

Iluminación y Sombreado

Introducción

Modelo de iluminación simple

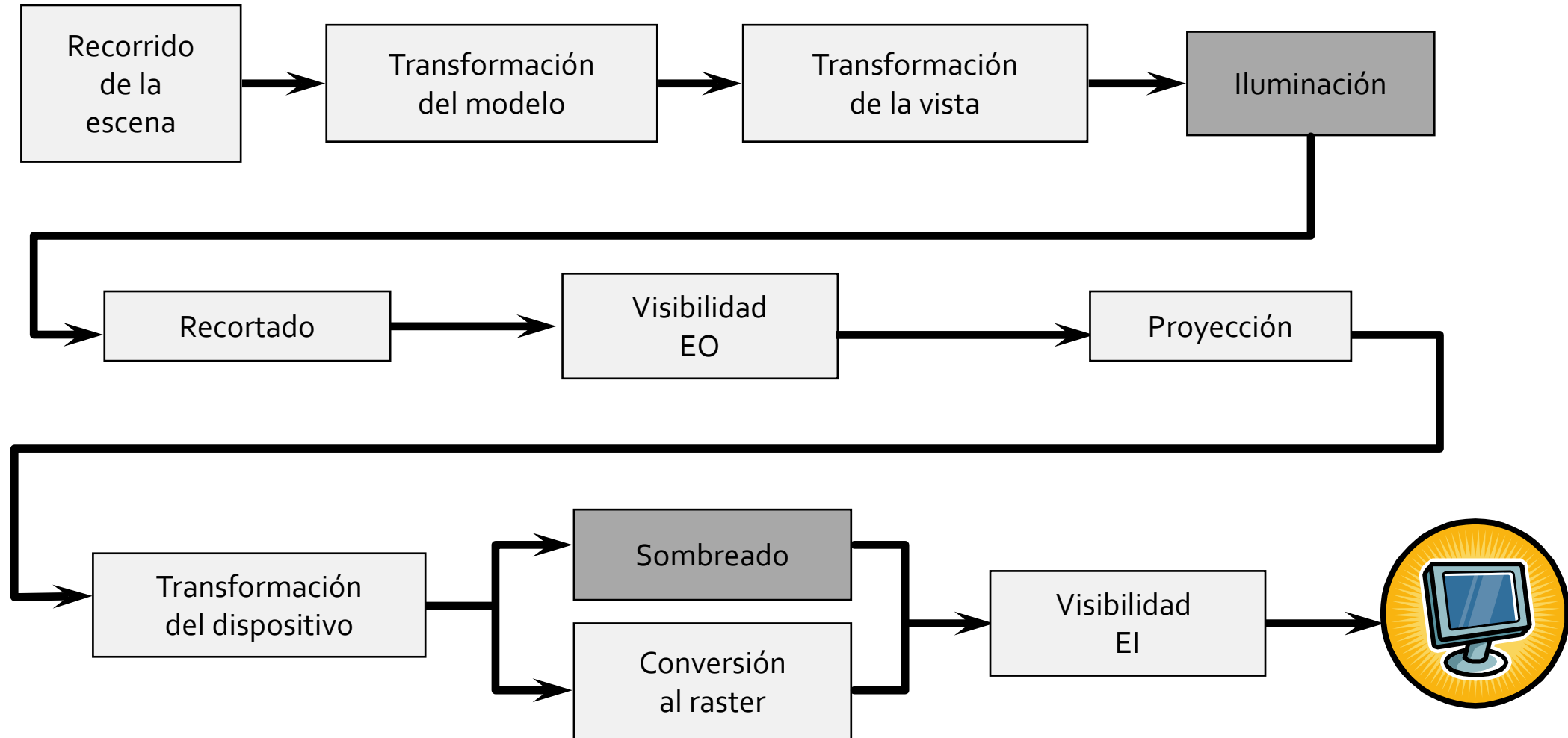
Color en luces y superficies

Múltiples fuentes de luz

Modelos de sombreado

Modelo Avanzados

Introducción



Introducción

Objetivos

- ▶ Conocer los efectos visuales de la luz sobre los objetos y los problemas que plantea su incorporación a la imagen representada.
- ▶ Aprender la forma de modelar estos efectos en una función matemática sencilla.
- ▶ Entender la relación entre la fuente de luz, la superficie del objeto y el observador.
- ▶ Comprender el significado de la parametrización matemática del modelo de iluminación y las consecuencias de la variación de los parámetros en la imagen representada.
- ▶ Estar en disposición de abordar modelos de iluminación más complejos

Introducción

► Preliminares

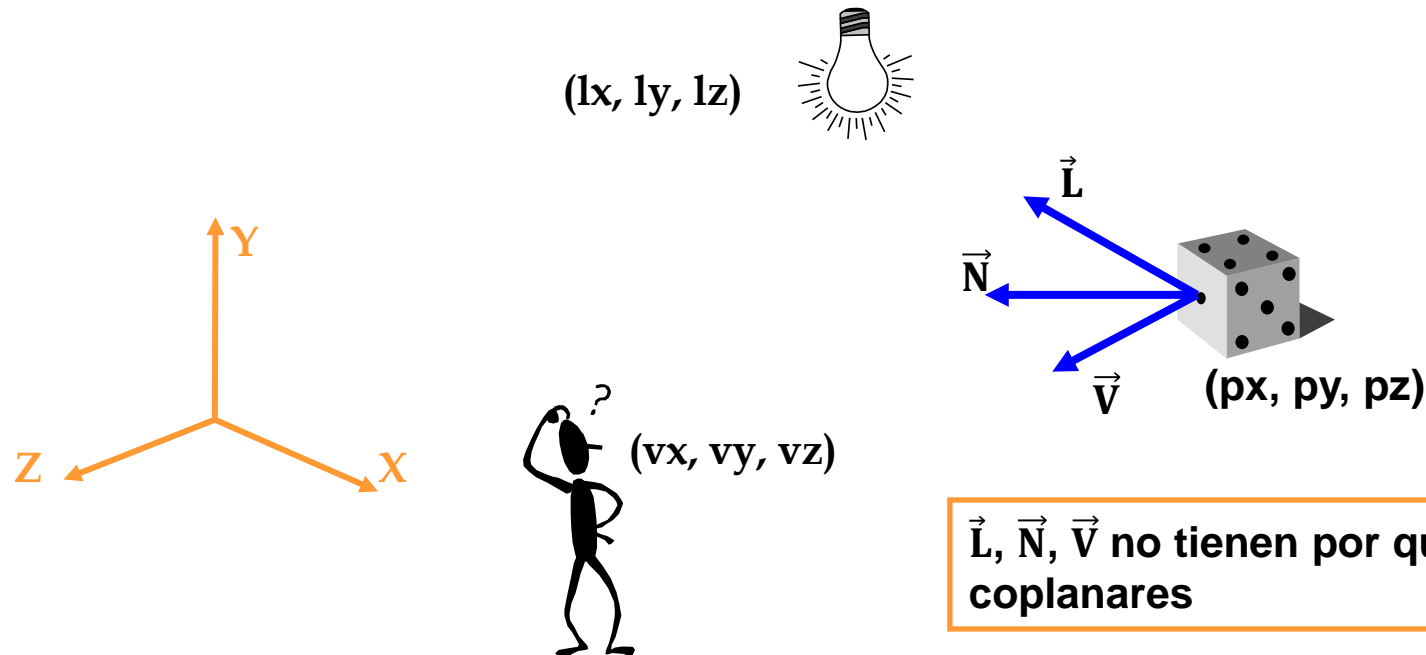
- Conocemos los pasos requeridos para visualizar una escena poligonal utilizando la eliminación de caras traseras.
- Modelización de la geometría de los objetos.
 - La escena a representar se compone de objetos geoméricamente bien definidos.
 - Existe un modelo geométrico al que se le puede interrogar acerca de las características de posición y orientación de los objetos.
 - En todo punto de la superficie del objeto está definida la normal exterior.
 - La superficie de los objetos es lisa.
- Modelización de los atributos visuales de los objetos.
 - Es conocido el color del objeto

Introducción

► Preliminares

► Modelización del observador

- Se conoce la posición del observador (perspectiva) o la dirección de proyección (ortográfica) en el espacio de los objetos
- Se conocen qué partes de los objetos son visibles desde esa posición



\vec{L} , \vec{N} , \vec{V} no tienen por qué ser coplanares

Introducción

- ▶ Fuentes de luz:
 - ▶ Posición: localizada o infinitamente alejada.
 - ▶ Intensidad: color de la fuente.
 - ▶ Cantidad: integración de efectos.
 - ▶ Distribución lumínica: uniforme, focalizada, direccional, etc.
 - ▶ Geometría: puntual, esférica, lineal, etc.
- ▶ Objetos:
 - ▶ Distancias: al observador y a la fuente de luz.
 - ▶ Material: pulido, metálico, rugoso, etc.
 - ▶ Propiedades ópticas: transparencia, refracción, etc.
 - ▶ Cromaticidad: Color superficial propio.
 - ▶ Interacción lumínica con otros objetos de la escena.
- ▶ Observador:
 - ▶ Dirección de observación: cálculo de la intensidad

Modelo de iluminación simple

- Definimos un modelo de iluminación como:

$$I = f(p, PV, \{O\}, \{F\})$$

- p : punto de cálculo de la iluminación
 - PV : posición del punto de vista
 - $\{O\}$: modelo geométrico y material de los objetos
 - $\{F\}$: modelo geométrico e intensidad de las fuentes de luz
 - I : intensidad luminosa observada en p
- Los modelos de iluminación que se mostrarán son empíricos, es decir, no siguen necesariamente las leyes físicas sino que tratan de obtener una simulación visualmente aceptable del fenómeno de la iluminación
 - Simplificaciones aplicadas:
 - Fuentes puntuales
 - Objetos opacos
 - Modelo de iluminación local: no tenemos en cuenta la interreflexión entre objetos

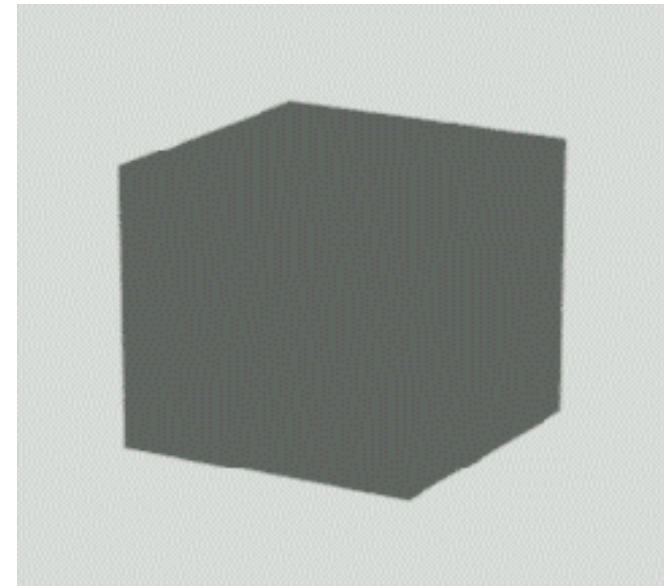
Modelo de iluminación simple

- ▶ El modelo más simple de iluminación es aquél en el que cada objeto es mostrado usando una intensidad propia
- ▶ La ecuación de iluminación que expresa este modelo es:

$$I = k_i$$

en donde

- ▶ I es la intensidad resultante
- ▶ k_i es la intensidad intrínseca [0..1]



Modelo de iluminación simple

Iluminación Ambiente

- ▶ Luz ambiente: se considera que hay una fuente de luz no direccional, producto de múltiples reflexiones de luz desde muchas fuentes presentes en el entorno.
- ▶ La luz ambiente incide igualmente en todas las superficies en todas las direcciones y su ecuación de iluminación es:

$$I = I_a \cdot k_a$$

en donde

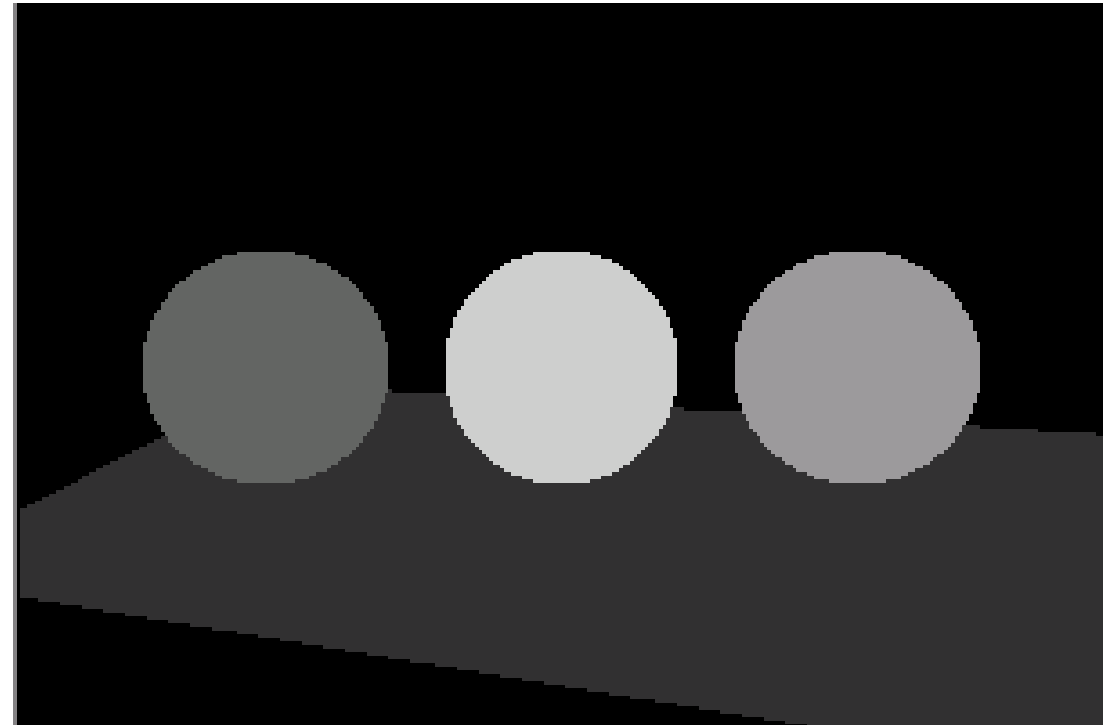
- ▶ I_a es la intensidad de la luz ambiente
- ▶ k_a el coeficiente de reflexión ambiente [0..1], depende de las propiedades del material del objeto

Modelo de iluminación simple

Iluminación Ambiente

- ▶ Ejemplo
 - ▶ Características de la luz:
 - ▶ $I_a = 1$
 - ▶ Características del objeto

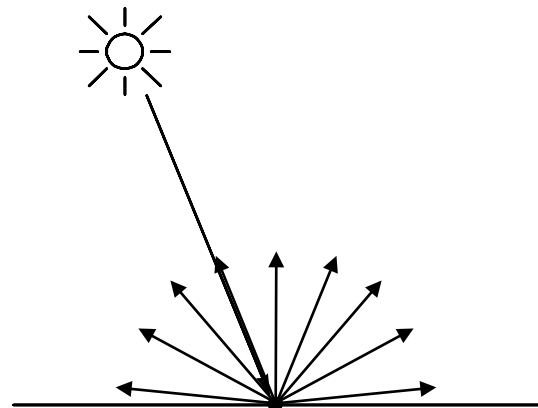
	K_a
Izquierda	0.4
Centro	0.8
Derecha	0.6



Modelo de iluminación simple

Iluminación Difusa

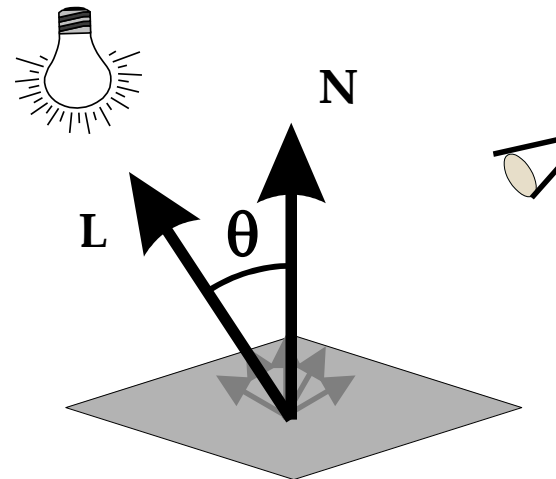
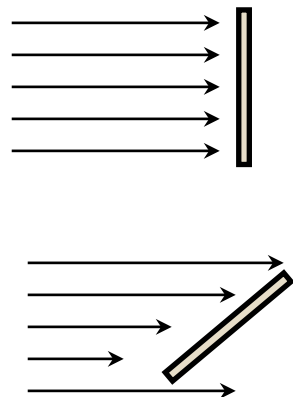
- ▶ Reflexión difusa: parte de la luz reflejada por la superficie de un objeto de manera adireccional (igual intensidad en cualquier dirección)
- ▶ La intensidad de luz reflejada en un punto es independiente de la posición del observador



Modelo de iluminación simple

Iluminación Difusa

- Ley de Lambert: “la componente difusa de la luz reflejada por una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia”
- Es característico de las superficies mate: (tiza, paredes, telas,...)



Modelo de iluminación simple

Iluminación Difusa

- ▶ La intensidad resultante depende del ángulo θ entre la dirección de L y de N (ángulo de incidencia)

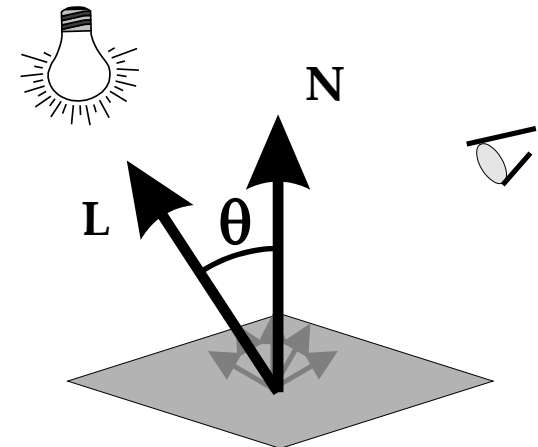
$$I = I_L \cdot k_d \cdot \cos(\theta)$$

- ▶ La ecuación de reflexión difusa:

$$I = I_a \cdot k_a + I_L \cdot k_d \cdot \cos(\theta) = I_a \cdot k_a + I_L \cdot k_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L})$$

en donde:

- ▶ I_L : Intensidad fuente
- ▶ θ : Ángulo incidencia [0..90]
- ▶ k_d : Coeficiente reflexión difusa [0..1]
- ▶ N: Normal superficie (unitario)
- ▶ L: Vector iluminación (unitario)



Modelo de iluminación simple

Iluminación Difusa

► Características de la luz:

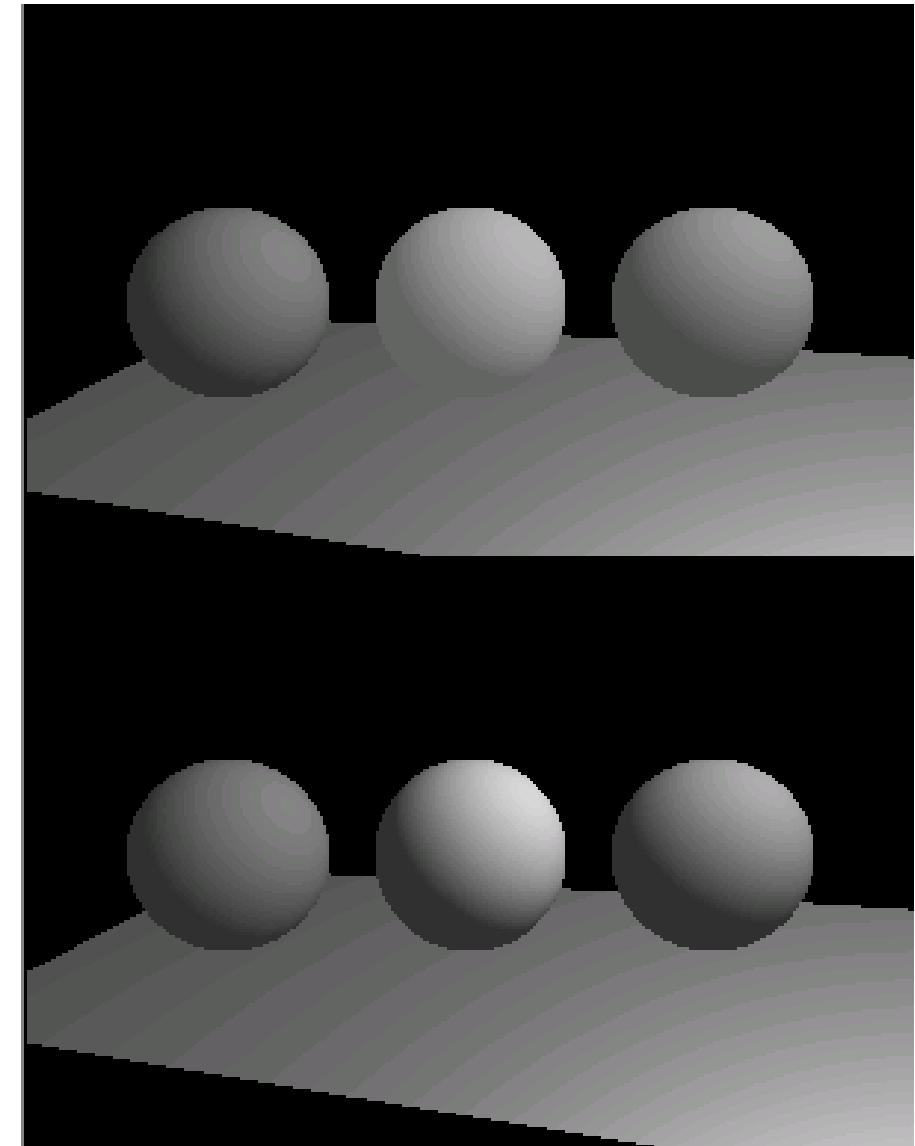
- $I_a = 0.5$
- $I_L = 0.8$
- $Pos = (2, 2, 2)$

○ Características del material:

	Color	K_a	K_d
Izq.	1	0.4	0.4
Cent.	1	0.8	0.4
Der.	1	0.6	0.4

○ Características del material:

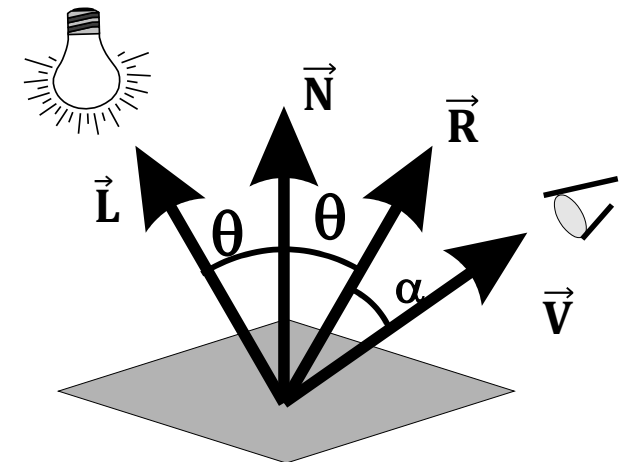
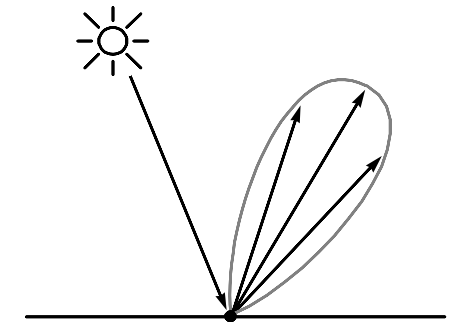
	Color	K_a	K_d
Izq.	1	0.4	0.4
Cent.	1	0.4	0.8
Der.	1	0.4	0.6



Modelo de iluminación simple

Reflexión especular

- ▶ La reflexión especular es la componente de la luz reflejada sobre una superficie brillante o pulida en una dirección preferente formando un brillo.
- ▶ La reflexión especular depende de la posición del observador, dada por el vector \vec{V} .
- ▶ En un espejo perfecto la dirección desde la que se observa el reflejo es la dirección de reflexión perfecta \vec{R} .
- ▶ En las superficies normales, el brillo decae cuando el observador se aleja de la dirección de reflexión perfecta. Se podría modelar este efecto teniendo en cuenta el ángulo entre \vec{R} y \vec{V} .
- ▶ Dependiendo de la superficie (grado de pulido) el brillo está más o menos concentrado alrededor del punto donde \vec{R} y \vec{V} coinciden
- ▶ \vec{L} , \vec{N} y \vec{R} son coplanares, pero \vec{V} no



Modelo de iluminación simple

Modelos de iluminación de Phong

- ▶ Asume que la máxima reflectancia especular ocurre cuando α es cero y decae rápidamente conforme α se incrementa.
- ▶ Esta disminución puede aproximarse mediante $\cos^n(\alpha)$. De este modo, la intensidad especular reflejada por la superficie quedaría como:

$$I_s = I_L \cdot k_s \cdot \cos^n(\alpha) = I_L \cdot k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^n$$

en donde:

- ▶ k_s : coeficiente de reflexión especular.
 - ▶ α : ángulo entre R y V.
 - ▶ n : coeficiente de especularidad.
- ▶ La ecuación de cálculo de intensidad en un punto

$$I = I_a \cdot k_a + I_L \cdot (k_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) + k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^n)$$

Modelo de iluminación simple

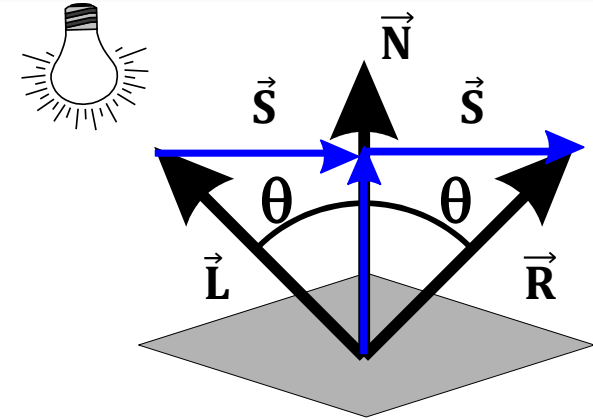
Modelos de iluminación de Phong

- Cálculo de la dirección de reflexión \vec{R}

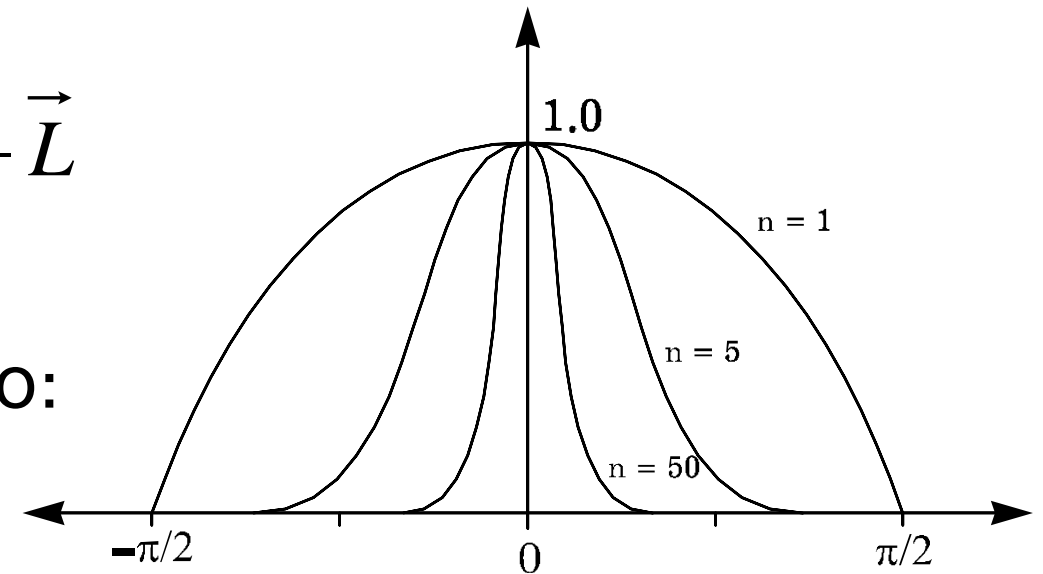
$$\vec{R} = \vec{N} \cdot \cos(\theta) + \vec{S}$$

$$\vec{S} = \vec{N} \cdot \cos(\theta) - \vec{L}$$

$$\vec{R} = 2 \cdot \vec{N} \cdot \cos(\theta) - \vec{L} = 2 \cdot \vec{N} \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) - \vec{L}$$



- Coeficiente de concentración del brillo:



Modelo de iluminación simple

Modelos de iluminación de Phong

► Características de la luz:

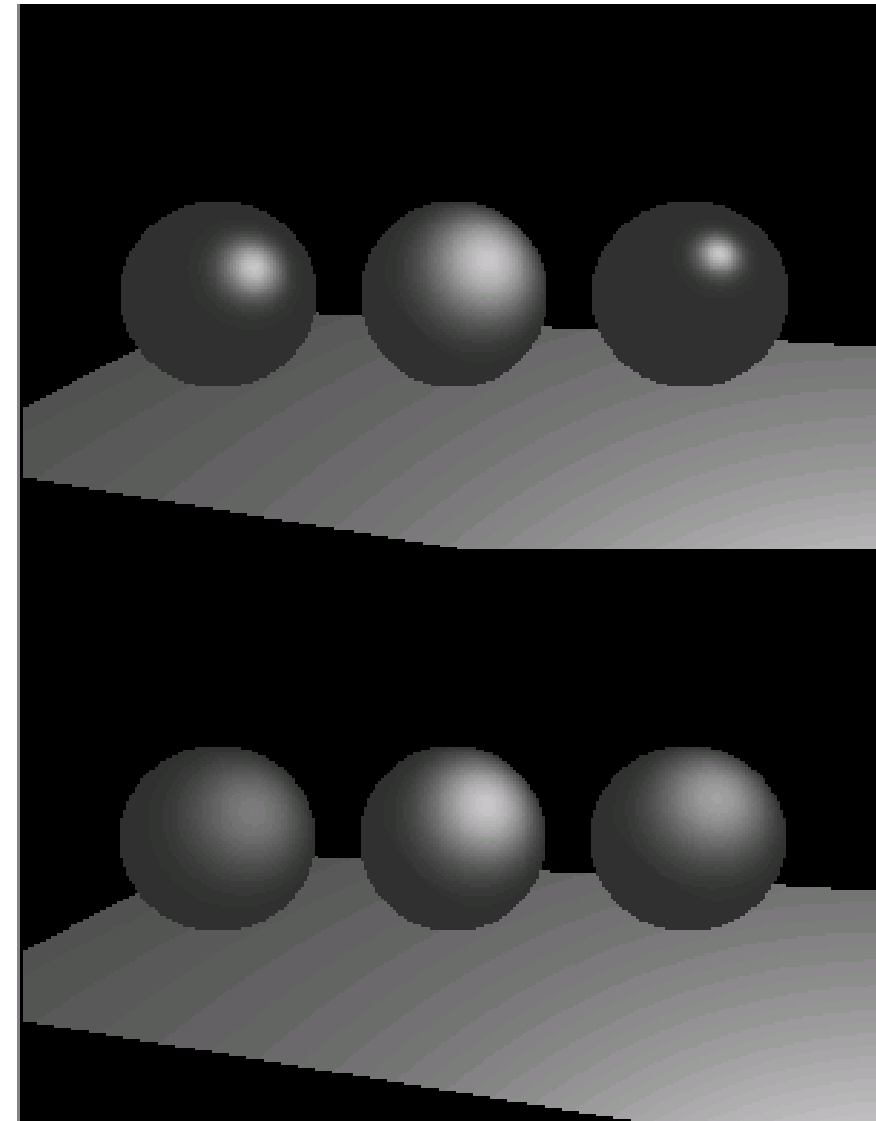
- $I_a = 0.5$
- $I_L = 0.8$
- $Pos = (2, 2, 2)$

○ Características del material:

	Color	K_a	K_s	n
Izq.	1	0.4	0.8	20
Cent.	1	0.4	0.8	5
Der.	1	0.4	0.8	40

○ Características del material:

	Color	K_a	K_s	n
Izq.	1	0.4	0.4	5
Cent.	1	0.4	0.8	5
Der.	1	0.4	0.6	5



Modelo de iluminación simple

Atenuación del foco

- ▶ PROBLEMA:
 - ▶ *Dos superficies a distinta distancia del foco son irradiadas con diferente intensidad*
- ▶ Esta diferenciación se introduce mediante un factor de atenuación, f_{at} , quedando la ecuación de la siguiente forma:

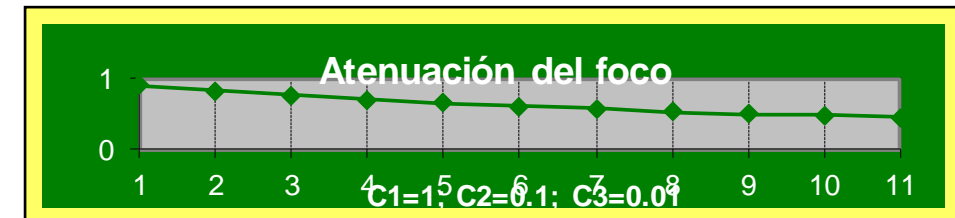
$$I = I_a \cdot k_a + f_{at} \cdot I_L \cdot \left(k_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) + k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^n \right)$$

en donde f_{at} tendrá la forma:

$$f_{at} = \min \left(\frac{1}{(c_1 + c_2 \cdot d_L + c_3 \cdot d_L^2)}, 1 \right)$$

en donde:

- ▶ c_1 , c_2 y c_3 son constantes empíricas
- ▶ d_L : es la distancia desde el punto a iluminar hasta el foco de luz



Modelo de iluminación simple

Atenuación atmosférica

- ▶ Debemos tener en cuenta la distancia de los objetos al observador (en una proyección canónica es su coordenada Z)
- ▶ Se pueden conseguir efectos de atmósfera interpolando entre una intensidad de fondo predefinida (I_B) y la intensidad calculada (I) utilizando 2 factores de escala, S_A y S_B . Dependiendo de la distancia al observador:

- ▶ $Z < Z_A$

- ▶ La atmósfera siempre ofrece la misma atenuación mínima: $S = S_A$

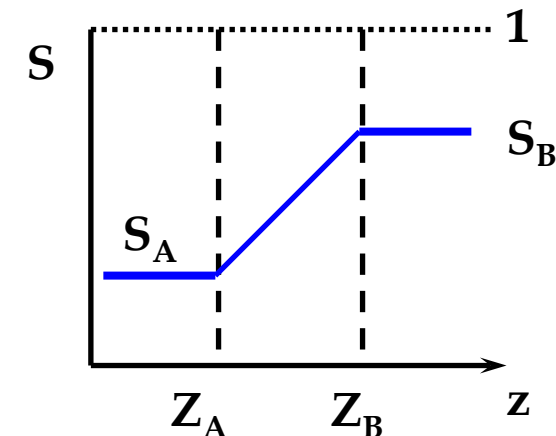
- ▶ $Z_A < Z < Z_B$

- ▶ Atenuación lineal con la distancia:

$$S = S_A + (Z - Z_A) \cdot (S_B - S_A) / (Z_B - Z_A)$$

- ▶ $Z > Z_B$

- ▶ Atenuación máxima constante: $S = S_B$

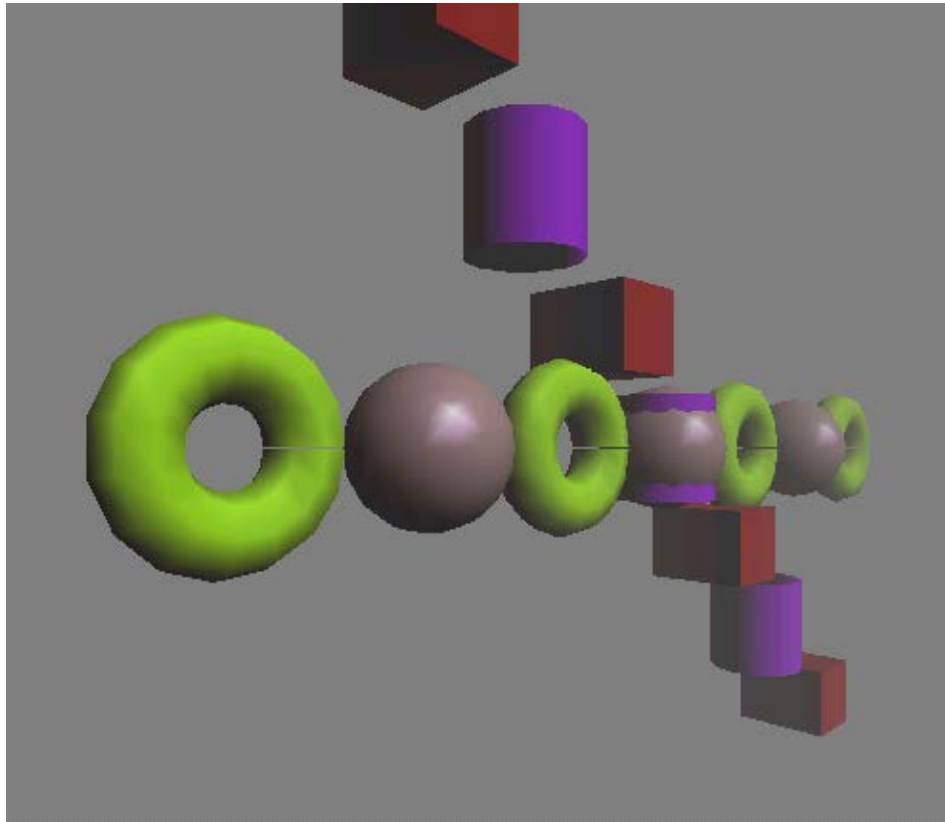


- ▶ Modelo con atenuación: $I' = (1 - S) \cdot I + S \cdot I_B$

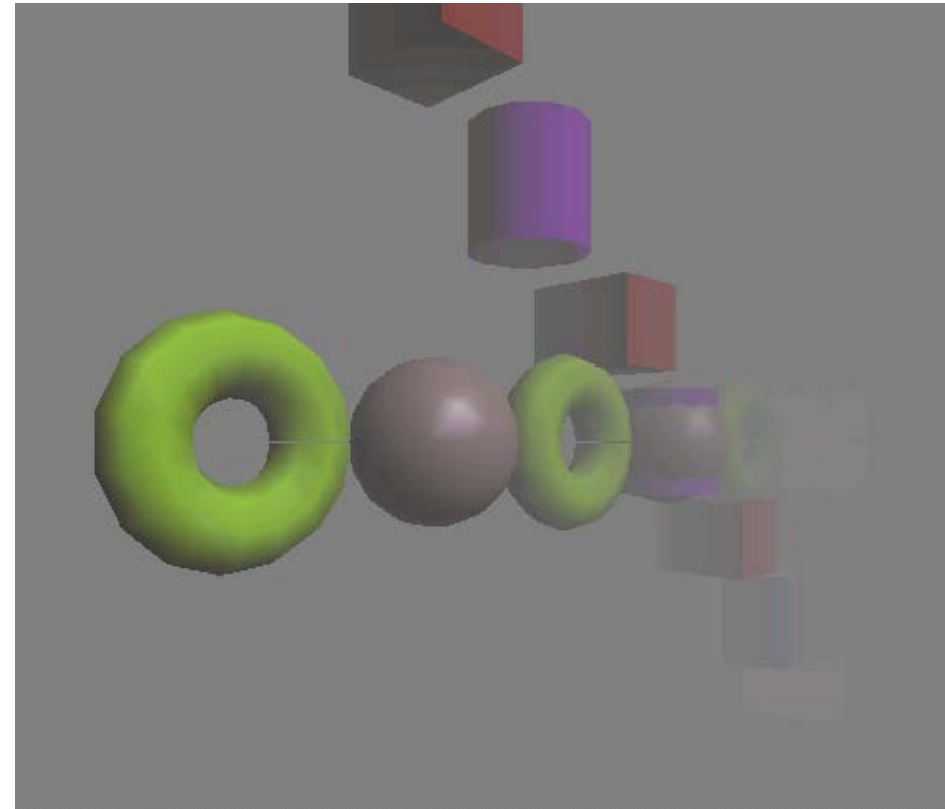
Modelo de iluminación simple

Atenuación atmosférica

SIN ATENUACIÓN



CON ATENUACIÓN



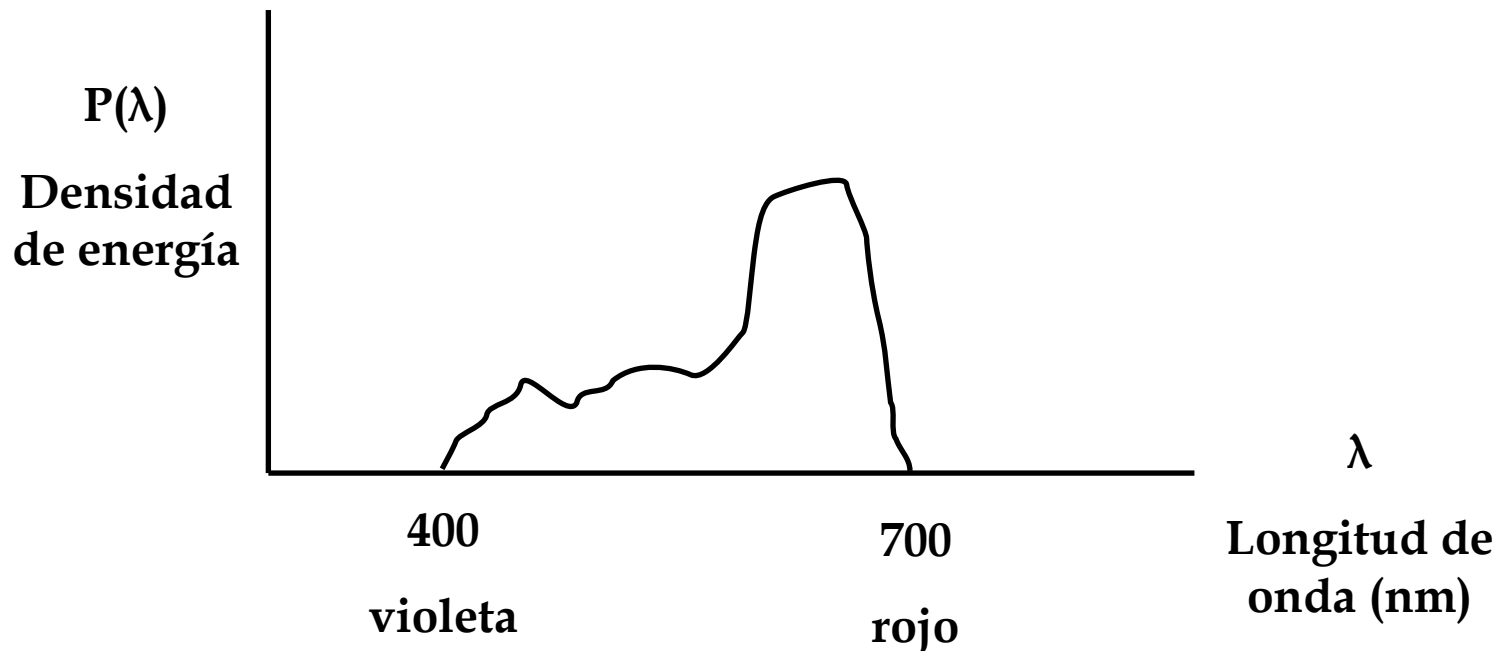
Modelo de iluminación simple

Polimedia

- ▶ En este Screencast de Polimedia se explica el modelo de Iluminación Simple y cómo se aplica en un problema práctico:
- ▶ <http://hdl.handle.net/10251/84015>

Color en luces y superficies

- ▶ Hasta ahora hemos asumido luces y superficies monocromáticas
- ▶ Debemos tener en cuenta la dependencia de los parámetros del modelo de iluminación con la longitud de onda de la luz (color).



Color en luces y superficies

- ▶ Parámetros dependientes del color:
 - ▶ Intensidades: Color espectral de las fuentes.

$$I(\lambda), I_L(\lambda), I_B(\lambda), I_a(\lambda)$$

- ▶ Coeficientes de reflexión: dependen del color de los objetos (O_d , O_s), o de las preferencias de absorción de determinadas longitudes de onda por el material.



Color en luces y superficies

- Modelo espectral:

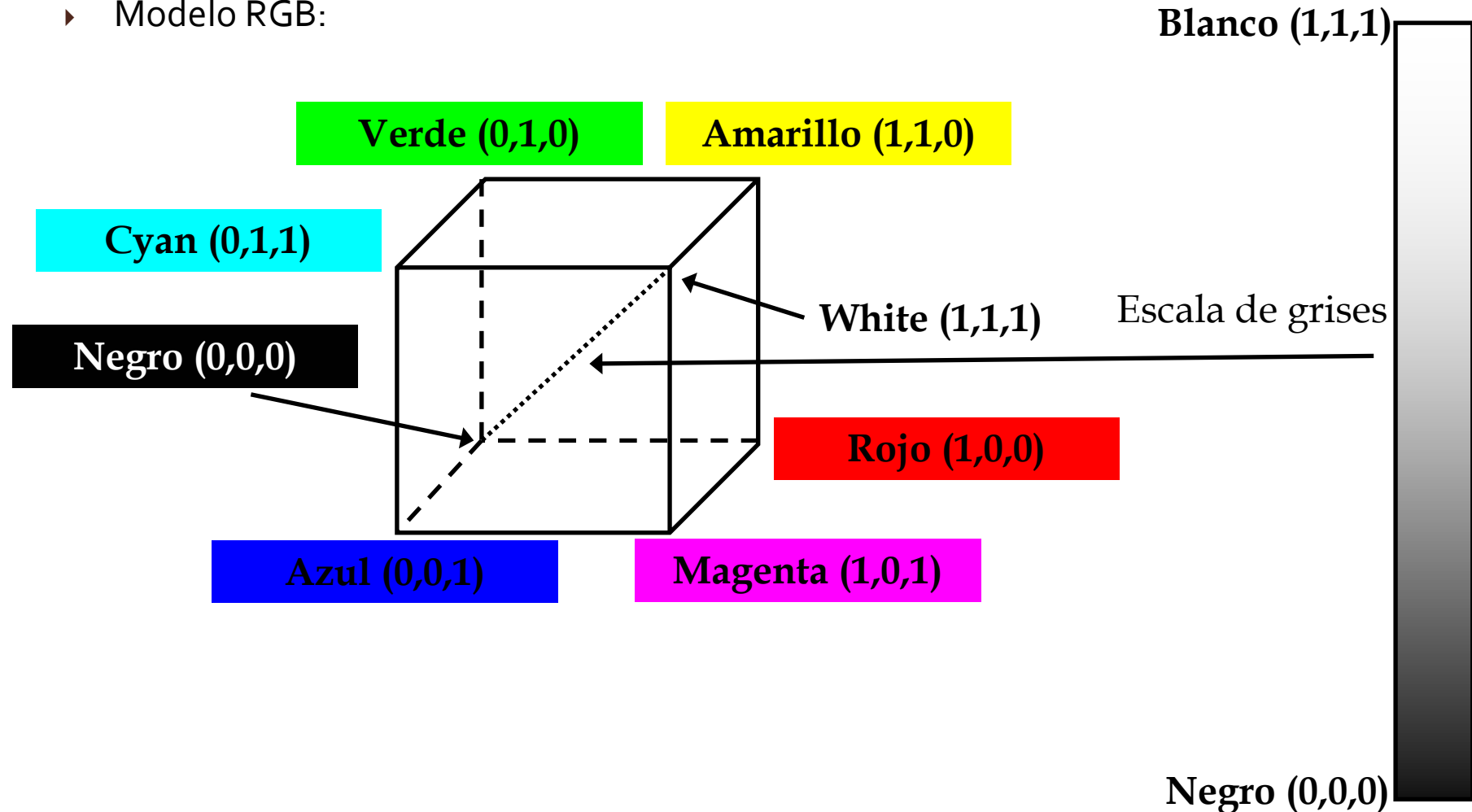
$$I(\lambda) = I_{a\lambda} \cdot K_a \cdot O_{d\lambda} + f_{att} \cdot I_{L\lambda} \cdot \left[K_d \cdot O_{d\lambda} \cdot (\bar{N} \cdot \bar{L}) + K_s \cdot O_{s\lambda} \cdot (\bar{R} \cdot \bar{V})^n \right]$$

- Discretización del espectro en tres componentes: R,G,B

$$\begin{aligned} I_R &= I_{aR} \cdot K_a \cdot O_{dR} + f_{att} \cdot I_{LR} \cdot \left[K_d \cdot O_{dR} \cdot (\bar{N} \cdot \bar{L}) + K_s \cdot O_{sR} \cdot (\bar{R} \cdot \bar{V})^n \right] \\ I_G &= I_{aG} \cdot K_a \cdot O_{dG} + f_{att} \cdot I_{LG} \cdot \left[K_d \cdot O_{dG} \cdot (\bar{N} \cdot \bar{L}) + K_s \cdot O_{sG} \cdot (\bar{R} \cdot \bar{V})^n \right] \\ I_B &= I_{aB} \cdot K_a \cdot O_{dB} + f_{att} \cdot I_{LB} \cdot \left[K_d \cdot O_{dB} \cdot (\bar{N} \cdot \bar{L}) + K_s \cdot O_{sB} \cdot (\bar{R} \cdot \bar{V})^n \right] \end{aligned}$$

Color en luces y superficies

- Modelo RGB:



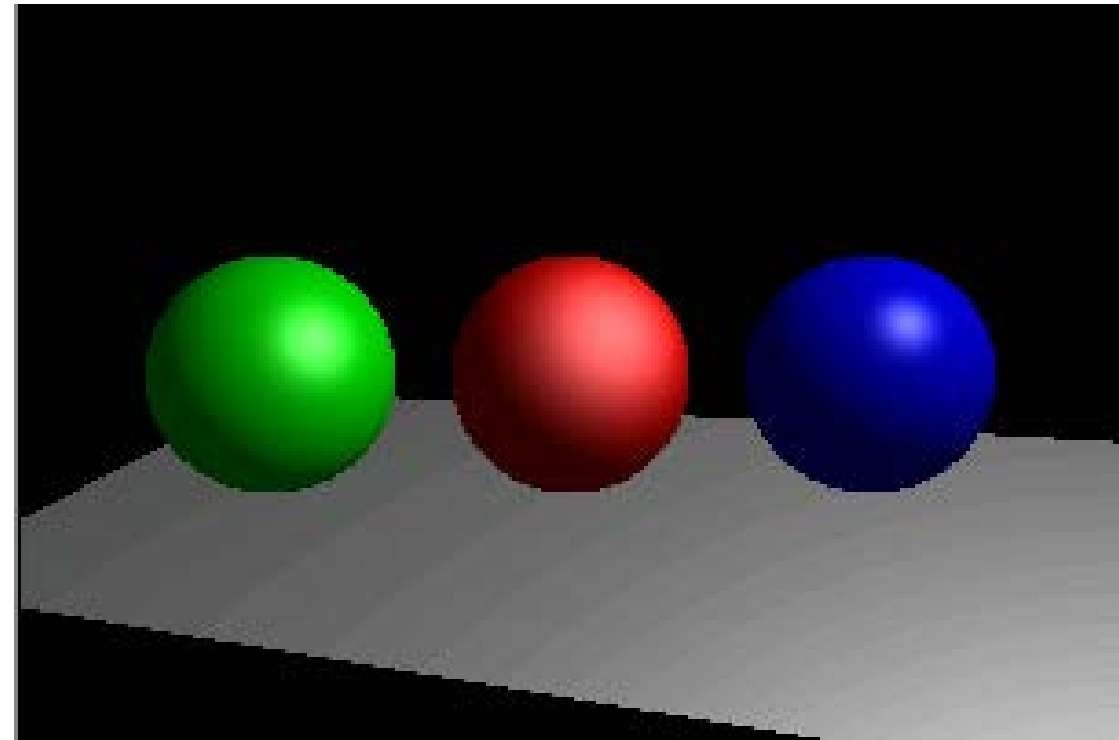
Color en luces y superficies

► Características de la luz:

- $I_a = (0.5, 0.5, 0.5)$
- $I_L = (0.8, 0.8, 0.8)$
- $Pos = (2, 2, 2)$

○ Características del material:

	Od	Os	Ka	Kd	Ks	n
Izq.	0,1,0	1,1,1	0.4	0.8	0.7	20
Cent.	1,0,0	1,1,1	0.4	0.8	0.7	5
Der.	0,0,1	1,1,1	0.4	0.8	0.7	40



Múltiples fuentes de luz

- ▶ Si hay m fuentes de luz, entonces las aportaciones de cada fuente de luz se suman:

$$I = \text{Intensidad Ambiente} + \sum_{i=1}^m (\text{Intensidad Difusa}_i + \text{Intensidad Especular}_i)$$

$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} \cdot k_a \cdot O_{d\lambda} + \sum_{i=1}^m f_{at_i} \cdot I_{L_i\lambda} \cdot (k_d \cdot O_{d\lambda} \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}_i) + k_s \cdot O_{s\lambda} \cdot (\vec{R}_i \cdot \vec{V})^n)$$

donde: $\lambda = R, G, B$ es el color o longitud de onda

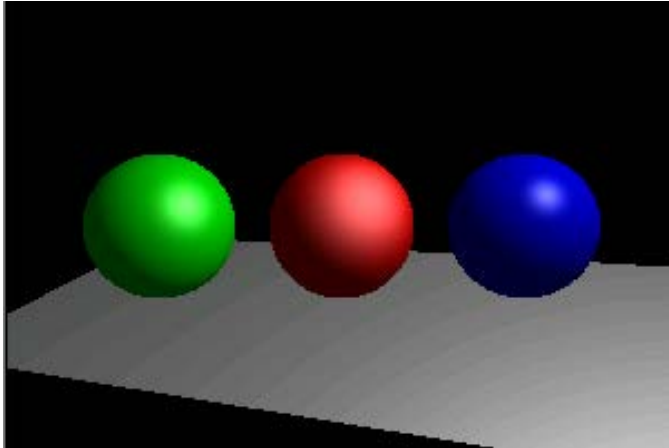
PROBLEMA: Puede suceder que alguna de las componentes R, G, B se sature por encima de 1 (valor máximo del dispositivo).

SOLUCIONES:

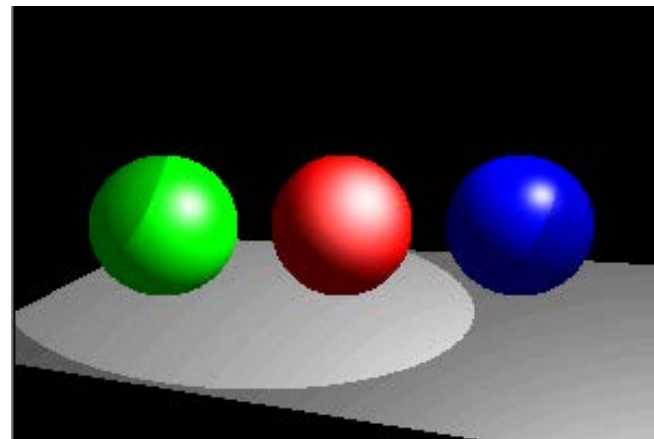
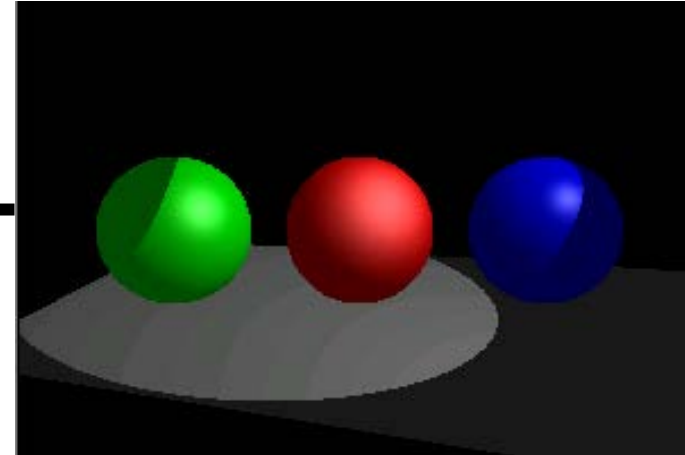
- ▶ Truncar el valor de I respecto al máximo.
- ▶ Calcular la imagen en su totalidad y normalizar las intensidades para que queden comprendidas en el intervalo[0..1].

Múltiples fuentes de luz

LUZ PUNTUAL



LUZ FOCAL



LUZ PUNTUAL

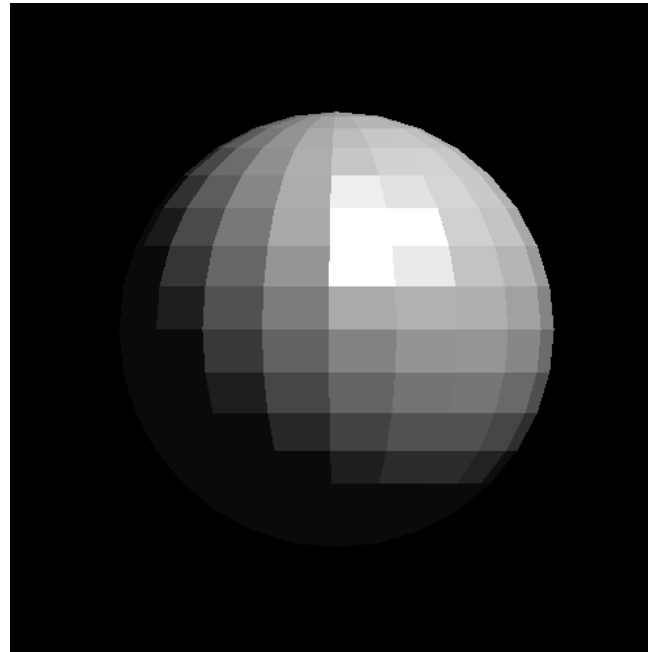
+

LUZ FOCAL

Modelos de sombreado

Sombreado constante

- ▶ Cada polígono se sombrea con un color
 - ▶ Fuente de luz en el infinito
 - ▶ P. de Vista en el infinito
- ▶ Si alguna de las dos no se cumple: hay que calcular \vec{L} y/o \vec{V} para cada polígono

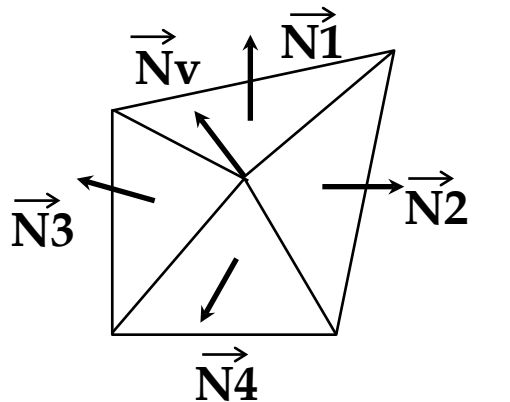


Modelos de sombreado

Sombreado de Gouraud

► Pasos

1. Calcular las normales para cada polígono
2. Calcular las normales para cada vértice
3. Interpolarse la intensidad para cada vértice
4. Sombrear el polígono (p. ej. Utilizando Scan-Line)



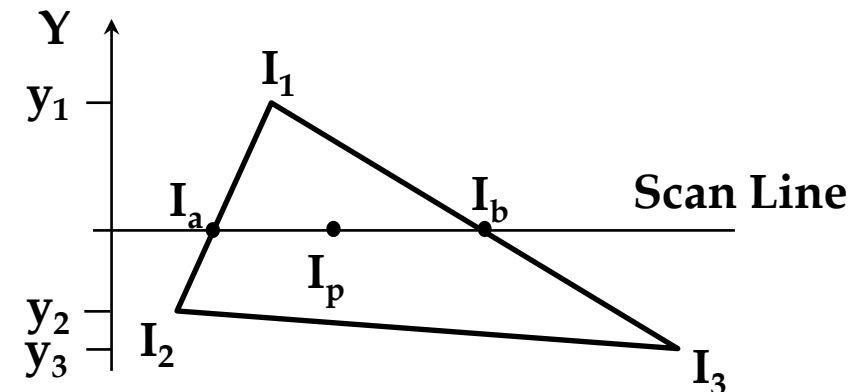
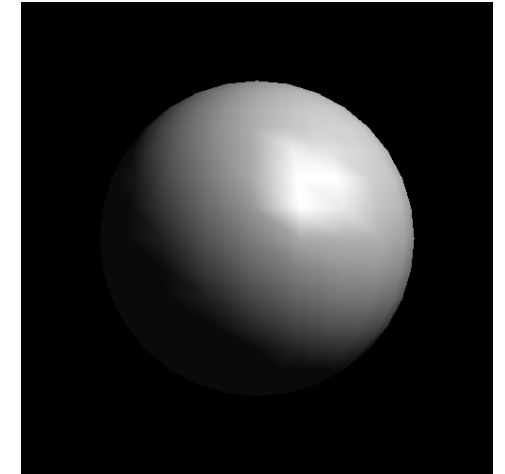
$$\vec{Nv} = (\vec{N1} + \vec{N2} + \vec{N3} + \vec{N4})$$

$$\vec{Nv} = \vec{Nv} / |\vec{Nv}|$$

$$I_a \rightarrow I_1, I_2$$

$$I_b \rightarrow I_1, I_3$$

$$I_p \rightarrow I_a, I_b$$

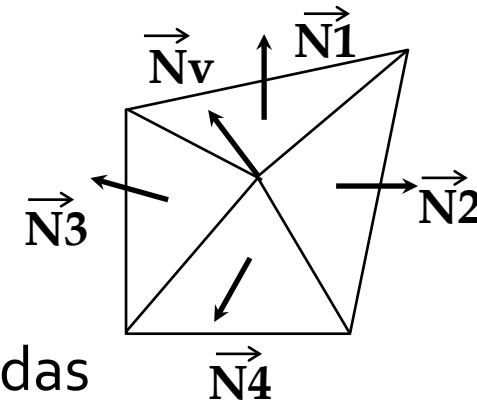


Modelos de sombreado

Sombreado de Phong

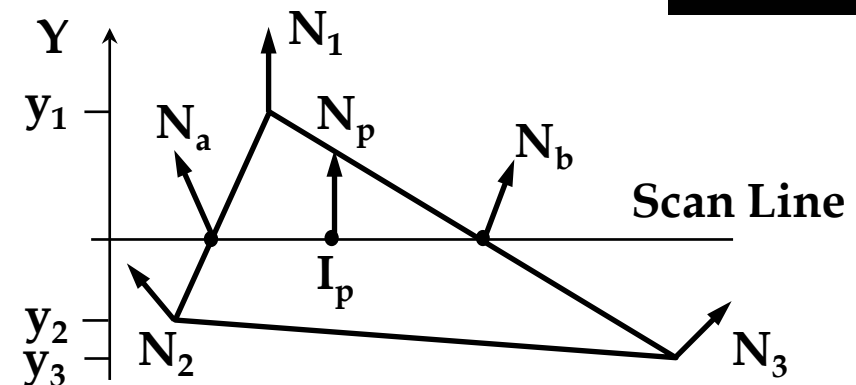
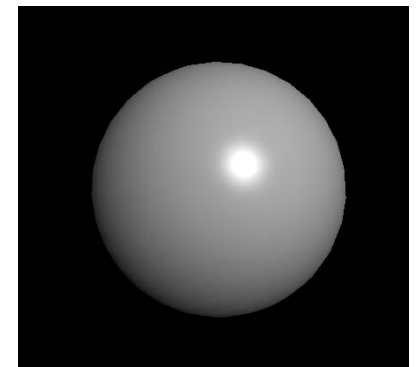
► Pasos

1. Calcular las normales para cada polígono
2. Calcular las normales para cada vértice
3. Interpolarse las normales para cada píxel
4. Sombrear cada píxel con las normales interpoladas



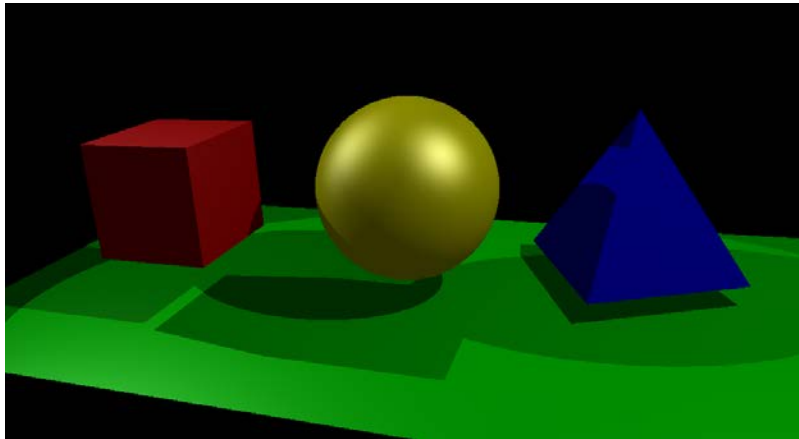
► Características

- Interpola normales
- Recalcula I para cada píxel
- Es apropiado para reflexión especular
- Evita las bandas de Mach

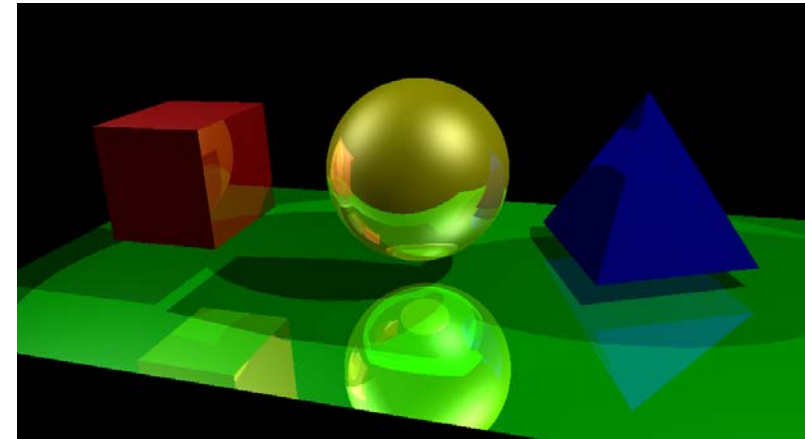


Modelos Avanzados

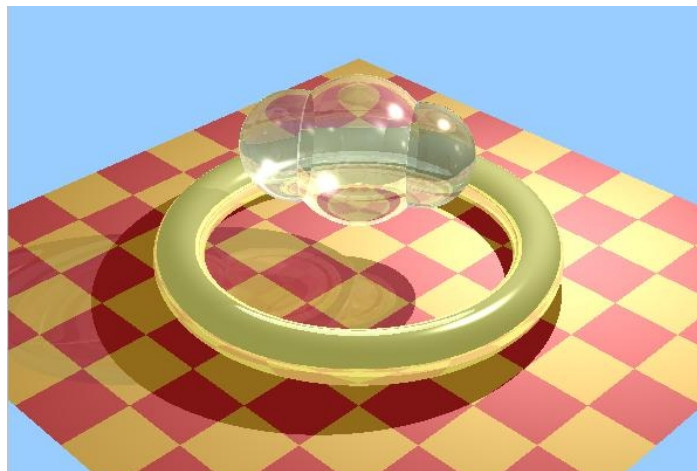
SOMBRA ARROJADAS



INTERREFLEXIÓN



TRANSPARENCIA



TEXTURAS

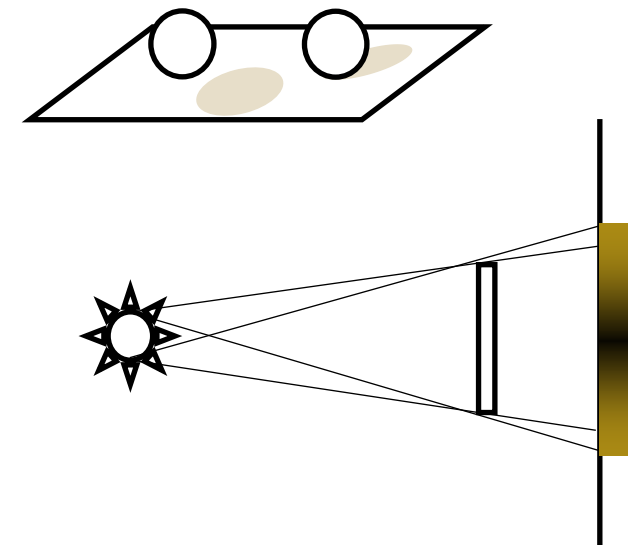


Modelos Avanzados: Sombras

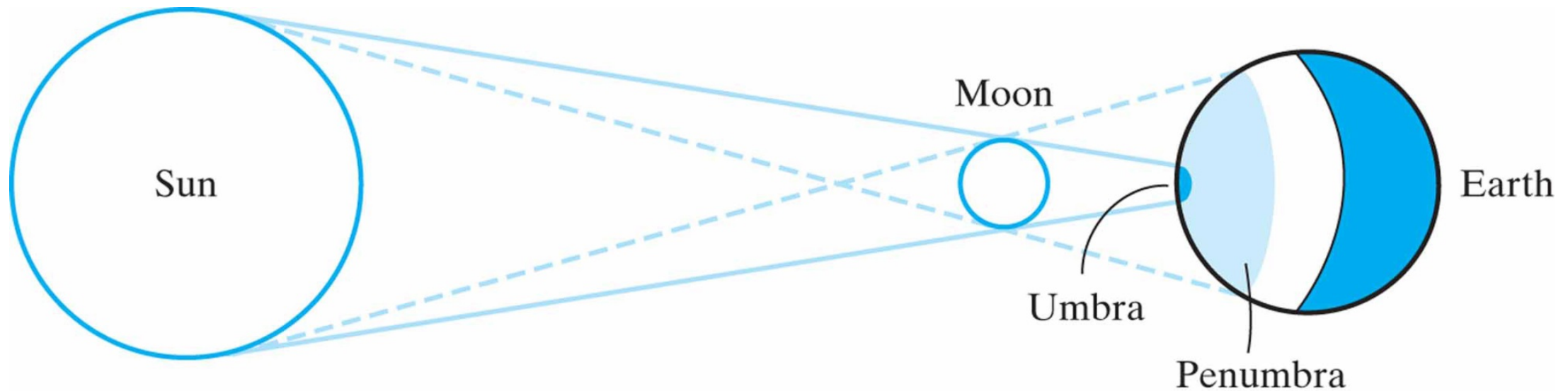
- ▶ Problema: ¿Es visible la luz desde el punto donde estoy calculando la iluminación?
- ▶ Funciones que cumple
 - ▶ Ayudar a entender la situación de un objeto en relación con otro
 - ▶ Enfatizar el cambio en la dirección de la luz
- ▶ Efectos a tener en cuenta
 - ▶ Forma, tamaño y distancia de la fuente
 - ▶ Umbría y penumbra
 - ▶ Iluminación global



Fuente: Ravi Ramamoorthi (UCB)



Modelos Avanzados: Sombras



Copyright ©2011 Pearson Education, publishing as Prentice Hall

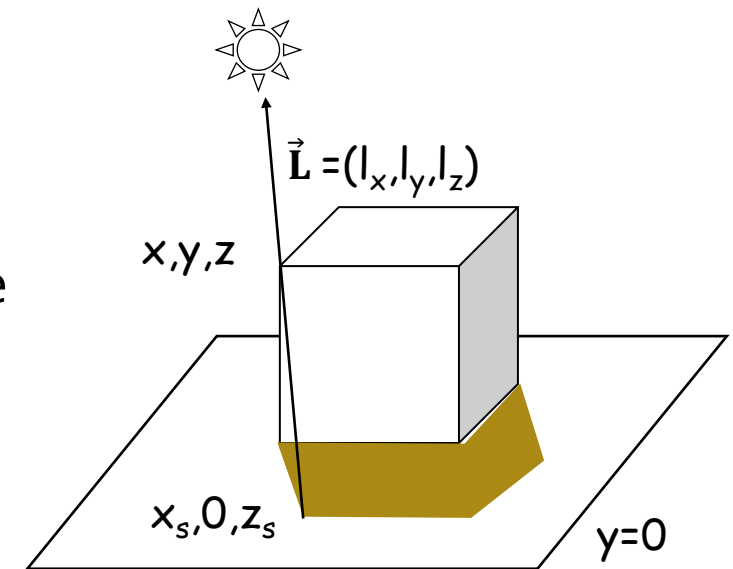
Modelos Avanzados: Sombras

- ▶ Sombras en síntesis de imagen
 - ▶ Aplicaciones interactivas: Iluminación local con aprovechamiento de la coherencia
 - ▶ Imágenes fotorrealistas: Iluminación global
- ▶ Fuentes puntuales en escenas poligonales
 - ▶ Si A y B son dos polígonos, la sombra de A sobre B debida al foco F coincide con la proyección de A con centro de proyección F y plano de proyección B (**problema de visibilidad**)
 - ▶ Ninguna sombra es vista si el observador y el foco puntual coinciden
 - ▶ Si las fuentes son puntuales no hay penumbra
- ▶ Efectos prácticos
 - ▶ Las sombras son independientes del punto de vista
 - ▶ Modificar el modelo de iluminación local con un factor de bloqueo

Modelos Avanzados: Sombras

Sombras sobre planos

- ▶ Producción sencilla de sombras sobre un plano
 - ▶ Premisas
 - ▶ Modelo poligonal
 - ▶ Sombras sobre el suelo o paredes
 - ▶ Objetos aislados
 - ▶ Luz direccional
 - ▶ Método
 - ▶ Calcular la proyección de cada polígono sobre el plano desde la fuente
 - ▶ Generar un polígono de sombra por cada proyección
 - ▶ Introducir los polígonos de sombra en el Z-Buffer
 - ▶ Procesar el resto de polígonos. A igual z, mantener el Z-buffer
 - ▶ Método alternativo
 - ▶ Generar una textura para el suelo con las proyecciones (shadow map)

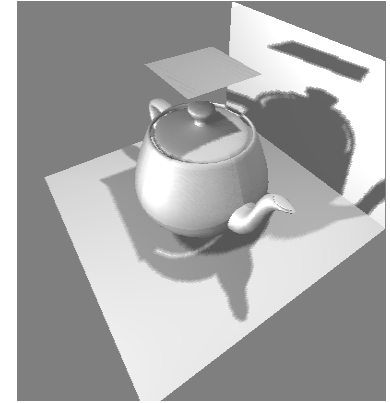


Modelos Avanzados: Sombras

Z-Buffer de dos pasos

► Proceso

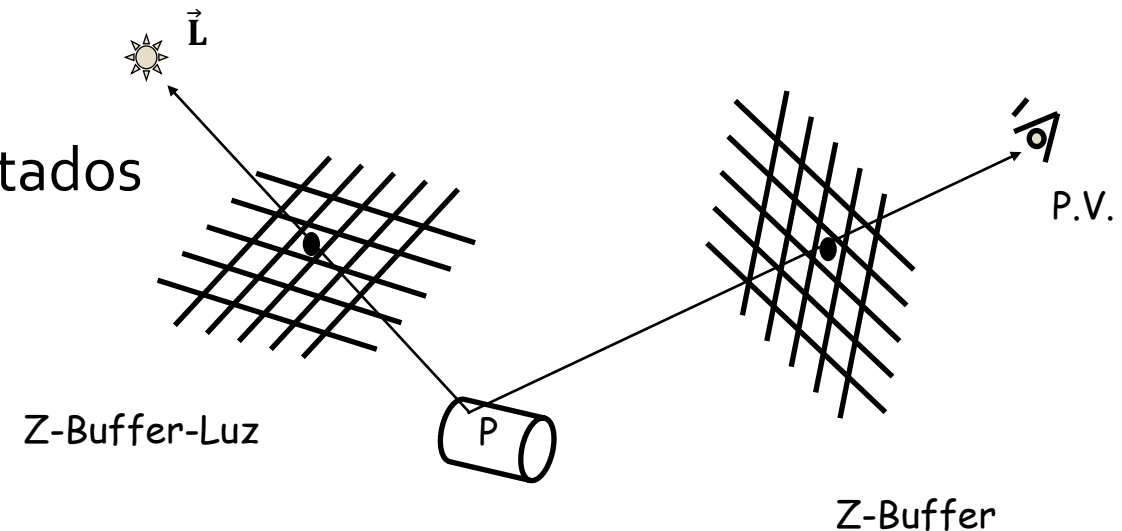
- Calcular el Z-Buffer-Luz desde \vec{L}
- Aplica Z-Buffer modificando:
 - Transformar P del sistema de la vista al sistema de la fuente
 - Comparar la z de P en el nuevo sistema con la almacenada en el Z-Buffer-Luz
 - Si la |z| es mayor que la almacenada, el punto está en sombra



Fuente: Chris Bentley (WPI)

► Inconvenientes

- Memoria
- Cálculos innecesarios sobre píxeles repintados
- Aliasing espacial
- Aliasing numérico



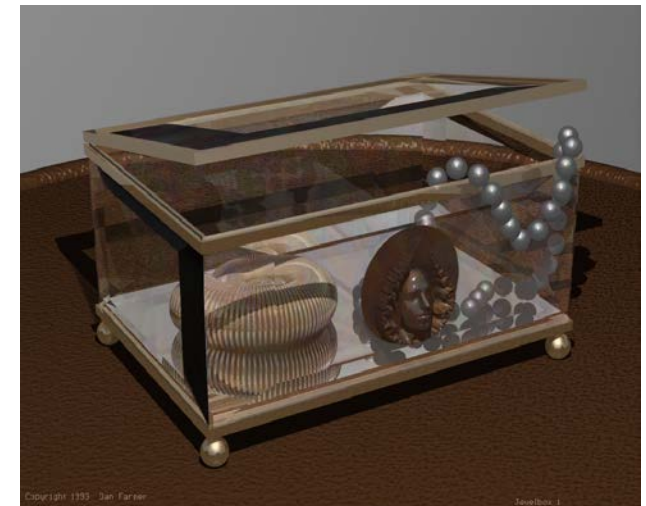
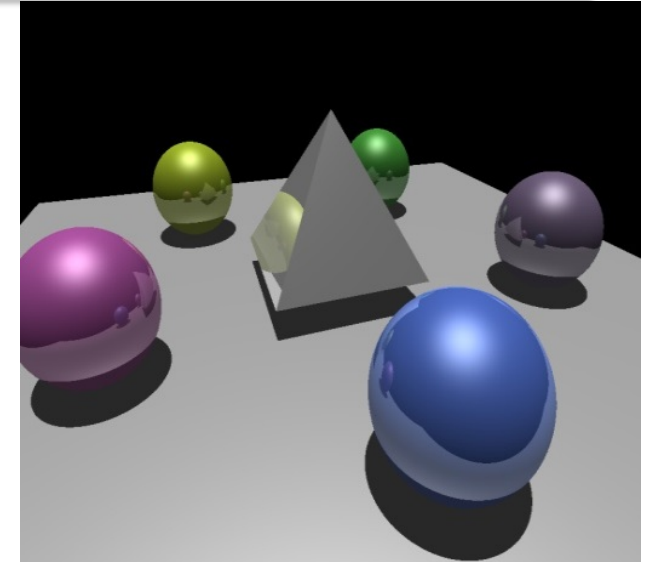
Modelos Avanzados: Sombras

- ▶ Las sombras son necesarias para dar sensación de realismo
- ▶ Su cálculo aumenta el tiempo de render sensiblemente
- ▶ La sombra no depende de la posición del observador
- ▶ En aplicaciones interactivas (e.g. videojuegos)
 - ▶ Los objetos estáticos producen sombras fijas (si la luz no cambia de posición). Usar mapas de sombras como texturas precalculadas
 - ▶ Aprovechar el render sobre textura para crear mapas de profundidad desde la luz (z-buffer de dos pasos)



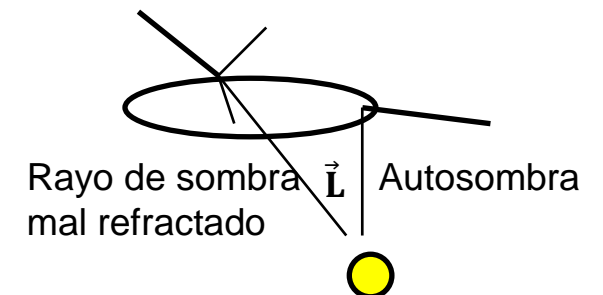
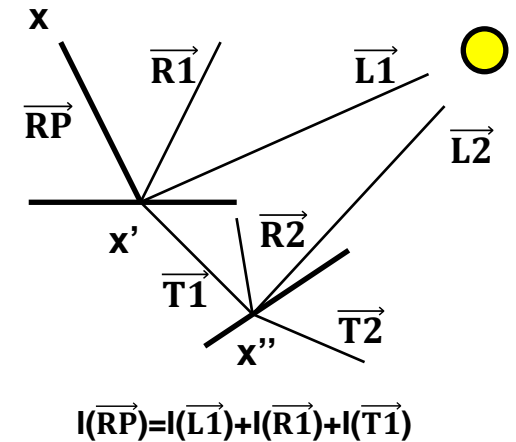
Modelos Avanzados: Trazado de rayos

- ▶ La luz se considera compuesta de partículas que viajan en línea recta cambiando de dirección en la superficie de los objetos.
- ▶ Trazado:
 - ▶ Hacia adelante: Trazado desde las fuentes de luz.
 - ▶ Hacia atrás: Trazado desde el observador.
- ▶ Combinación espacio objeto-imagen.
 - ▶ Discretización del plano de proyecciones (rayo-pixel)
 - ▶ Cálculo de intersecciones en espacio del objeto
- ▶ Solución primaria: Cálculo de Visibilidad
 - ▶ Cálculo de intersección rayo-objeto + selección del más cercano
 - ▶ Problemas y soluciones:
 - ▶ Cálculo de la intersección: Uso de superficies implícitas $f(x,y,z)=0$
 - ▶ Alto número de intersecciones: Uso de coherencia para aceleración

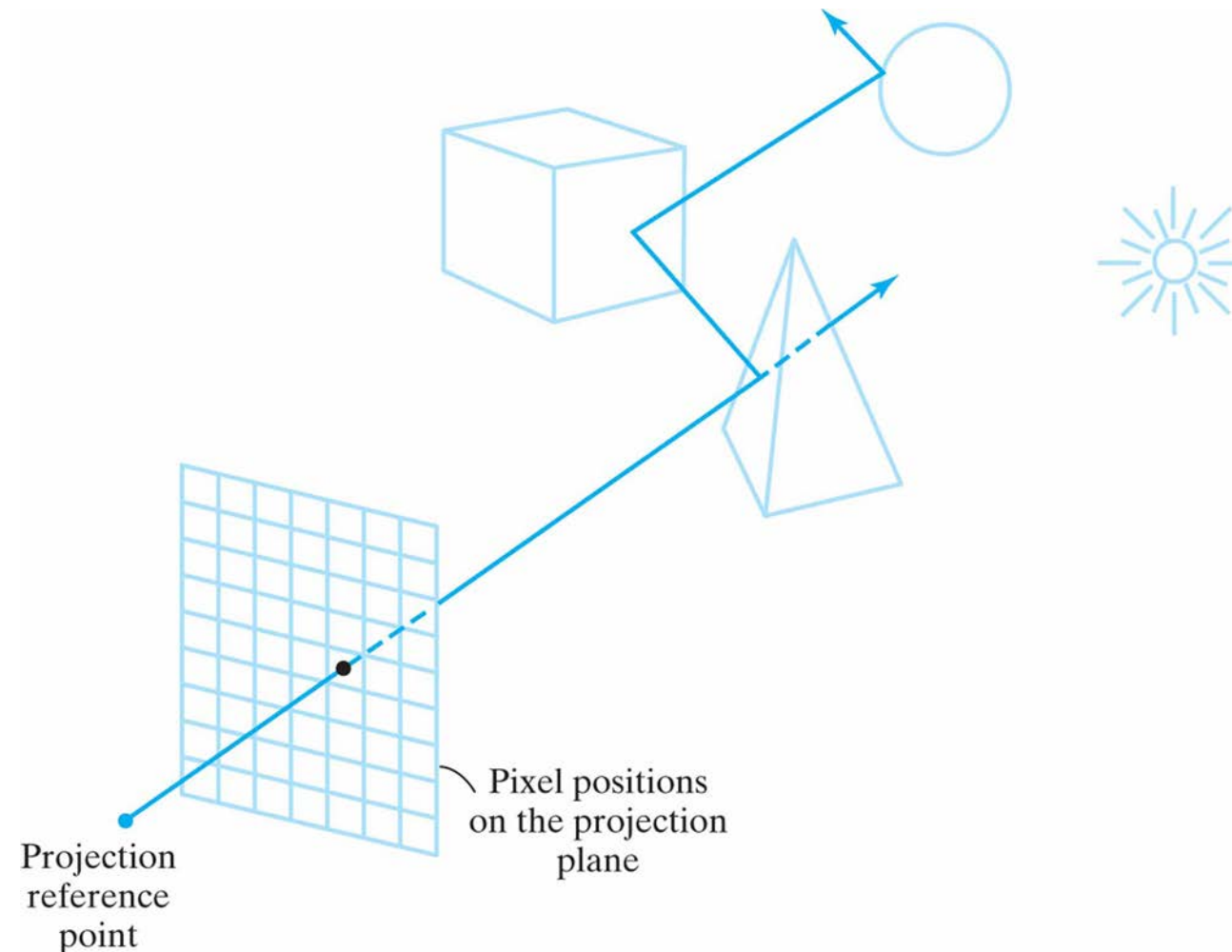


Modelos Avanzados: Trazado de rayos

- ▶ Clases de rayos
 - ▶ Primarios: PV-pixel $P(t)=PV+(pixel-PV)*t$
 - ▶ Secundarios:
 - ▶ Rayos de sombra: dirección \vec{L}
 - ▶ Rayos reflexivos : dirección \vec{R}
 - ▶ Rayos refractivos: dirección \vec{T}
- ▶ Algoritmo de Whitted
 - ▶ Árbol de rayos recursivos
 - ▶ Profundidad 1, sólo rayos primarios y sombra
 - ▶ Condiciones de parada
 - ▶ rayos perdidos: color de entorno, fondo o ambiente
 - ▶ limitación constante: profundidad máxima o saturación de recursos
 - ▶ adaptativa: limitación de la valoración de la contribución de un rayo sobre el primario
- ▶ Problemas
 - ▶ Refracción: rayos de sombra
 - ▶ Precisión numérica: problema de auto sombra
 - ▶ Elevado número de intersecciones por pixel
 - ▶ Rayos Primario, \vec{R} y $\vec{T} = 2^{n-1}$; árbol binario de profundidad n
 - ▶ Rayos de sombra = $m \cdot 2^{n-1}$; m= número de luces
 - ▶ Imposibilidad de eliminación de caras traseras

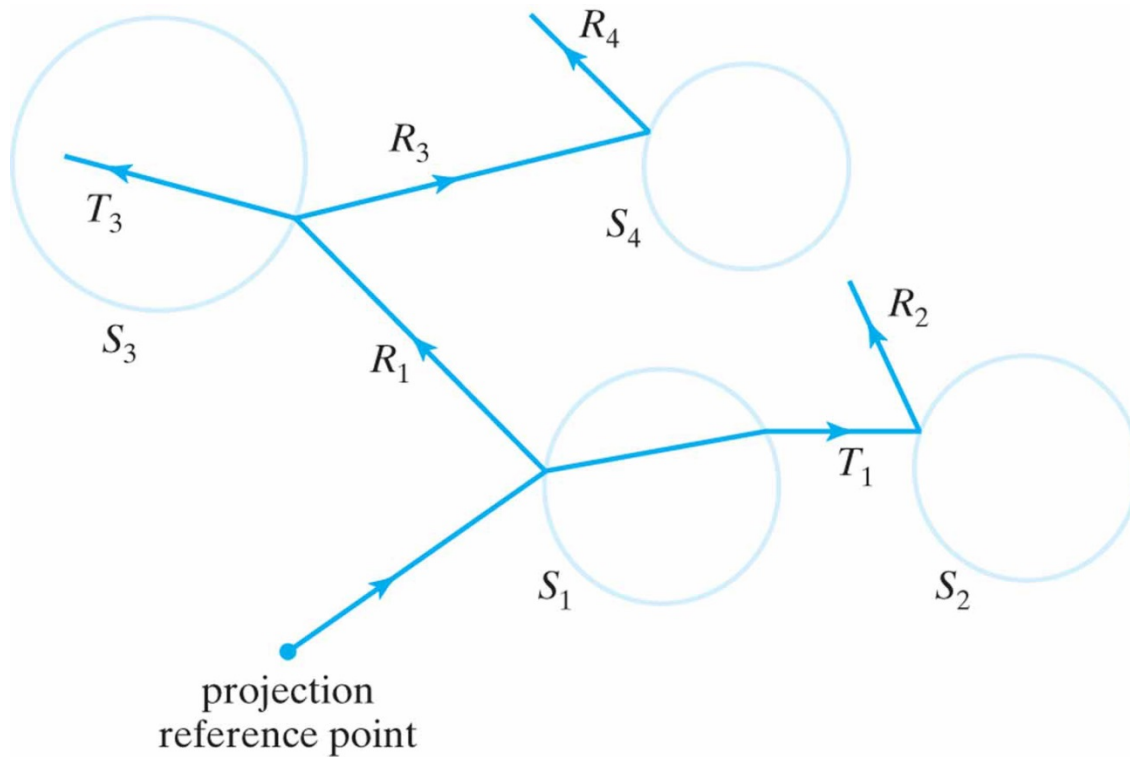


Modelos Avanzados: Trazado de rayos

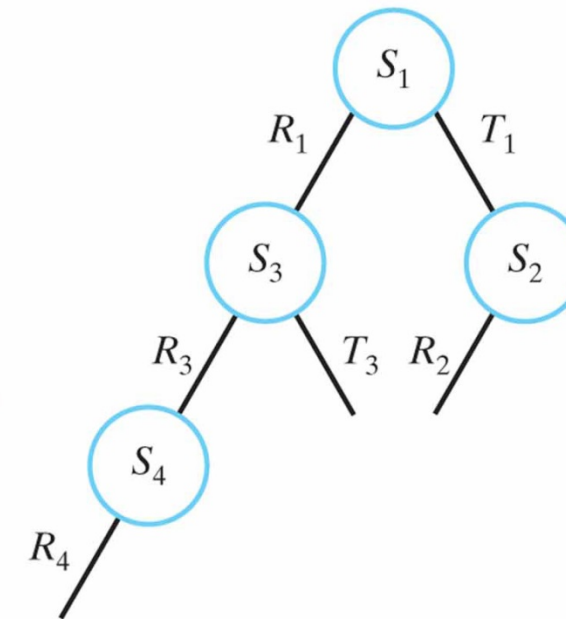


Copyright ©2011 Pearson Education, publishing as Prentice Hall

Modelos Avanzados: Trazado de rayos



(a)



(b)

Copyright © 2011 Pearson Education, publishing as Prentice Hall

Modelos Avanzados: Trazado de rayos

```

para cada pixel
  color. = AR_Trazar(rayoPrimario, 1)
  Poner_pixel(pixel, color)
fin
  
```

```

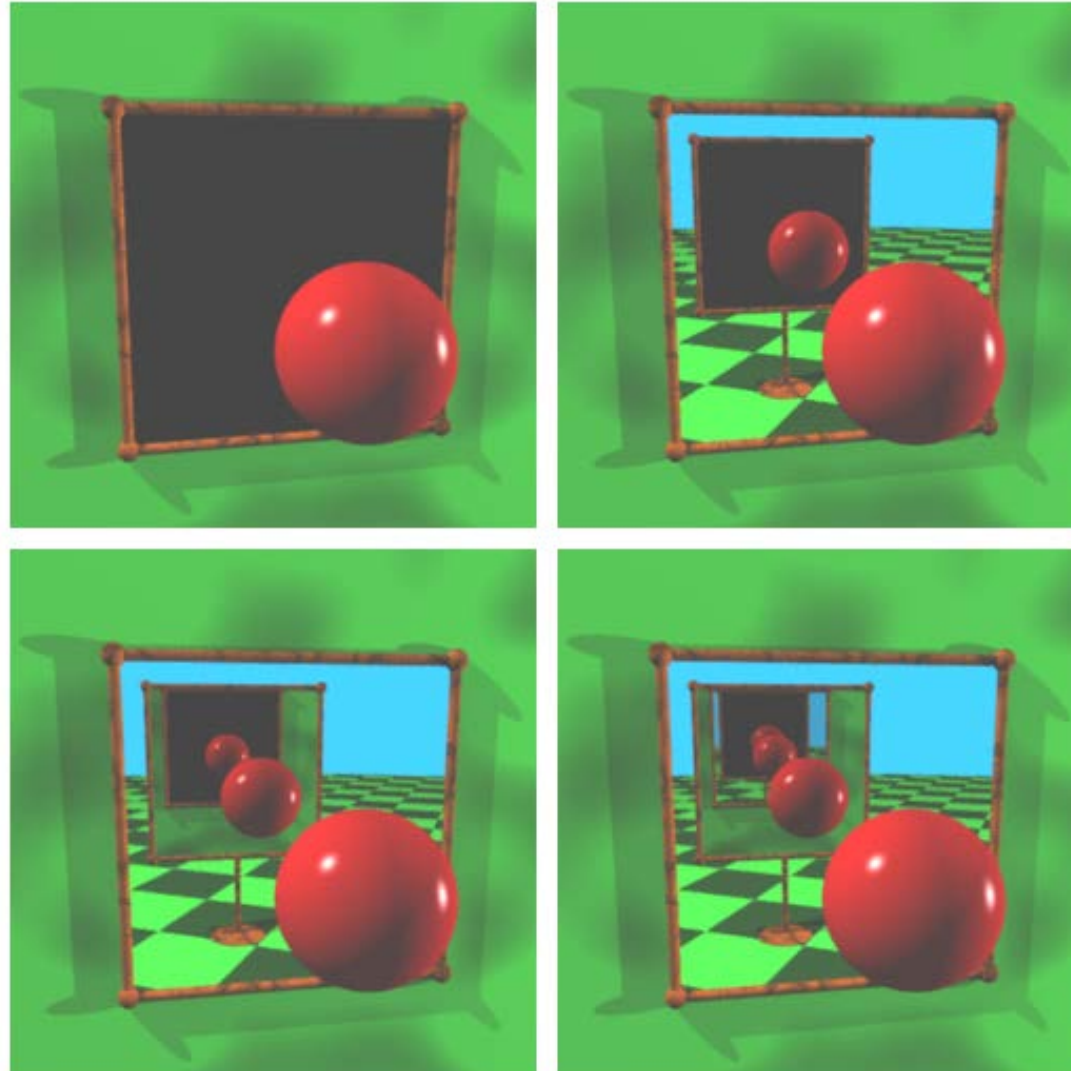
Color AR_Trazar(Rayo r, Profundidad d)
  determinar intersección con objeto más cercano
  si existe
    calcular la normal
    devolver AR_Color(objeto, r,
                      intersección, normal, d)
  sino
    devolver color del fondo
  fin
  
```

Color AR_Color (Objeto *o*, Rayo *r*, Punto *p*, Normal *N*, Profundidad *d*)

```

color. = ambiental
para cada luz
  L. = rayo desde p a la luz
  si  $(L \cdot N) > 0$ 
    color. = color + intensidad debida a esa luz
  si d < máxima
    si o es reflexivo
      R. = rayo de reflexión
      color_R. = AR_Trazar(R, d+1)
      color. = color + color_R * Ks(o)
    si o es transmisor
      T. = rayo de refracción
      si no hay reflexión interna total
        color_T. = AR_Trazar(T, d+1)
        color. = color + color_T * Kt(o)
  devolver color
fin
  
```

Modelos Avanzados: Trazado de rayos

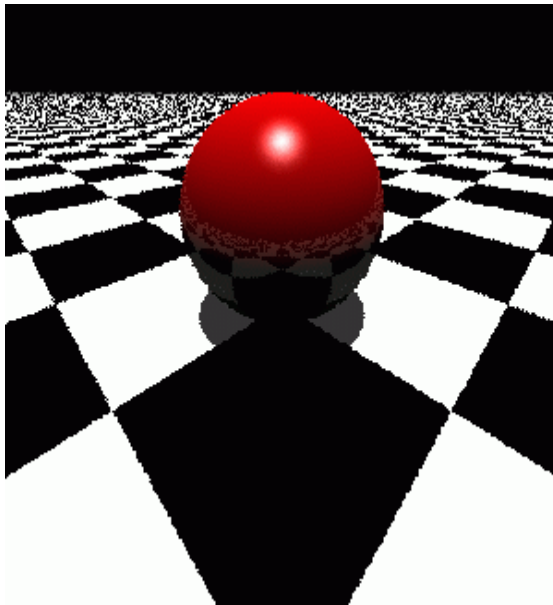


Modelos Avanzados: Trazado de rayos

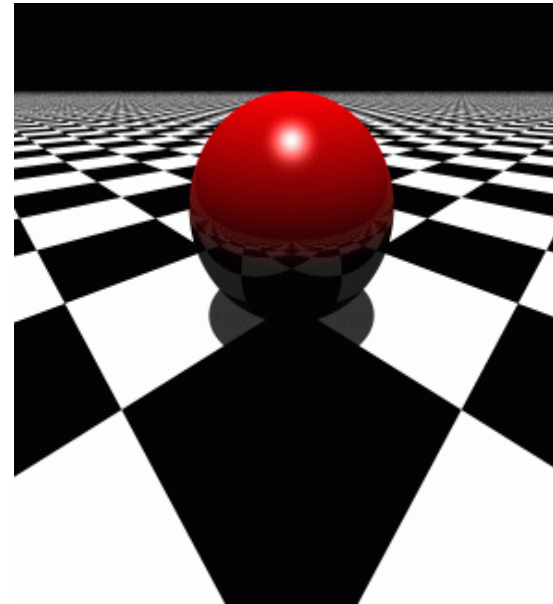
- ▶ Eficiencia: Cuello de botella del trazado de rayos
 - ▶ Cálculo en 3D de la intersección de un rayo (recta) con una primitiva geométrica
 - ▶ Primitivas: Cualquiera que ofrezca un método de cálculo de la intersección con una recta.
 - ▶ Trazado de rayos exhaustivo: Cálculo, uno a uno, de la intersección de cada rayo con cada uno de los objetos primitivos. Lineal con el número de objetos.

Modelos Avanzados: Trazado de rayos

- ▶ Problema del “aliasing”: 1 rayo (1 muestra) por pixel
- ▶ Solución: Multimuestreo (más de un rayo por pixel)



1 muestra / pixel



100 muestras / pixel

Bibliografía

- ▶ D. Hearn, M. Baker. Computer Graphics with OpenGL. Pearson Prentice Hall, 4ª edición.
 - ▶ Capítulos 17 y 21