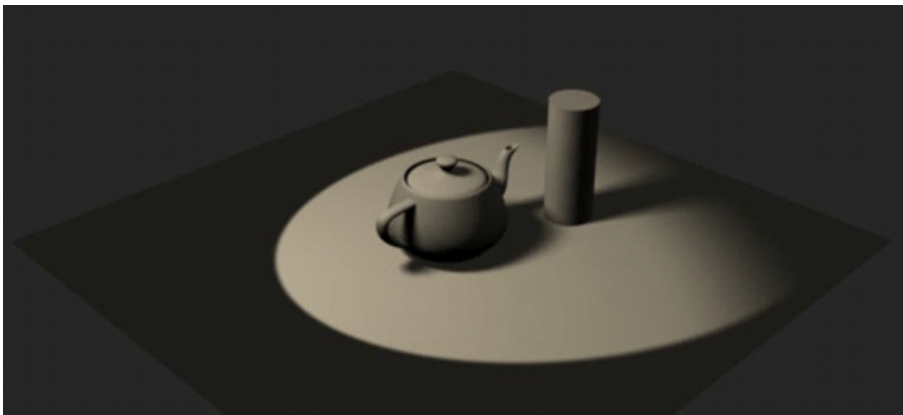
Mapes d'ombres

- Generació per traça de rajos (*raytraced shadow*).



Traça de rajos

- Generació per àrees d'ombres (*area shadows*)



Àrees d'ombres

Podríem pensar que amb només tres tipus d'ombres no es pot escollir gaire, però la gamma de varietats que podem produir respecte a la suavitat, la forma, la qualitat, el color i, el més important, el temps de renderització, és altíssima.

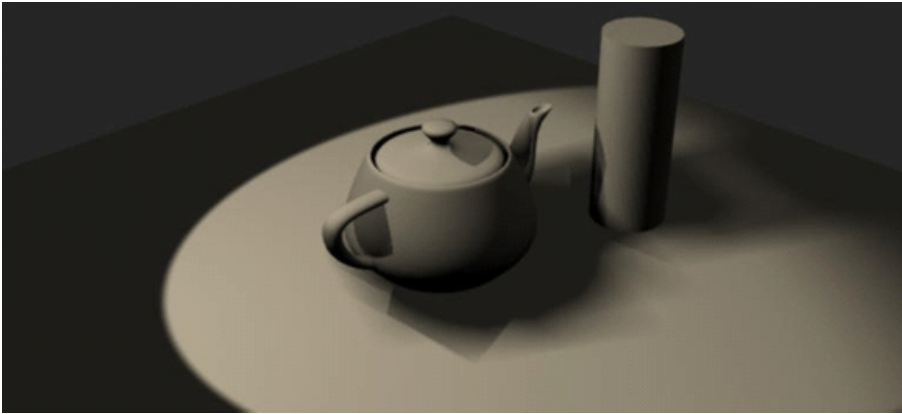
Mapa d'ombres

Aquest tipus d'algorisme utilitza una imatge (*bitmap*) que genera el procés de renderització durant l'etapa de càlcul de l'escena.

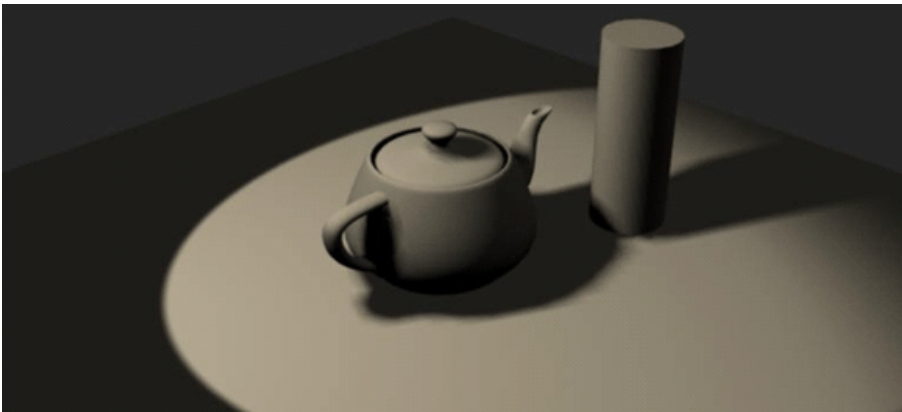
Aquesta imatge, anomenada **mapa d'ombres** (o **depth map** en algunes aplicacions), recrea el que es denomina un *mapatge de profunditats*, en el qual fa un càlcul en què intervenen nombres que representen les diferents distàncies des de la llum fins als objectes en els quals es generen les ombres. Amb aquesta informació precalculada, el procés de renderització no reparteix la llum més enllà de les distàncies especificades en aquest mapa, i fa aparèixer les ombres que han estat calculades.

Aquest algorisme genera ombres suaus, però consumeix molta memòria si es volen obtenir bons resultats.

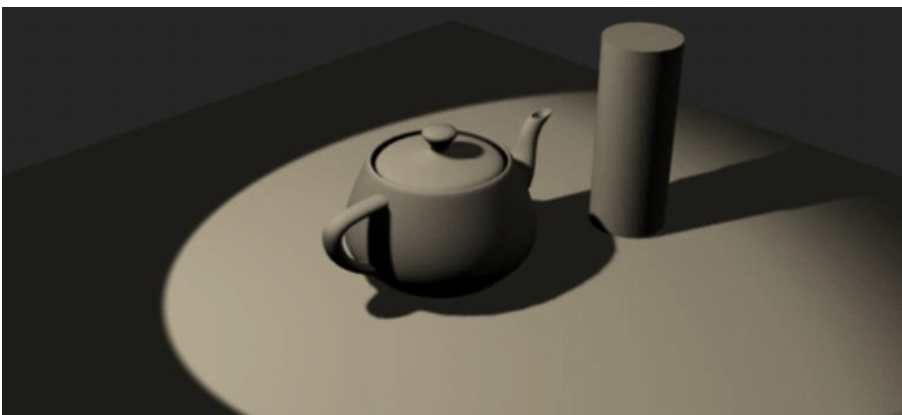
D'altra banda, els mapes d'ombres tenen més característiques i funcions, i normalment tenen una configuració inicial una mica justa, per la qual cosa requereixen un ajust precís per a obtenir unes bones ombres. La raó d'aquest ajust és que els mapes d'ombres, tal com s'ha comentat, són realment imatges, per la qual cosa necessitem tenir en ment la seva dimensió respecte a la distància de l'ombra i el detall que aquesta requereix.



Mapa d'ombres amb una grandària de 16



Mapa d'ombres amb una grandària de 64



Mapa d'ombres amb una grandària de 256

Si la resolució és massa petita, l'ombra pot donar la sensació que es veu molt un efecte de bloc, l'ombra apareix molt basta i pixelada quan renderitzem i és necessari augmentar la grandària i el valor de rang de mostra (*simple range*) del mapa. No obstant això, com més gran és, més memòria requereix i més temps consumeix a l'hora de fer la renderització.

Un dels avantatges d'aquesta tècnica és que si tenim prou RAM per a mantenir l'escena sencera (inclosos els mapes d'ombres) en memòria, les ombres no afecten el rendiment. Però si la renderització necessita el fitxer d'intercanvi de memòria del Windows (memòria situada en el disc dur, d'accés més lent que la memòria RAM), el temps de renderització cau estrepitosament.

La clau per a controlar els temps de renderització i la memòria amb els mapes d'ombres depèn de diversos factors. Com podem veure en la taula següent, vuit llums amb un mapa d'ombres de 512 requereixen 8 MB de memòria de renderització. Això, comparant-ho amb una llum amb una resolució de 4.096 (8×512), la qual requereix 64 MB, vuit vegades la quantitat inicial. Per tant, és millor utilitzar més llums que il·luminin menys objectes amb mapes més petits que poques que il·luminin molts objectes amb mapes més grans.

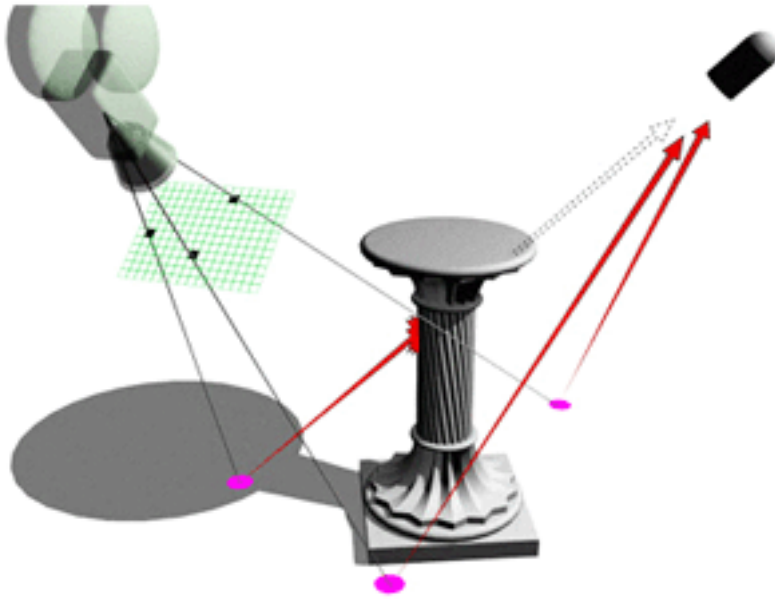
Requeriments de memòria en mapes d'ombres (*shadow maps*)

ombres 2×4 = requisit de resolució de mapa de memòria	
512	1 MB
1024	4 MB
2048	16 MB
4096	64 MB

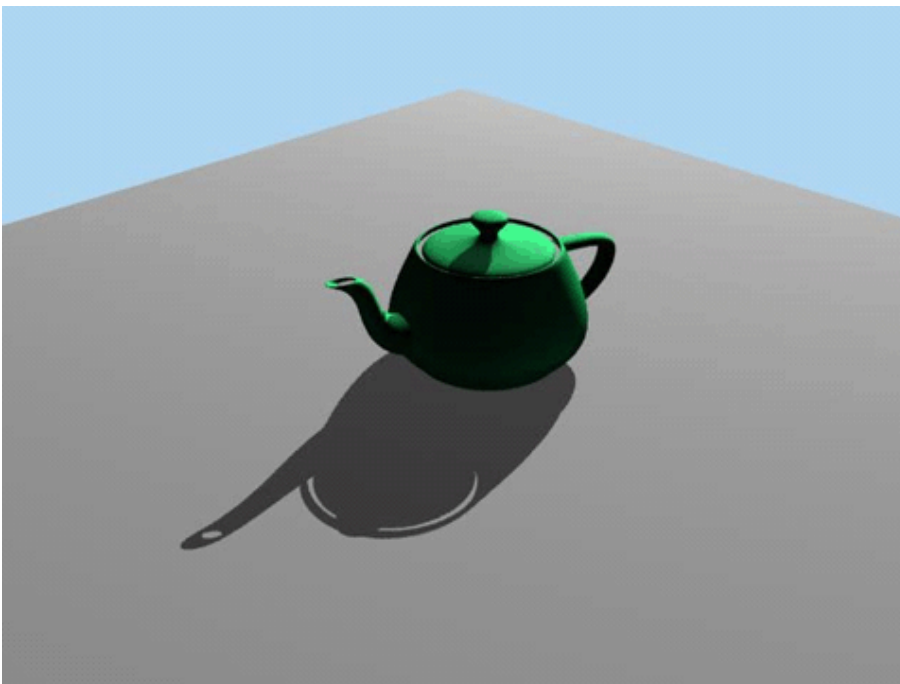
Alternativament, una llum amb les ombres apagades pot il·luminar una àrea sencera, i llavors podem col·locar llums amb ombres selectivament a les zones on són necessàries per a estalviar memòria.

Traça de rajos

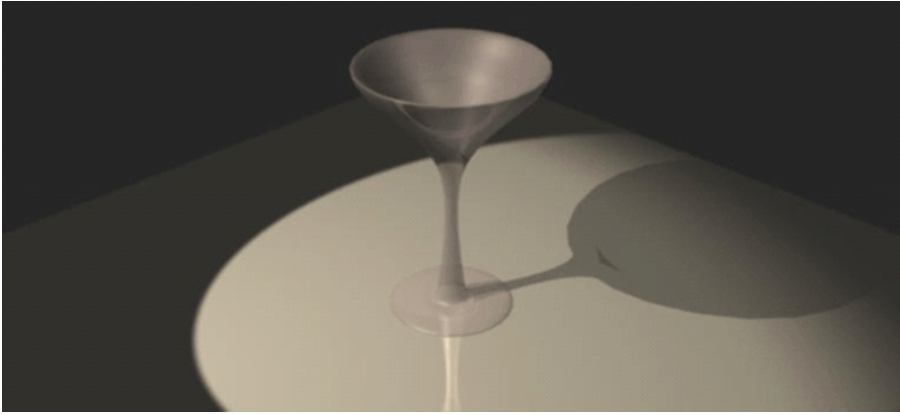
En aquest segon mètode, les ombres es generen traçant rajos emesos des d'una font de llum. Aquest procés, que es denomina *raytracing*, es du a terme seguint els rajos des de la font amb un programari que és capaç de calcular amb gran precisió quins objectes són a la zona d'il·luminació i, per tant, quins són els que generen ombres.



La característica principal d'aquest tipus d'algorisme és que genera unes ombres molt dures i definides.



És important destacar d'aquest mètode que consumeix molts recursos i temps de renderització llargs. Malgrat això, és convenient usar-lo en determinats casos com, per exemple, en el de les ombres d'un objecte de vidre, ja que permet obtenir molt bons resultats.



Àrees d'ombres

Aquest tercer mètode persegueix aconseguir recrear l'efecte d'ombrejar una àrea específica on es projectaria l'ombra d'un focus. No simplement ombrejar els píxels exactes que es generarien amb el càlcul de l'algorisme, sinó també l'àrea circumdant al voltant d'aquests píxels.

Amb la finalitat de recrear aquesta àrea, hi ha uns paràmetres en què s'han d'especificar les dimensions d'una "llum virtual" amb la qual es falsejarà aquesta àrea. Cal destacar que hi ha diverses formes de creació: rectangle, disc, caixa, etc. Cadascuna repercutirà en el resultat obtingut.

7. Tècniques d'il·luminació bàsiques

En el procés d'aprendre a il·luminar, és important conèixer les tècniques bàsiques més utilitzades en el món del cinema i la televisió. Coneixent aquestes tècniques i les seves particularitats podrem il·luminar gairebé qualsevol escenari que se'ns presenti.

7.1. Il·luminació en tres punts

Una de les tècniques més freqüents a l'hora d'il·luminar una escena és la **il·luminació en tres punts**, la qual, a partir de tres llums, aconsegueix il·luminar una escena amb uns resultats bastant satisfactoris. La convenció d'il·luminació en tres punts és una de les establertes més fermament en cinematografia i una de les més utilitzades en el món 3D.

Una de les raons principals per a utilitzar aquesta tècnica és que ajuda a emfatitzar les formes tridimensionals d'una escena.

L'experimentació amb aquest mètode simple ens pot portar a tot tipus de variacions en qualsevol esquema d'il·luminació per ordinador, per la qual cosa aprendre a obtenir el màxim rendiment d'aquest mètode ens pot proporcionar un valor afegit per a tot tipus de situacions.

En una escena en 3D ens hem d'assegurar que les formes de l'objecte tridimensional estan ben il·luminades des de tots els angles amb la finalitat de realçar la sensació tridimensional de la composició. L'última cosa que volem per a la nostra composició és que tingui un aspecte pla en la pantalla, i aquest mètode d'il·luminació ens permet corregir aquest defecte gairebé com si modeléssim la llum.

Vegem-ne un exemple.

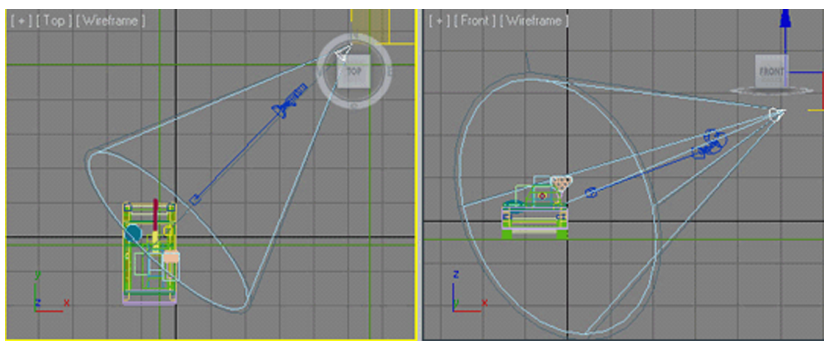


Escena sense il·luminació.

Tenim una escena en què s'ha modelat un tanc i l'hem d'il·luminar. La primera imatge s'ha fet solament amb un punt de llum; veiem que és bastant plana i no aconseguim diferenciar bé les formes de l'objecte.



Il·luminació amb un punt de llum en el mateix angle que la presa de càmera.



Veiem que en estar col·locada la llum a la mateixa altura que la càmera, gairebé no es generen ombres visibles.

Mentre que en utilitzar la tècnica de tres punts, diferenciem els volums i tenim la sensació de profunditat.



Aquest mètode d'il·luminació involucra tres punts de llum, cadascun amb la seva funció específica. La **llum principal** és la llum dominant i proveeix l'escena de la il·luminació principal, a més de repartir les ombres més òbvies. Aquesta llum es pot representar per llums interiors per a escenes nocturnes,

llum solar per a exteriors o llum solar per a escenes en què la llum entra per la persiana d'una finestra. Aquesta llum defineix la il·luminació dominant, que dóna una idea clara de la localització del punt de llum.

La funció de les dues llums restants, els denominats flaixos compensatoris *primaris* i *secundaris*, és modelar la il·luminació indirecta que es produeix pel rebot dels rajos de la llum principal en les superfícies de l'entorn.

Normalment, el flaix compensatori primari es col·loca al costat oposat del subjecte, respecte a la llum principal, i la seva funció és obrir la il·luminació al costat del subjecte que està en ombra i reduir la densitat d'ombres.

Per a ajudar-nos a separar el subjecte del fons, entra en escena el flaix compensatori **secundari** (o **llum posterior**), que ens dóna profunditat a l'escena. Aquest ens permet il·luminar la part posterior del subjecte i crea un efecte subtil de resplendor en les vores del subjecte que ens ajuda a donar definició a l'escena.

Amb relació a les ombres ja hem comentat que un dels avantatges de ser en un món 3D és que podem apagar o encendre les ombres quan vulguem. Una configuració comuna en escenes senzilles és activar les ombres en la llum principal i desactivar-les en els flaixos compensatoris. No obstant això, si necessitem ombrejar una escena més complexa, segurament necessitarem activar les ombres en totes les llums; en aquest cas, serem nosaltres mateixos els qui jutjarem si són necessàries o no ombres extres.



Escena il·luminada amb totes les ombres dels focus activades

Tenir flaixos compensatoris amb ombres és particularment necessari si la llum principal està obstruïda en algun punt de l'animació, en el qual es veu la imatge plana i uniforme. Aquestes ombres secundàries afegeixen profunditat i variació a la imatge, dos aspectes que proporcionen un sentit de vida.

Cal destacar que s'ha d'anar amb compte a l'hora de tenir diferents fonts de llum amb ombres, especialment si les ombres vénen de diferents direccions perquè això produirà resultats que visualment poden distreure l'espectador. A més, si ens fixem en el món real, la majoria d'ombres que veiem són amb vores suaus i subtils, de manera que amb un parell d'ombres sovint oferim un aspecte prou convincent.

7.1.1. Llum principal

La **llum principal** és el focus d'il·luminació que més influeix de les tres llums involucrades i la seva intensitat és més alta que la de qualsevol altre focus.

Això significa que aquesta llum crearà la il·luminació més remarcable i les ombres més definides, l'angle, la densitat i la suavitat de les quals ens donaran una idea del tipus i la localització de la font, igual que ens serviran per a calcular l'hora del dia si, per exemple, aquesta llum representa el sol. Per aquesta raó, escollir un bon angle de la llum principal respecte a la càmera és de vital importància.

Quan treballem amb il·luminació en tres punts, normalment la càmera es col·loca primer, amb la llum principal seguint-la de prop per darrere. Si fem canvis en l'angle de càmera a causa de les diferents preses de l'escena, necessitarem canvis subtils en la configuració de la il·luminació.

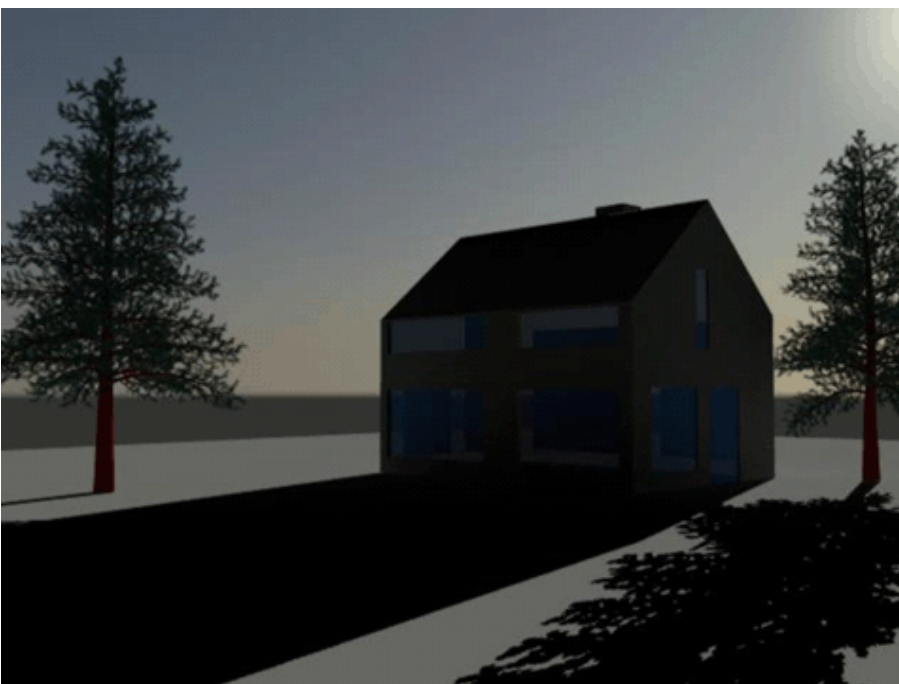
Normalment, la llum principal es col·loca en algun grau per sobre del subjecte, en què les ombres apunten cap avall, per a veure les coses il·luminades. No obstant això, si es col·loca la llum massa alta, el resultat poden ser ombres fosques i que l'escena sembli molt plana, sense volum. La millor manera de guiar-nos per a col·locar una llum principal és fixant-nos en com reparteix les ombres. Per a configuracions normals, l'angle format per la llum, el personatge i la càmera hauria de ser aproximadament d'entre 10 graus i 50 graus des del costat de la càmera.



Renderització amb una llum principal

Quan treballem amb una seqüència en moviment, hem de tenir en compte que la configuració d'il·luminació també ha de funcionar i l'hem de comprovar fent el recorregut de l'animació amb una restricció de posició de prop de 90 graus de gir per a veure que realment funciona. La distància a la qual hem de posar la llum respecte a un costat de l'objecte depèn del punt d'origen que intentem mimetitzar, tenint en compte que si la movem massa lluny cap a un costat poden aparèixer ombres que distreguin l'espectador.

Si treballem en una escena exterior, el temps i l'estació poden dictar la posició de la llum principal. Una llum càlida col·locada baixa forma unes ombres llargues i el resultat és una escena que podria ser a l'alba o al capvespre.



La llum principal no sempre es localitza davant del subjecte; encara que la seva funció sigui representar l'origen de llum dominant en l'escena, pot estar darrere de l'objecte o al seu costat si l'escena consisteix, per exemple, a il·luminar des de fora d'una finestra cap a dins.



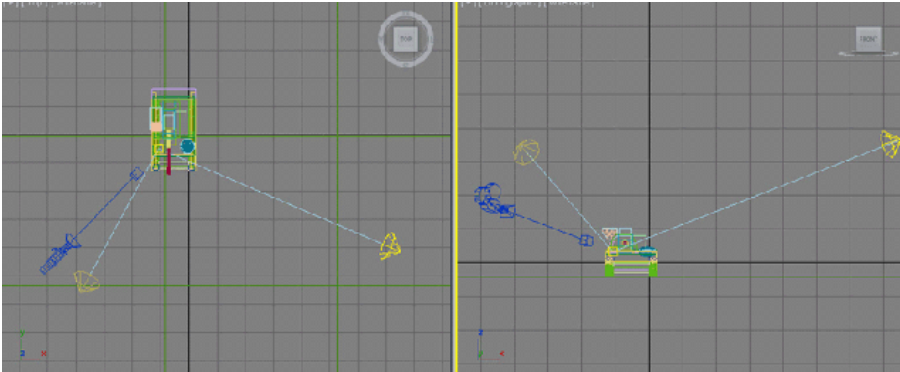
Aquest tipus d'escenari podria presentar un tipus de silueta dramàtica del subjecte o objecte enfront de la càmera; en aquest cas es diu que la llum principal està sobrerepresentada o massa saturada i que les ombres es marquen massa. La sobreexposició d'aquestes ombres es pot reduir incrementant l'ús dels flaixos compensatoris. La ràtio d'intensitat de la llum principal respecte als flaixos compensatoris ens establirà l'atmosfera de l'escena, tal com veurem a continuació.

7.1.2. Flaix compensatori primari

El **flaix compensatori primari** se situa al costat oposat al del subjecte des de la llum principal.

En el cinema, els flaixos compensatoris primaris es col·loquen normalment a l'altura dels ulls per a no haver de crear ombres a la cara dels personatges. En el món 3D el flaix compensatori primari està col·locat normalment una mica més alt que els ulls; a més, el fet de poder desactivar la generació d'ombres ens permet il·luminar l'objecte correctament des de dalt i no des de baix, la qual cosa provocaria un efecte en la il·luminació d'un personatge amb sensació de cara enfonsada.

Se suggereix situar el flaix compensatori perpendicularment a la llum principal, formant un angle de 90 graus, i entre uns 0 graus i 15 graus per damunt o per sota d'aquesta.



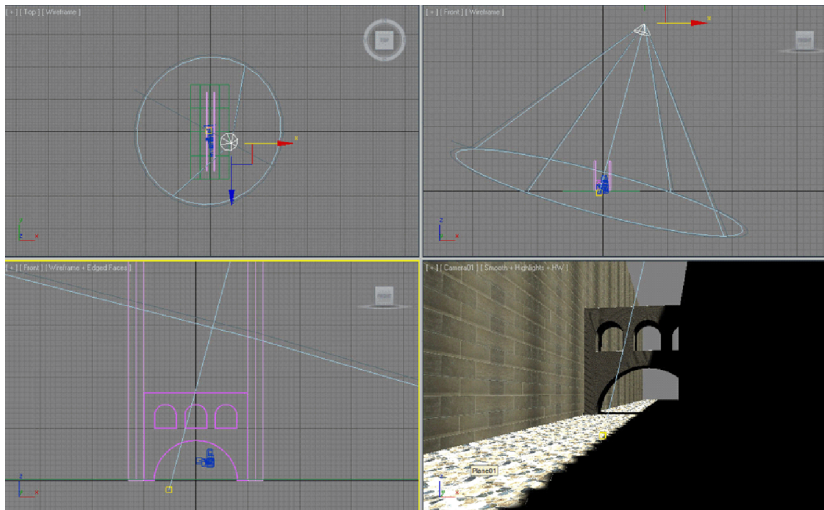
D'aquesta manera, aconseguim que la llum principal i el flaix compensatori se superposin, i ens assegurem que no apareix cap pedaç o taca en el patró d'il·luminació.

Tant en cinematografia com en gràfics per ordinador, el rol del flaix compensatori primari involucra dos aspectes:

- Obrir o suavitzar les ombres de la llum principal.
- Proveir d'una il·luminació subtil les zones de l'objecte que estan en ombra per la llum principal.

En el cinema, s'utilitzen panells perquè la llum reboti a la superfície dels objectes i aquests s'il·luminin. En gràfics per ordinador, els flaixos compensatoris representen aquest paper de llum rebotada, tret que utilitzem tècniques d'il·luminació global, en les quals es calcula automàticament. Òbviament, amb un flaix compensatori no podem il·luminar tota la llum secundària de rebot que es produeix en l'escena, sobretot en escenes grans, per això és normal tenir dotzenes de flaixos compensatoris que ens ajuden a donar aquest toc a l'escena.

Fixem-nos en l'exemple: volem il·luminar aquesta escena en la qual tenim el que podria ser un pont d'un castell; l'escena està il·luminada només amb una llum que representa el sol.



La renderització obtinguda amb aquesta configuració ens permet veure que no tenim llum ambiental rebotada i una part de l'escena ens queda molt fosca, per la qual cosa és necessari afegir flaixos compensatoris per a millorar la il·luminació.



El primer que farem serà estudiar l'escena, i veure que ens fa falta.

Les fonts de llum principals són:

- El sol: és una llum paral·lela de color groguenc que ja tenim en l'escena.
- La llum rebotada del sol i del cel: és el resultat principalment de la llum del sol que rebota en la geometria (encara que el cel també produeix llum de rebot en totes direccions).
- La llum del cel: és llum blava que envolta tota l'escena.

Per simular la llum de rebot, el que farem serà posar dues files de llums a dues altures al llarg del passadís. La primera línia de llum està col·locada a prop del terra, i la segona línia, aproximadament al centre de la màxima altura de l'escena. Aquestes línies de llum omplen la zona suaument i amb una llum bastant uniforme.

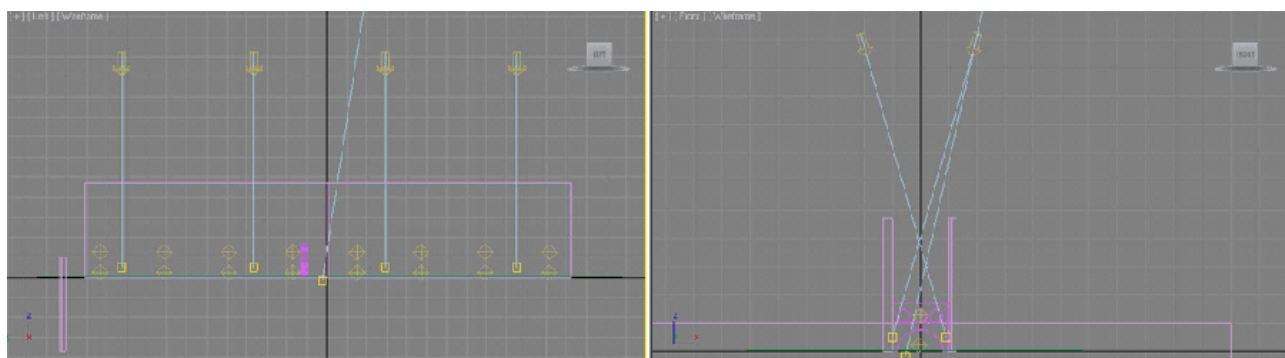


Podem veure que la il·luminació millora bastant, ja no hi ha objectes en la foscor i l'escena sencera ha adquirit una atmosfera més real, encara que podem veure que les parets encara queden una mica fosques, per la qual cosa necessitem simular la llum rebotada que ve del cel.

Per a això col·locarem set còpies d'una llum *direct* apuntant des de dalt a les parets i a terra, la qual cosa dóna un total de vuit llums.



Podem veure que, encara que els detalls són molt subtils, la zona en ombra de la paret i el terra queda amb una il·luminació més aixecada, la qual cosa s'adapta més a una atmosfera real. D'altra banda, el pont encara ens queda una mica fosc, sobretot la part de baix, per la qual cosa afegirem dues llums omni més davant del pont a l'altura de terra i a l'altura màxima de pont; amb això destacarem la il·luminació de sota el pont i els seus contorns. A més, afegirem una altra llum *direct* des del punt de vista de la càmera per guanyar una mica d'il·luminació general al pont, ja que en comparació de les parets queda una mica fosc, i finalment una llum *spot* sense ombres des de baix de terra, la qual cosa ens afegirà una mica més de claredat per la part de sota el pont. Obtindrem la imatge següent.



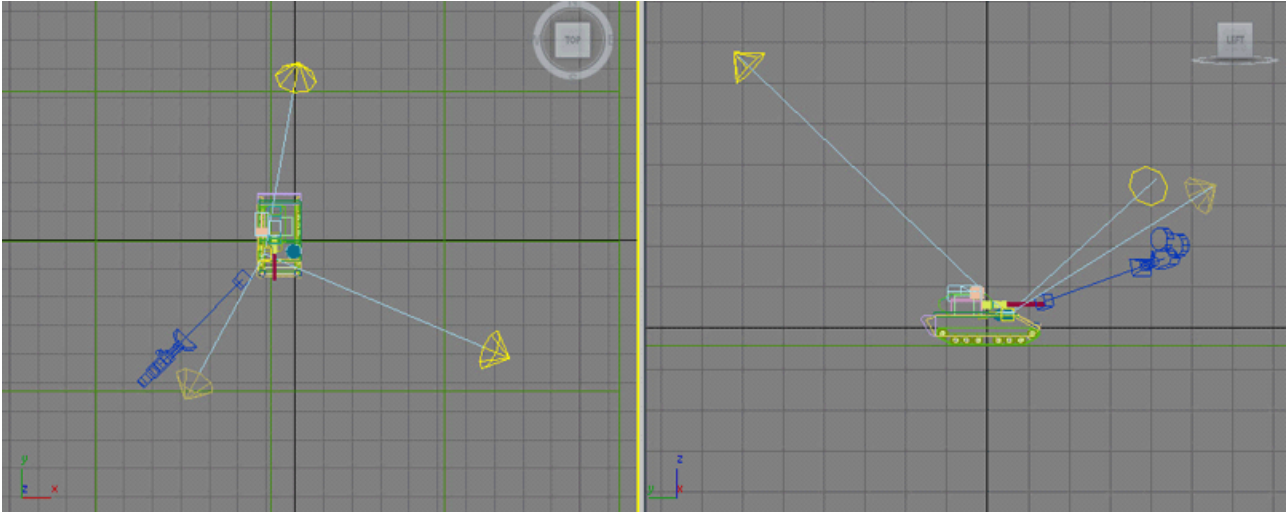
7.1.3. Llum posterior

L'habilitat de la **llum posterior** (o flaix compensatori **secundari**) de separar els objectes del fons fa que sigui més important en 3D que en el món del cinema, en què s'utilitza molt menys des que les pel·lícules van deixar de ser en blanc i negre.

Treballar sense color incrementa la necessitat de separar els elements del fons amb tons similars. Encara que de vegades aquesta tècnica s'utilitza en 3D, quan la sensació de profunditat és una consideració important, no sempre cal, ja que amb el color ja s'obté prou separació visual.

En fotografia i cinema, la llum posterior generalment es col·loca directament al darrere i al damunt del subjecte, creant un angle d'uns 45 graus. Com més gran sigui l'angle d'il·luminació, pitjor serà l'efecte, ja que pot produir lluentors al front i el nas del subjecte. En canvi, amb un angle més petit, correm el risc que apareguin centelleigs de llum (*lens flares*).

En 3D, les llums posteriors tendeixen a ser al fons de l'escena en posició oposada a la càmera en algun lloc entre els 10 graus i els 50 graus, per damunt o per sota de la càmera.



El problema principal que tenim amb la llum posterior és que actualment és difícil de simular perquè en el món virtual no existeixen els objectes orgànics (definites per la pell, el pèl, la brutícia, les fibres, etc.) que hi ha en el món real. Quan il·luminem amb aquest tipus de llum el món real, al voltant de l'objecte apareix un efecte subtil de resplendor (*glow*) perquè la llum és una mica difusa.

En 3D, en no tenir aquesta capa de manipulació, no podem obtenir aquest efecte, per la qual cosa si intentem il·luminar un objecte per darrere no serà tant efectiu com necessitaríem. Encara que no és la prioritat d'aquesta lectura, hi ha alguns materials (*shaders*) que ens poden ajudar a donar aquest efecte de resplendor al voltant de l'objecte, per la qual cosa és important experimentar-hi per a obtenir un bon resultat.

Vegem-ne un exemple. Utilitzem la mateixa escena anterior, però simplement afegim un material a l'objecte. Podem veure que els contorns tenen un efecte subtil d'aura de llum.



Renderització amb il·luminació tres punts i material amb *shader* Falloff aplicat.

El material que hem utilitzat en l'escena és el *shader* Fallof, que assignat als canals d'opacitat i reflexió ens permet fer que els contorns de l'objecte respecte a la càmera siguin una mica transparents, i així podem filtrar una mica més de llum, amb la finalitat d'obtenir una espècie de resplendor al voltant de l'objecte que fa que ressalti del fons.

7.1.4. Relació llum principal-flaix compensatori

La relació entre la llum principal i el flaix compensatori és molt important, ja que es refereix al contrast de l'esquema d'il·luminació, que té bastant efecte en l'atmosfera de la renderització.

- Una **ràtio baixa té molt flaix compensatori**, per la qual cosa en termes de llum s'obté menys contrast i una il·luminació més alegre.
- Una **ràtio alta té poc flaix compensatori**, amb la qual cosa obtenim unes imatges més fosques i contrastades.

1) Ràtio sota llum principal-flaix compensatori

Les ràtios entre 2:1 i 4:1 estan classificades com a ràtios baixes, produeixen renderitzacions amb il·luminacions fortes i amb poc contrast en l'escena. La brillantor resultant i la manera en què les ombres estan repartides evoquen una sensació d'alegria en l'escena.

Aquesta ràtio es modela en el programari 3D amb el paràmetre del multiplicador.

Per exemple, una ràtio 2:1 seria una llum principal amb multiplicador a 1, i un flaix compensatori a 0,5. La ràtio 4:1 seria la llum principal a 1 i el flaix compensatori a 0,25.



Ràtio 2:1 amb il·luminació de tres punts; llum principal 1, flaixos compensatoris 0,5.

Normalment, les escenes interiors produeixen més ràtios baixes que les escenes exteriors. Aquí la potència de les llums per a reflectir-se en les superfícies i les parets és molt alta.

En el tipus d'interiors, en què la llum acoloreix les superfícies, rebota prou llum en l'escena per a produir una ràtio baixa. Al final pot ser que acabem tenint una ràtio gairebé d'1:1, i en aquest punt és quan la llum principal es comença a igualar amb els flaixos compensatoris, amb el resultat que correm el perill que escena quedi plana i uniforme i perdi tota la sensació de volum que desitgem.

2) Ràtio alta, llum principal-flaix compensatori

Quan la nostra ràtio s'aproxima a 10:1 o més, la nostra il·luminació tindrà una ràtio alta amb el resultat d'unes ombres molt negres que contrasten fortament amb les àrees il·luminades. Per a fer-nos una idea de la falta de llum reflectida, aquest tipus d'il·luminació s'esdevé normalment a la nit en el món real, en el qual no hi ha flaix compensatori que ve del cel, la qual cosa explica el dramatisme de l'escena que es crea.

Vegem la mateixa escena anterior amb una ràtio 10:1.



Ràtio 10:1 amb il·luminació de tres punts; llum principal 1, flaixos compensatoris 0,1.

La clau per a usar aquest tipus de ràtio correctament és regular acuradament la nostra llum per a il·luminar els detalls importants correctament, a més d'usar tot el rang tonal de què disposem per a tenir una bona il·luminació en les àrees fosques de la imatge.

Que una escena estigui en condicions fosques no significa que aquestes àrees hagin de quedar amagades, no hem de tenir por que el públic se'n perdi alguns detalls.

Les ràtios altes s'utilitzen normalment en escenes nocturnes, en les quals la llum principal està representada per la lluna o alguna llum artificial. Estèticament, aquest aspecte es va començar a usar cap als anys quaranta i encara ara s'utilitza en pel·lícules de terror per a construir l'escena de suspens.

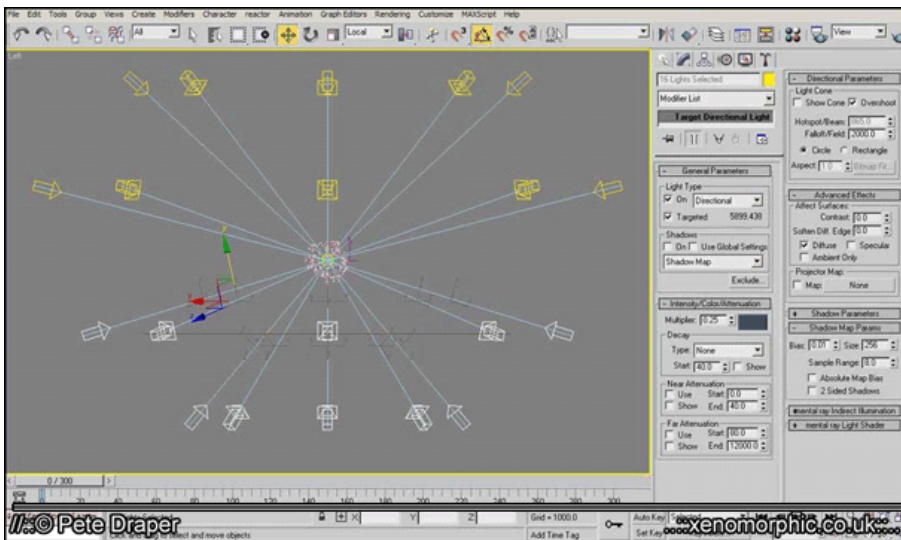
7.1.5. Il·luminació en *array*

Quan una llum necessita embolicar un objecte, una sola llum normalment no és suficient, ja que sempre queda alguna zona en ombra. És aquí quan els *arrays* de llum són útils.

Els *arrays* són simples grups de llums que representen una llum d'àrea, una cúpula de llum semblant a la il·luminació del cel; qualsevol part en la qual es fixa la llum és massa gran, per la qual cosa es requereix més d'una llum.

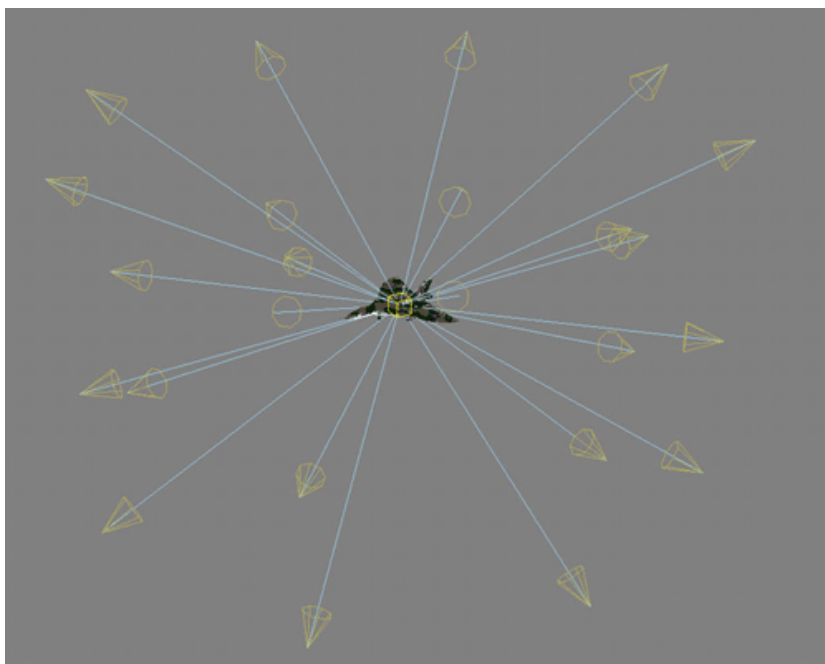
Vegeu també

Hem explicat la llum d'àrea en l'apartat "Tipus de llums".

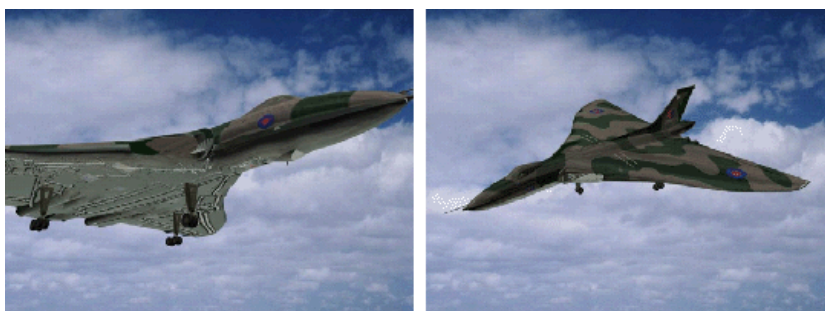


Els *arrays* de llum estan pensats com a alternativa a les llums d'àrea. El problema amb les llums d'àrea és que són una mica més difícils de controlar. El color de la llum d'àrea no és tan controlable com el de la llum individual, per no esmentar la càrrega computacional que comporta utilitzar aquest tipus de llums. Quan utilitzem llums d'àrea, normalment no sabem quantes llums individuals estan il·luminant un objecte de l'escena i és per aquest motiu que en alguns moments ens vindrà molt bé conèixer el tipus de tècnica en què s'utilitzen els *arrays* de llum, que ens permeten tenir més control i flexibilitat i un temps de càlcul més reduït.

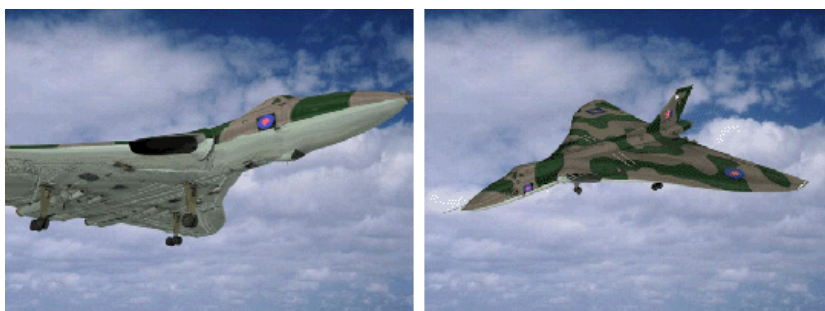
Vegem un exemple d'utilització d'aquest tipus de tècnica. Il·luminarem un avió que va volant pel cel; per a això crearem un *array* de llums *spot* apuntant directament a l'avió.



Vegem com queda la il·luminació sense l'*array* i amb l'*array*.



Sense *array*.



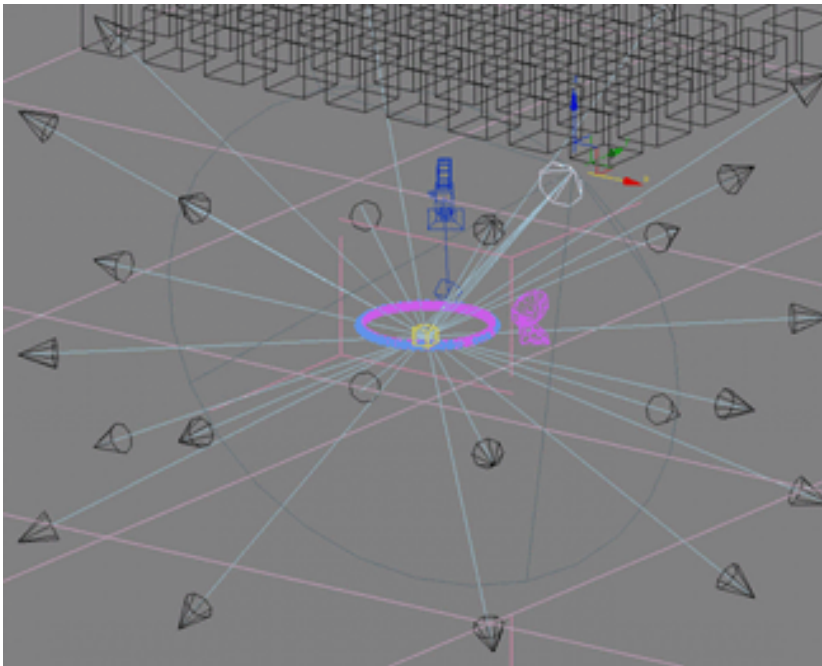
Amb *array*.

Hi ha moltíssims efectes que podem crear gràcies als *arrays* construïts en diferents formes: en anell, caixa, tub, etc. Depenent dels colors que donem a les seves llums individuals, la il·luminació variarà; a més, podem especificar quins tindran les ombres activades o no.

Aquesta tècnica treballa fantàsticament bé com a flaixos compensatoris, produint alteracions subtils en el color i la intensitat al voltant de l'objecte, la llum primària del qual generalment és una llum fora de l'*array*.

Vegem l'exemple següent. Tenim un anell i dos diamants en una típica escena en què hem d'il·luminar el producte. Utilitzem una llum directa de tipus *spot* per a il·luminar l'escena, amb color blanc, amb un multiplicador al voltant de 0,7 i el con bastant obert

perquè quedi tota la composició il·luminada. I, per als flaixos compensatoris, utilitzem un *array* en l'anell, ja que és l'objecte principal de la composició, amb multiplicador a 0,05 i diferents colors per a veure diferents resultats.



Anell sense *array*



Anell amb *array* amb llums de color blanc



Anell amb *array* amb llums de color ataronjat

Això no significa que sigui un mètode infal·libre i que no hàgim d'afegir més flaix compensatori extra. Sempre ens hem de qüestionar si són necessàries més llums per a emfatitzar la naturalesa 3D de l'objecte que il·luminem.

8. Tècniques d'il·luminació avançades

En aquest apartat veurem com s'il·luminen espais exteriors i interiors amb poques llums gràcies a l'ús de tècniques i algorismes basats en **il·luminació global**.

Hi ha certa confusió sobre el terme *il·luminació global*, ja que, tal com hem comentat més amunt, es refereix a la manera en què un objecte està il·luminat per un component de llum directa més la llum rebotada del seu entorn proper.



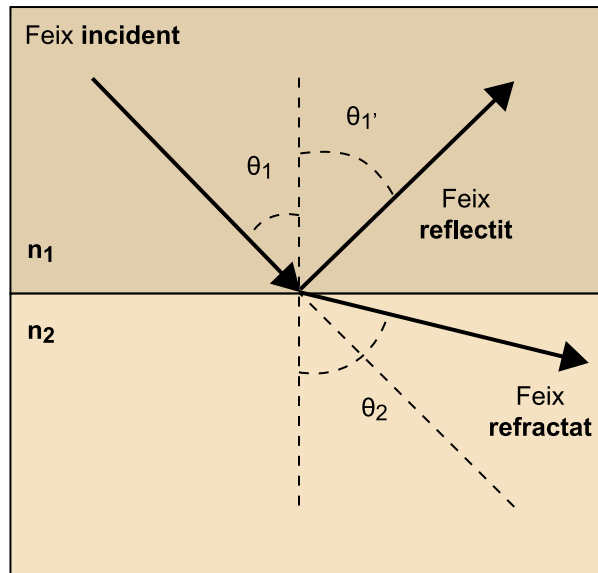
En l'intent de reproduir imatges basades en l'obtenció d'una simulació fotomètrica físicament correcta, no ens sorprèn que s'hagi fet un ús intensiu d'aquestes tècniques en l'àrea de la visualització arquitectònica.

Per a entendre bé aquest tipus de tècniques cal conèixer una sèrie de conceptes que s'utilitzen en els seus algorismes de càlcul, com ara la distribució de la llum, el *raytracing*, la radiositat, el *photon mapping* i el *final gathering*.

8.1. Distribució de la llum

Imaginem una escena d'una habitació interior il·luminada pel sol a través d'una finestra. La llum és emesa per unes quantes partícules (fotons). Aquests fotons viatgen des de l'origen fins que copegen alguna superfície de l'escena segons el seu angle d'incidència.

Depenent del material de la superfície, alguns d'aquests fotons són absorbits i d'altres són retornats a l'escena, per la qual cosa la manera en què aquests fotons es reflecteixen des d'una superfície depèn de les característiques pròpies del material.



Les **superfícies que són molt suaus** reflecteixen els fotons en una direcció, en el mateix angle al qual arriben a la superfície (l'angle d'incidència). Aquestes superfícies són conegudes com a *superfícies especulars*, i òbviament la seva reflexió és la **reflexió especular**.

Les **superfícies aspres** tendeixen a reflectir els fotons en totes les direccions. Provoquen les conegudes com a **reflexions difuses**.

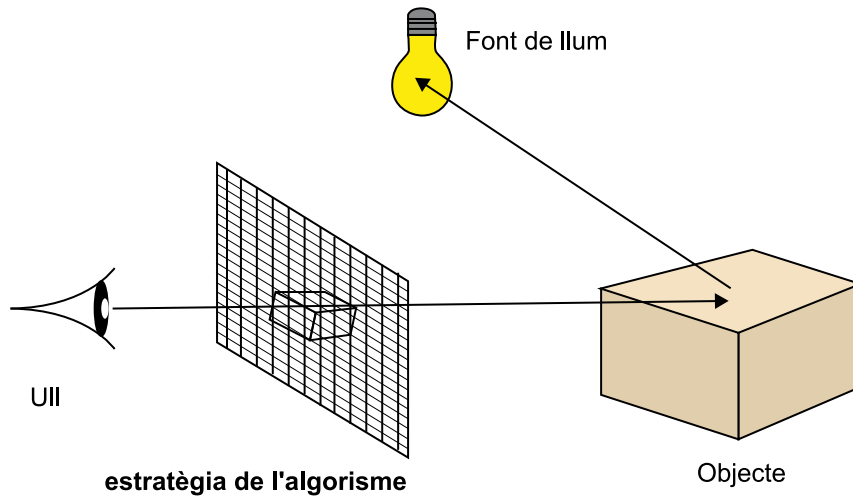
Un mirall és un exemple perfecte de superfície especular, mentre que una paret pintada (amb pintura mat) és un bon exemple de superfície difusa.

La il·luminació final d'una escena està determinada per la interacció entre les superfícies i els bilions de fotons que han arribat directament des de l'origen de llum (il·luminació directa) o indirectament des d'algun rebot d'una altra superfície (il·luminació indirecta).

8.2. Raytracing

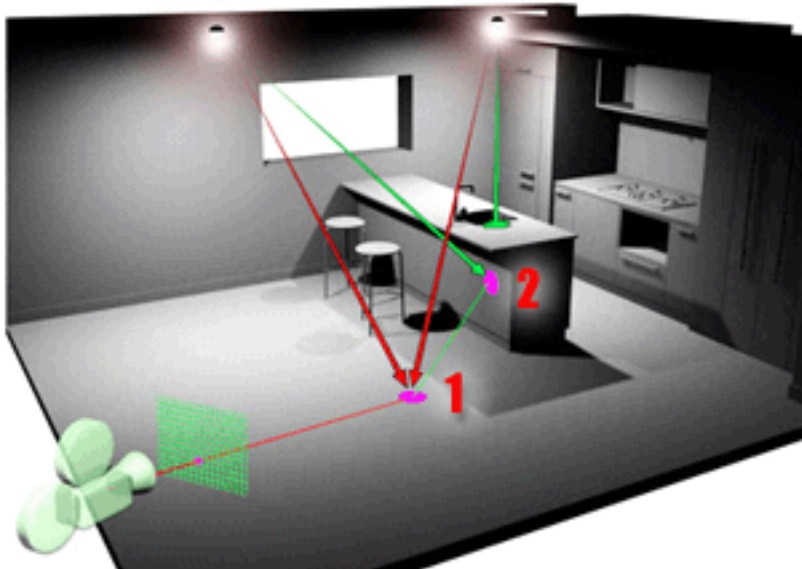
La tècnica de *raytracing* va ser un dels primers algorismes d'il·luminació global que es van desenvolupar. Aquest algorisme reconeix que encara que s'haurien d'emetre bilions de fotons, són solament els primers els que arriben a l'ull i amb els quals formem la imatge resultant.

L'algorisme treballa traçant rajos cap a enrere, des de cada píxel de la pantalla dins de l'escena. D'aquesta manera, és més eficient, perquè així solament es calcula la informació que ens fa falta per a construir la imatge. Per a crear una imatge d'aquesta manera, se segueix el procediment següent:



Per a cada píxel de la pantalla:

- **Pas 1.** Es traça un raig cap enrere, des de la posició de l'ull, a través del píxel del monitor, fins que interseca amb una superfície. La reflexió de la superfície és coneguda gràcies a la descripció del material, però la quantitat de llum que reflecteix la superfície encara ens és desconeguda.

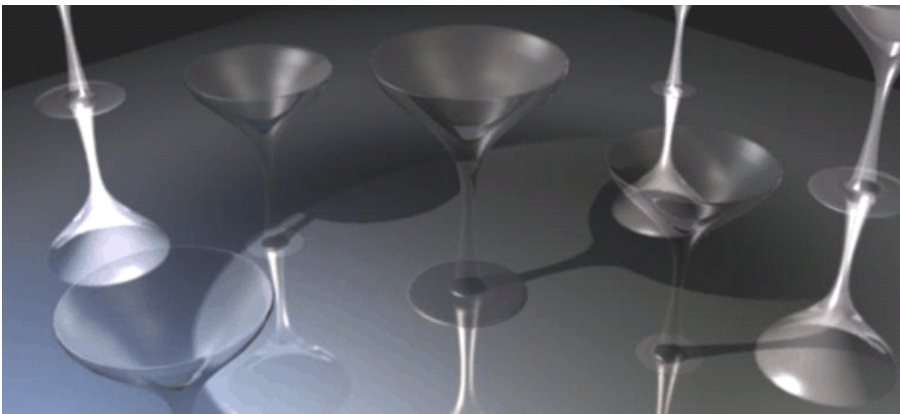


- **Pas 2.** Es traça un raig des d'aquest punt d'intersecció en la superfície a cada origen de llum en l'escena. Si el raig que va cap a la llum no està bloquejat per cap objecte, la contribució des d'aquest origen es fa servir per a calcular el color de la superfície.

- **Pas 3.** Si la superfície d'intersecció és brillant o transparent, també necessitem determinar què veiem dins o a través de la superfície a processar. Es repeteixen els passos 1 i 2 en la direcció de reflex (i en el cas de transparència, es transmeten) fins que es troba una altra superfície. El color en els punts subsegüents d'intersecció es calcula i s'ajunten en el punt original.
- **Pas 4.** Si la segona superfície també és reflectora o transparent, es repeteix el procés de *raytracing*, i continuem fins a un nombre màxim d'iteracions o fins que no es trobin més superfícies interseques.

Si bé la tècnica de *raytracing* s'hauria de considerar eficient, ja que només es calcula la informació que es necessita per a generar la imatge, encara és relativament lenta per a escenes que siguin una mica complexes.

Es tracta d'una tècnica molt versàtil i pot modelar un gran rang d'efectes d'il·luminació. Hi ha implementacions, tal com hem vist en els temes anteriors, per a representar ombres amb gran eficàcia, reflexions especulars i refracció; aquesta és la raó per la qual podem utilitzar aquesta tècnica de manera individual en objectes que necessiten aquestes qualitats.



Encara que la seva velocitat és un desavantatge, hi ha una característica encara més important d'il·luminació global amb la qual no comptàvem: la reflexió entre superfícies difuses. La tècnica tradicional de *raytracing* només ens permet prendre la llum que arriba directament dels punts de llum que hi ha en l'escena. No obstant això, tal com hem vist, no solament ens arriba la llum de les fonts de llum, també pot arribar la llum indirectament d'altres superfícies que cal tenir en compte a l'hora de recrear correctament la il·luminació d'una escena, com fan altres algorismes que veurem a continuació.

8.3. Radiositat

Al principi dels anys seixanta, la investigació tèrmica va desenvolupar mètodes per a simular transferència de calor radiada entre superfícies. Uns vint anys més tard, els investigadors de gràfics van començar a emprar aquestes tècniques per a modelar la propagació de la llum, i han arribat als nostres dies en el que coneixem com a **radiositat**.

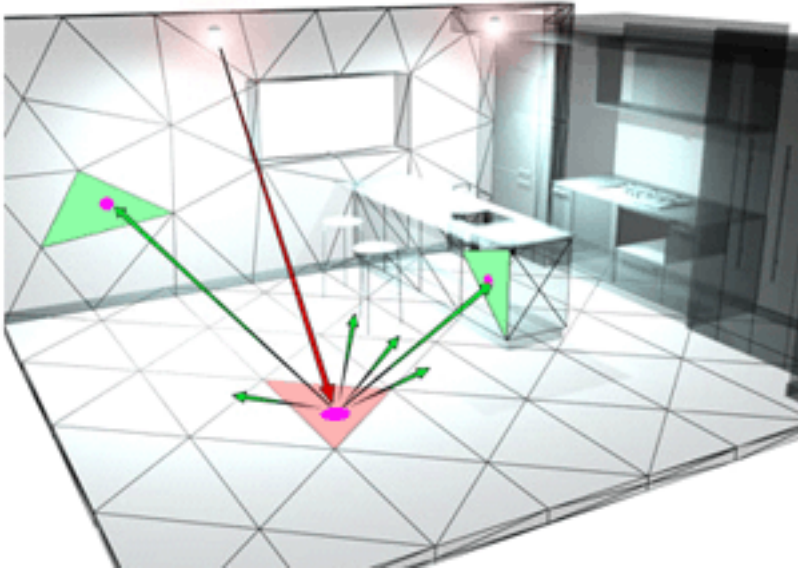
Aquesta tècnica es diferencia de la tècnica de *raytracing* fonamentalment perquè calcula la intensitat de totes les superfícies de l'entorn, en lloc de calcular solament les que s'han traçat des de la pantalla.

La idea en què es basa aquesta tècnica consisteix a buscar l'equilibri de l'energia que emeten els objectes emissors de llum i l'energia que absorbeixen els objectes en l'ambient. Per a dur a terme aquest càlcul d'il·luminació, és necessari considerar que quan la superfície d'un objecte que no emet llum per si mateix és il·luminada per un altre objecte, aquesta superfície absorbeix una certa quantitat de l'energia, però en reflecteix una altra part, per la qual cosa es pot considerar com una emissora de llum per reflexió. De manera que totes les superfícies en l'ambient són d'una manera o altra emissores d'energia i, per tant, cadascuna afecta la il·luminació de les altres superfícies.

Cal dir que, encara que la llum es reflecteix entre tots els objectes de l'escena, el càlcul que es fa no és sobre les propietats físiques reals, per la qual cosa la representació que obtenim normalment no és físicament real, sinó una interpretació respecte a un algorisme per a generar la il·luminació.



Per a calcular la il·luminació amb aquest algorisme es divideix la superfície original en una malla de petites superfícies, tal com veiem en la imatge següent. L'algorisme de radiositat calcula la quantitat de llum distribuïda des del focus de llum a cada element i des de cadascun d'aquests elements als diferents elements de la malla, on el valor de radiositat final generat es desa com la suma de les aportacions per a cada element de la malla.



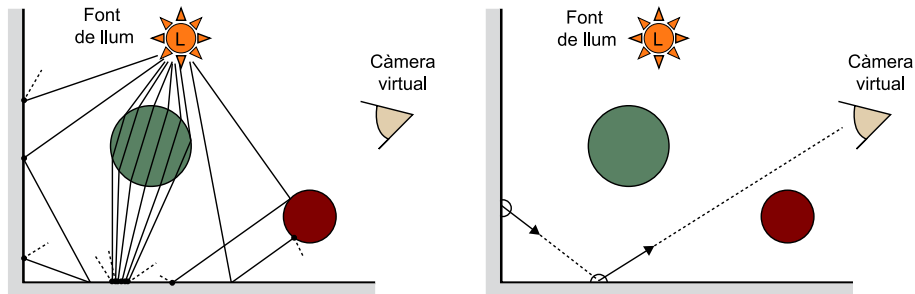
Aquesta tècnica ha evolucionat molt en els últims anys. El 1988 es va inventar una tècnica anomenada **tècnica del refinament progressiu**, que mostrava els resultats de la radiositat de manera visual immediatament i que permetia refinar progressivament el càlcul per a obtenir una qualitat millor. Una dècada després, es va inventar l'anomenada **tècnica de la radiositat per relaxació estocàstica (SRR)**, que construeix una sèrie de possibles solucions i intenta convergir-hi (aquesta tècnica és la base de l'algorisme de radiositat de 3dsmax).

Malgrat tots aquests avenços, cal esmentar que igual que el *raytracing*, la radiositat no produeix tots els efectes d'il·luminació global i també té les seves pròpies arestes (per exemple, no podem crear càmstiques). No obstant això, aquestes dues tècniques es complementen i treballen ben juntes. La radiositat és excel·lent per a renderitzar reflexions entre superfícies difuses, mentre que la tècnica de *raytracing* és excel·lent per a calcular reflexions especulars.

8.4. Photon mapping

El *photon mapping* és un algorisme d'il·luminació global en dos passos desenvolupat per Henrik Wann Jensen. El seu desenvolupament està basat a desacoblar la representació de la il·luminació de la geometria de l'escena fent dos passos independents:

- Primer es construeix l'estructura del mapa de fotons (traçat de fotons), des de les fonts de llum fins al model (imatge de l'esquerra).
- En una segona etapa de renderització s'utilitza la informació del mapa de fotons per a fer el *renderitzat* de manera més eficient (imatge de la dreta).



Representació del mapa de fotons i el seu ús.

Quan s'emet un fotó, aquest és traçat a través de l'escena d'igual manera que es llancen els rajos en *raytracing*, excepte pel fet que els fotons propaguen *flux*⁴ en lloc de radiància.

⁽⁴⁾Conjunt de vectors sobre una superfície.

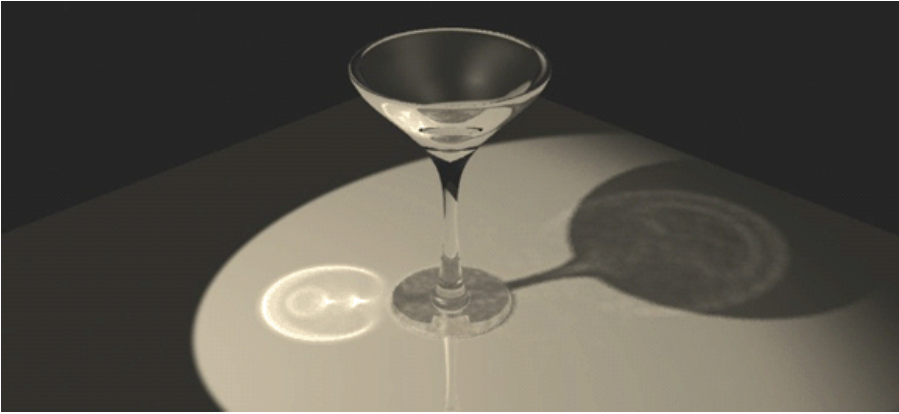
Quan un fotó xoca amb un objecte pot ser reflectit, transmès o absorbit (segons les propietats del material i un factor aleatori dins del domini del material). En realitat, el mapa de fotons està format per dues estructures:

- Una per a guardar els impactes de fotons a causa de les càustiques⁵.
- I una altra per a representar la il·luminació global.

⁽⁵⁾Efectes de concentració de llum quan passen a través de lents, objectes de vidre, etc.

En la segona etapa es renderitza la imatge amb diverses mostres per píxel emprant una tècnica denominada *pathtracing*, en la qual primer es calcula amb precisió la il·luminació directa de manera similar a com es va fer en *raytracing*.

Finalment, la il·luminació indirecta es calcula emprant el mapa de fotons global. Gràcies a aquesta informació, el mètode arriba abans a la solució correcta i se suavitza enormement el soroll que es generaria amb el càlcul de la il·luminació per un altre tipus de mètodes.



Renderització amb mapatge de fotons amb valors baixos per a veure la dispersió dels fotons en l'escena.

En general, l'ús de mapes de fotons ajuda en escenes d'il·luminació difícil, com poden ser els interiors amb la font de llum que incideix des d'una finestra o en la simulació de càustiques.

8.5. *Final gathering*

En la tècnica de *final gathering* els rajos es generen des de la superfície il·luminada i es dirigeixen cap a la font de llum. Al contrari que en la tècnica de *photon mapping*, en la qual els rajos van des de la font de llum cap a l'objectiu a il·luminar.

La *final gathering* és una tècnica d'estimació d'il·luminació global en la qual, per a un determinat punt d'un objecte de l'escena, es calculen una sèrie de direccions dels vectors al llarg d'un hemisferi d'aquest punt (aquest conjunt de mostres es denomina *final gather point*) o, si és massa costós calcular cada punt de cada objecte de l'escena, es fa una mitjana d'aquests punts.

Sense la utilització de *final gathering*, la il·luminació global en una superfície es calcularia estimant la densitat de fotons prop del punt a il·luminar. Afegint *final gathering* es generen nous rajos que s'envien per a generar l'hemisferi sobre el qual es determinarà la il·luminació del punt.

Normalment, aquesta tècnica s'utilitza en escenes amb poca variació de la il·luminació indirecta, com per exemple en interiors. A més, elimina efectes no desitjats que de vegades apareixen amb un altre tipus de tècniques com cantonades molt fosques o soroll.

