

# Computación Gráfica

Eduardo Fernández

# Iluminación y Sombreado

Basado en: **Capítulo 14**

Del Libro: **Introducción a la Graficación  
por Computador**

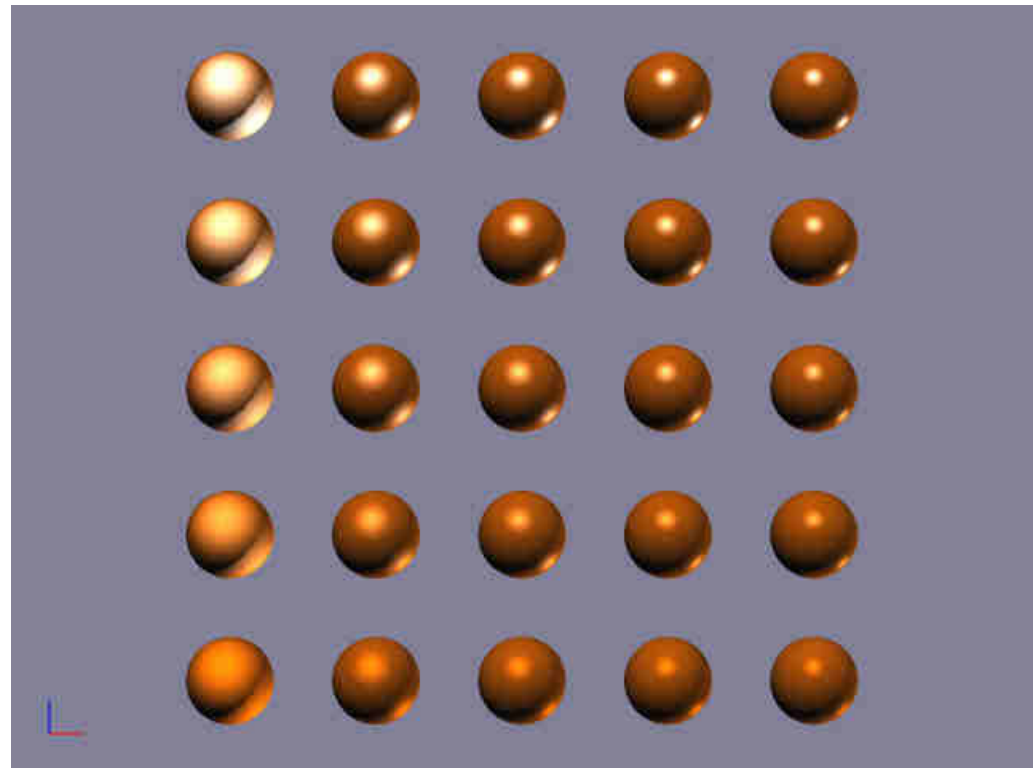
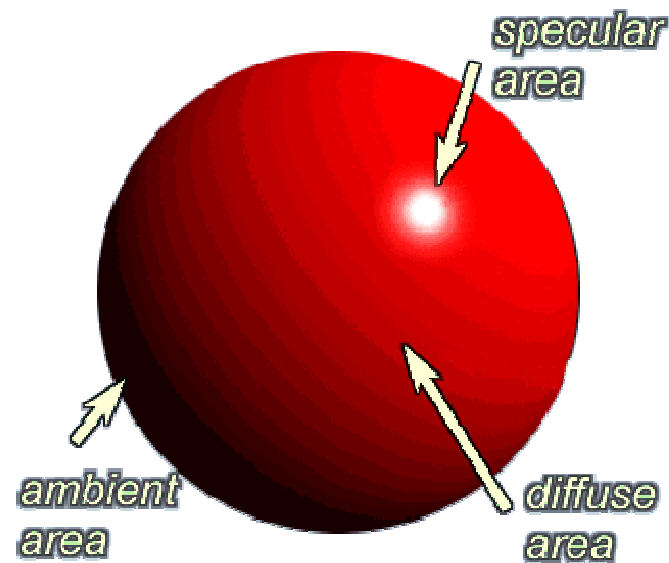
*Foley – Van Dam – Feiner – Hughes - Phillips*

# Resumen del capítulo

- Modelos simples de iluminación.
- Modelos de sombreado más comunes.
- Modelos de sombreado aplicados a texturas.
- Efectos de transparencia, refracción, reflexión, sombras.

# Modelo de iluminación simple

Sólo influyen la superficie en cuestión, las luces y la posición del observador (cálculos simples).



# Modelos de iluminación complejos

Las sombras, las interreflexiones y la difusión de la luz en otros medios se calculan por otros algoritmos (implican cálculos complejos).



# Modelo de iluminación simple

Pero igualmente, con un modelo de iluminación simple + trucos se puede dar “ilusión” de realismo.



# Ecuación de Iluminación

**Luz reflejada por un objeto en un punto de su superficie hacia una dirección particular (radiancia: (W/sr·m<sup>2</sup>)).**

$$I_{(\text{intensidad})} = \text{LUZ}_{\text{ambiental}} + \text{LUZ}_{\text{difusa}} + \text{LUZ}_{\text{especular}}$$

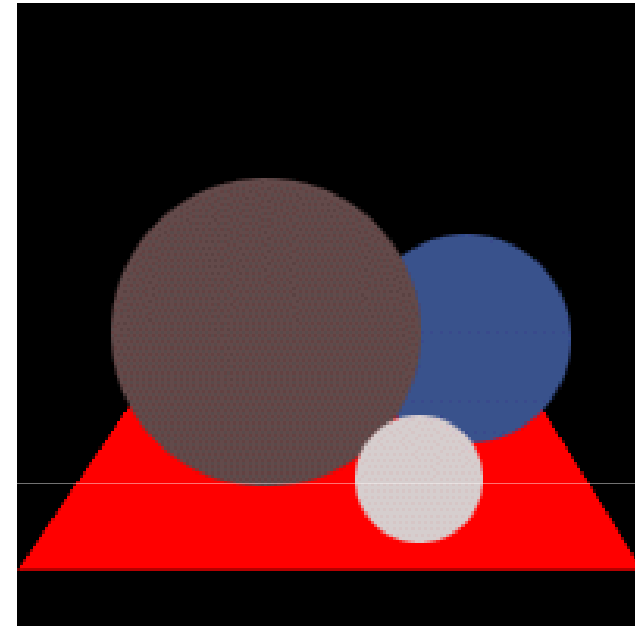
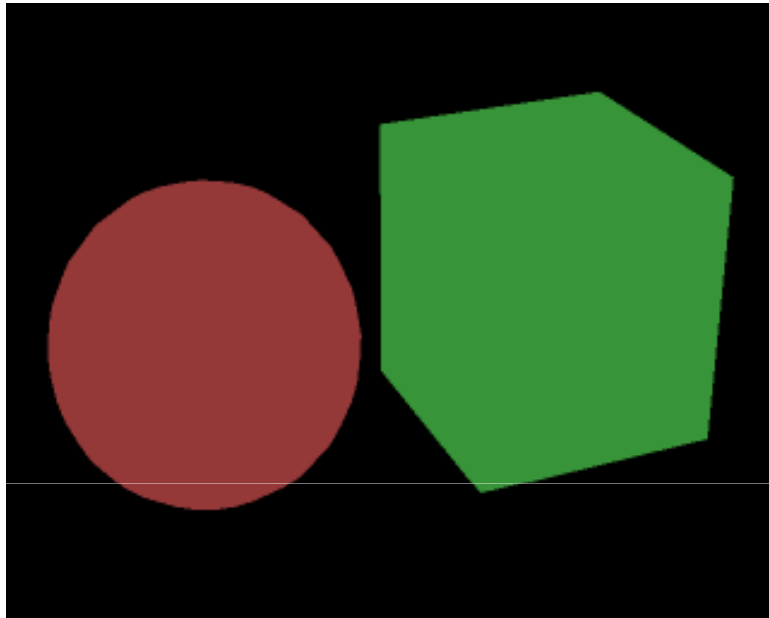
**luz y superficie coloreada.**

$$I_{(\text{intensidad}, \lambda)} = \text{LUZ}_{\text{ambiental}, \lambda} + \text{LUZ}_{\text{difusa}, \lambda} + \text{LUZ}_{\text{especular}, \lambda}$$

**múltiples fuentes de luz.**

$$I_{(\text{intensidad}, \lambda)} = \text{LUZ}_{\text{ambiental}, \lambda} + \sum_L (\text{LUZ}_{\text{difusa}, \lambda, L} + \text{LUZ}_{\text{especular}, \lambda, L})$$

# Luz Ambiental



Los objetos no tienen fuente de luz externa.  
Cada objeto tiene una silueta monocromática.

$I = k_i$  , valor entre 0 y 1

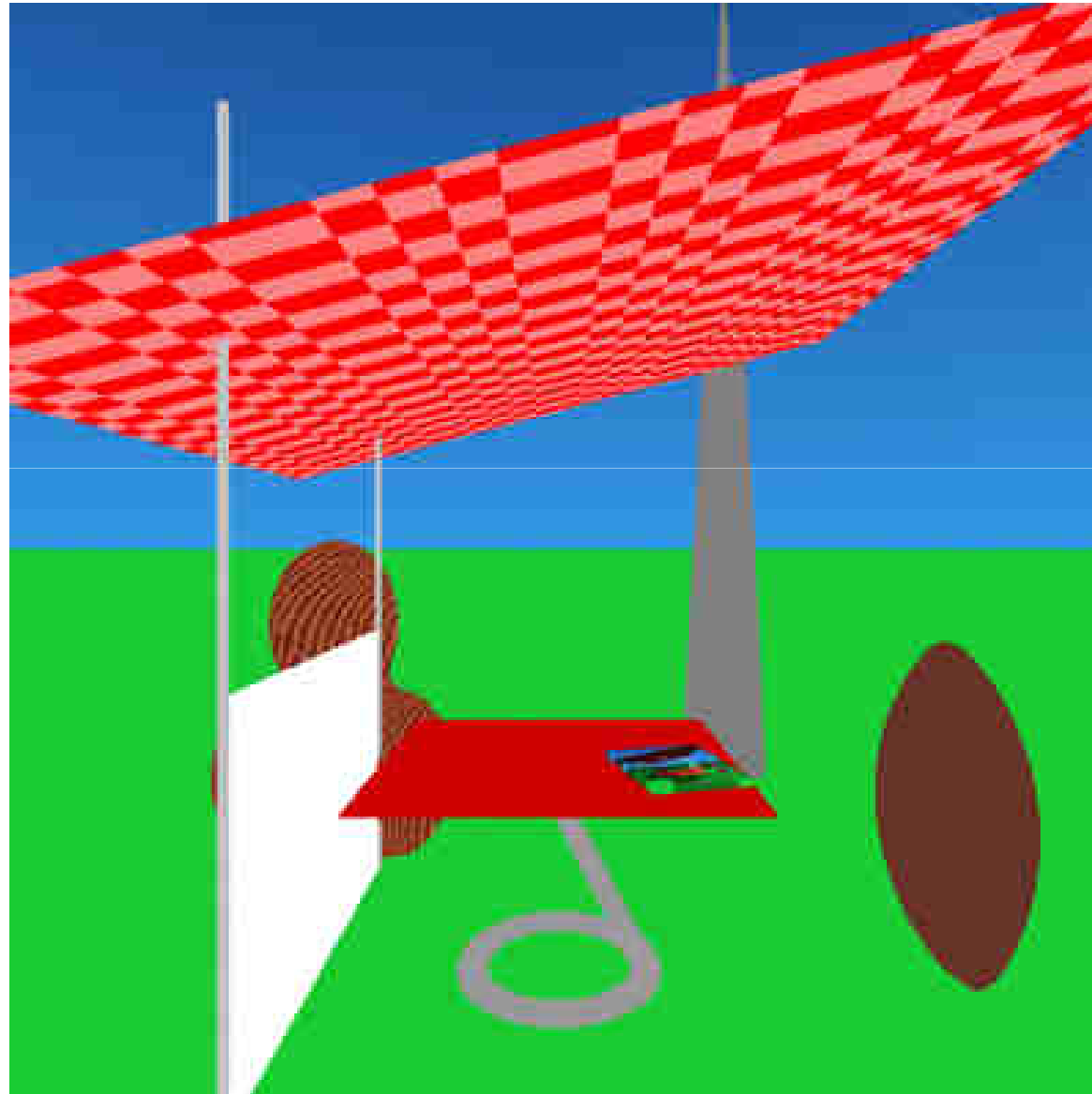
$I = I_a k_a$  ,

$I_a$  = Intensidad de la luz ambiental,

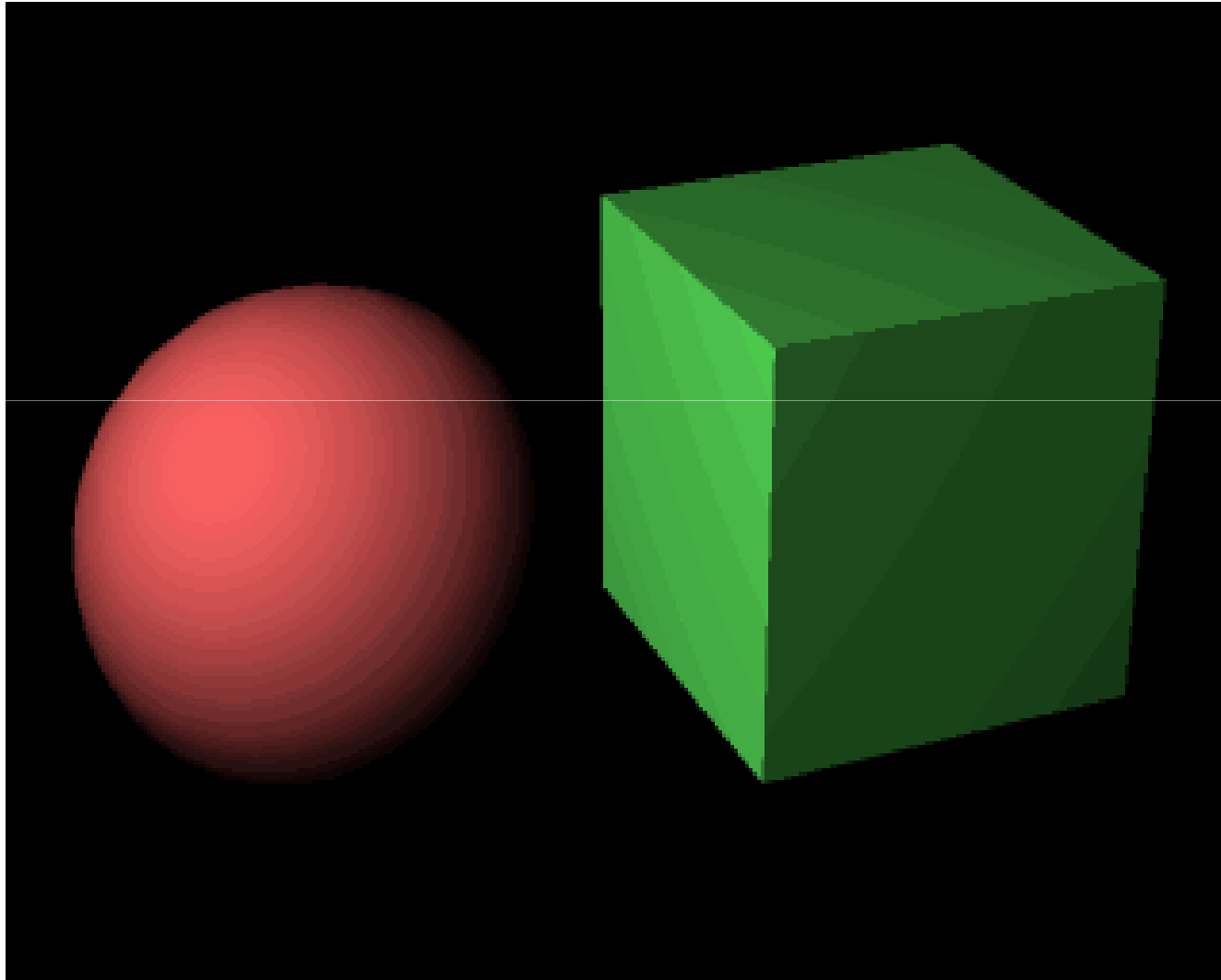
$k_a$  = cantidad de luz ambiental de un objeto.



# Luz Ambiental



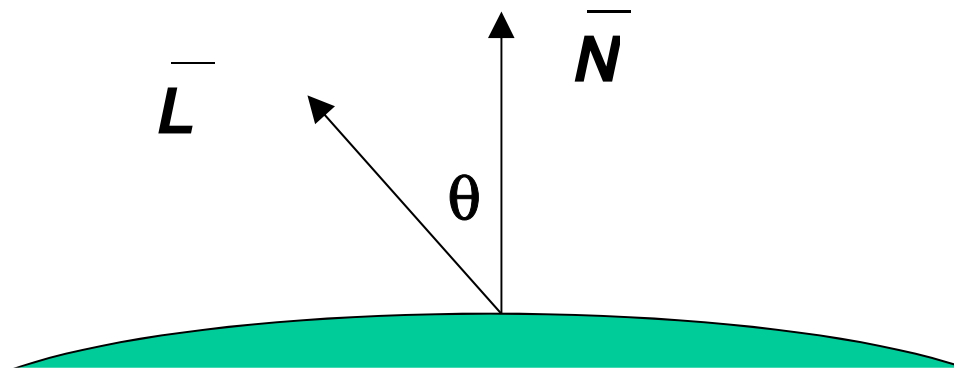
# Reflexión difusa



# Reflexión difusa

Fuente luminosa puntual: la luz emana en todas direcciones a partir de un solo punto.

Objetos de brillantez variable: la misma depende de la dirección y la distancia respecto a la fuente luminosa.

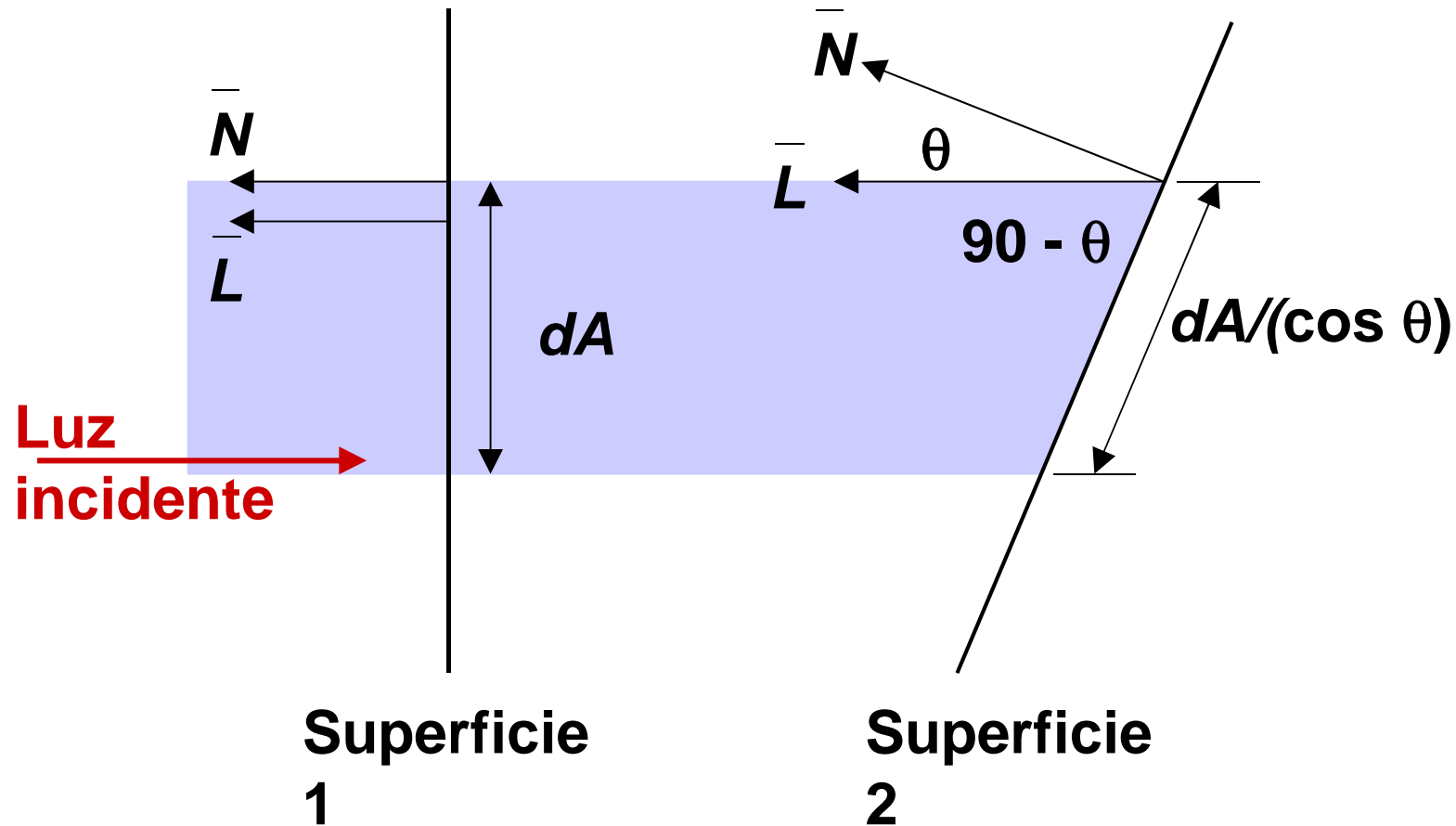


$$I = I_p k_d (N \cdot L)$$

$I_p$  es intensidad de luz difusa.

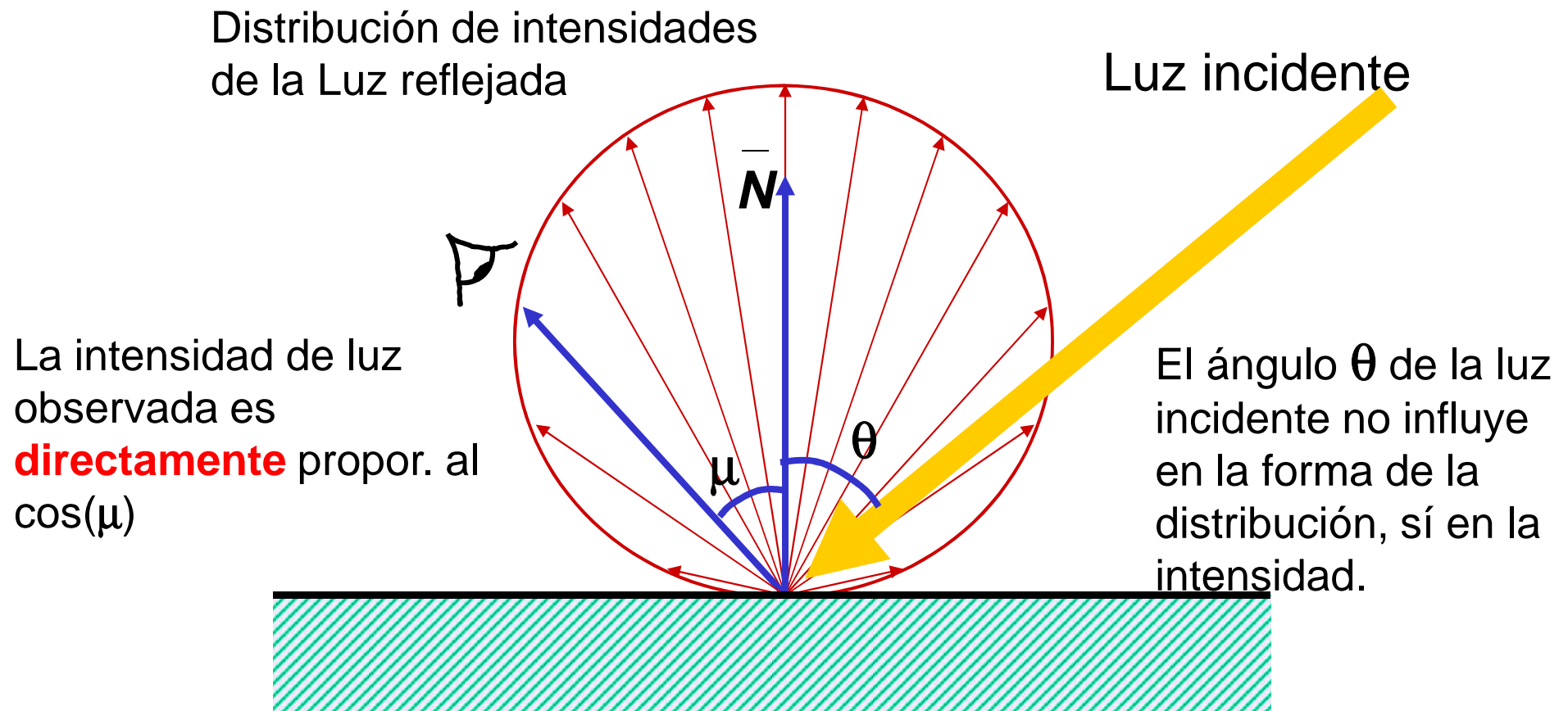
$k_d$  es cantidad de luz difusa del objeto.

## Reflexión difusa (reflexión lambertiana)



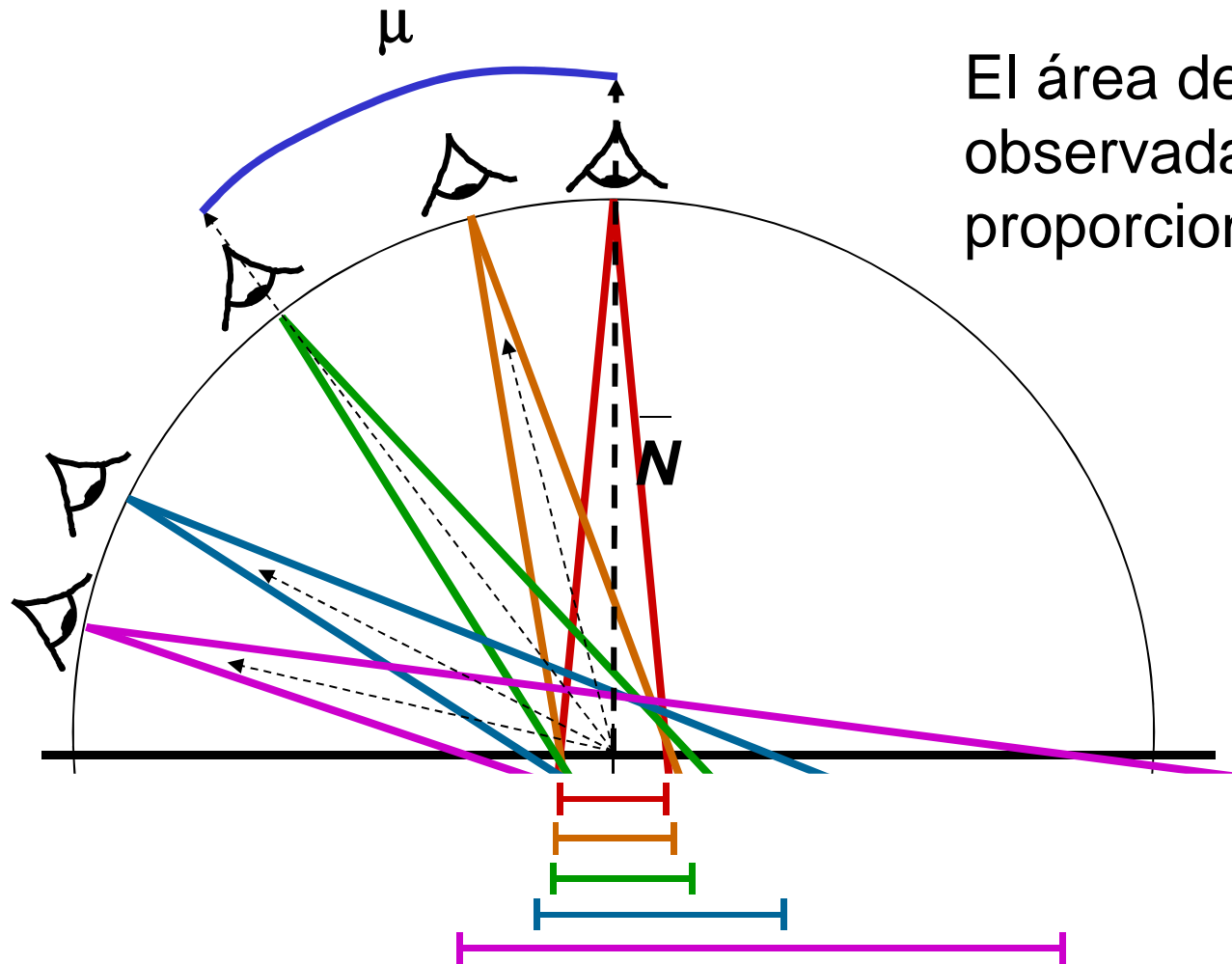
La luz que cae en  $dA$  es **directamente** proporcional a  $\cos(\theta)$ . Esto se aplica a cualquier superficie.

# Reflexión difusa (reflexión lambertiana)



La intensidad que le llega al observador es **directamente** proporcional a  $\cos(\theta)$ . Esto es particular de las superficies Lambertianas

# Reflexión difusa (reflexión lambertiana)



El área de superficie observada es **inversamente** proporcional a  $\cos(\mu)$

# Reflexión difusa (reflexión lambertiana)

Tenemos 2 efectos contrapuestos:

- 1) La intensidad de luz observada es **directamente** proporcional a  $\cos(\mu)$  .
- 2) La cantidad de área de superficie observada es **inversamente** proporcional a  $\cos(\mu)$  .

=> Ambas cantidades se compensan.

Por tanto, **para las superficies lambertianas, la cantidad de luz que ve el observador es independiente de la dirección de éste** y sólo es proporcional a  $\cos(\theta)$ , donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la luz.

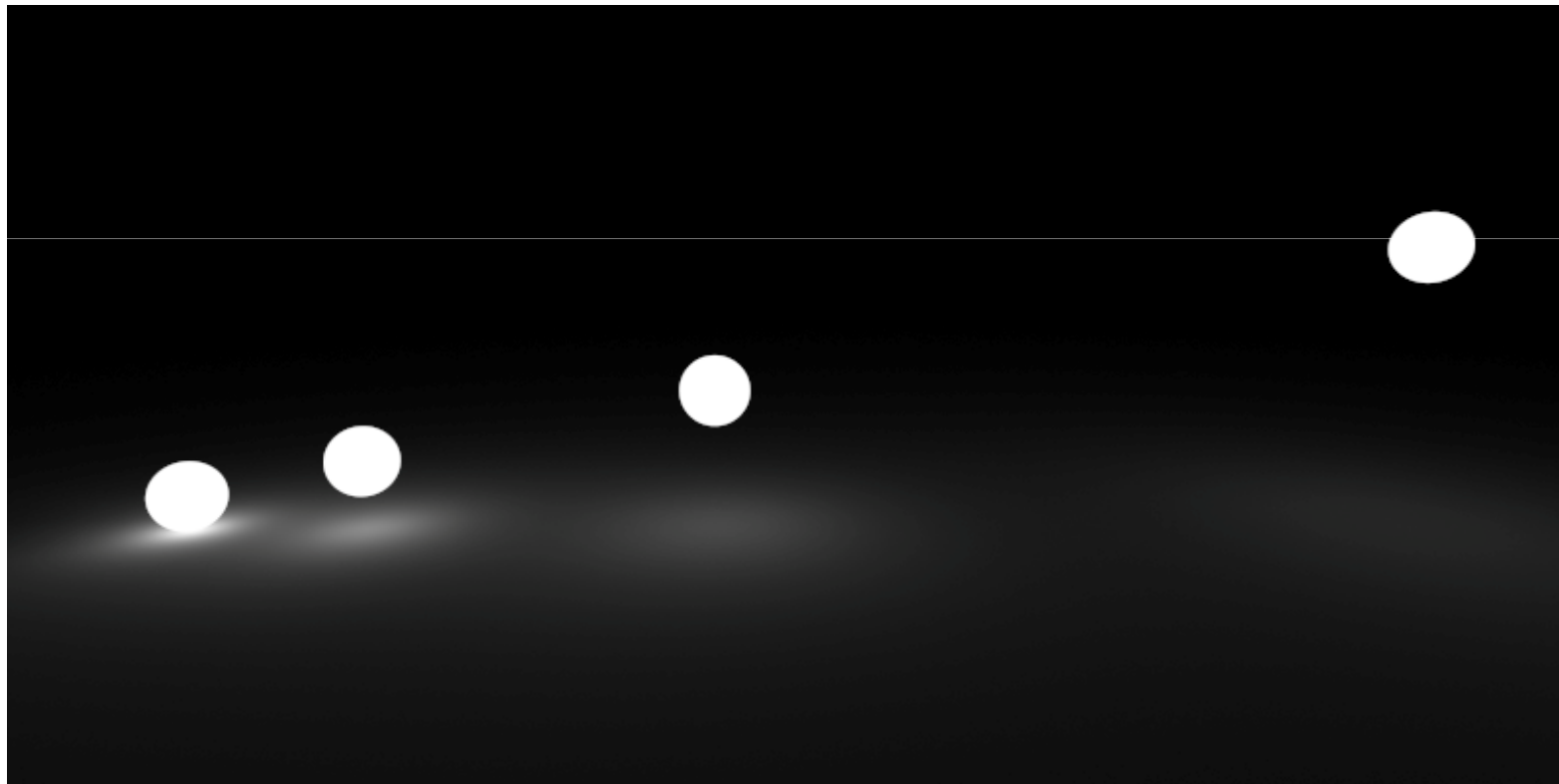
# Reflexión ambiental + difusa

$$I = I_a k_a + I_p k_d (N \cdot L)$$



# Atenuación de la fuente luminosa

Factor de Atenuación debido a la distancia entre la fuente puntual y la superficie.



# Atenuación de la fuente luminosa

Factor de Atenuación debido a la distancia entre la fuente puntual y la superficie.

$$I = I_a k_a + f_{att} I_p k_d (N \cdot L)$$

Fórmulas de  $f_{att}$

$f_{att} = 1/d_L^2$  (donde  $d_L$  es la distancia a la fuente luminosa)

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

# Luces y superficies coloreadas

La intensidad de la luz puntual se descompone (de forma simple) en 3 valores:  $I_{pR}$ ,  $I_{pG}$ ,  $I_{pB}$

Idem con la luz ambiente:  $I_{aR}$ ,  $I_{aG}$ ,  $I_{aB}$

Idem con el color del objeto:  $O_{dR}$ ,  $O_{dG}$ ,  $O_{dB}$

=>

$$I_R = I_{aR}k_a O_{dR} + f_{att} I_{pR} k_d O_{dR} (N \cdot L)$$

$$I_G = I_{aG}k_a O_{dG} + f_{att} I_{pG} k_d O_{dG} (N \cdot L)$$

$$I_B = I_{aB}k_a O_{dB} + f_{att} I_{pB} k_d O_{dB} (N \cdot L)$$

# Luces y superficies coloreadas

Modelo más realista, que trabaja directamente con  $\lambda$ .

$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + f_{att} I_{p\lambda} k_d O_{d\lambda} (N \cdot L)$$

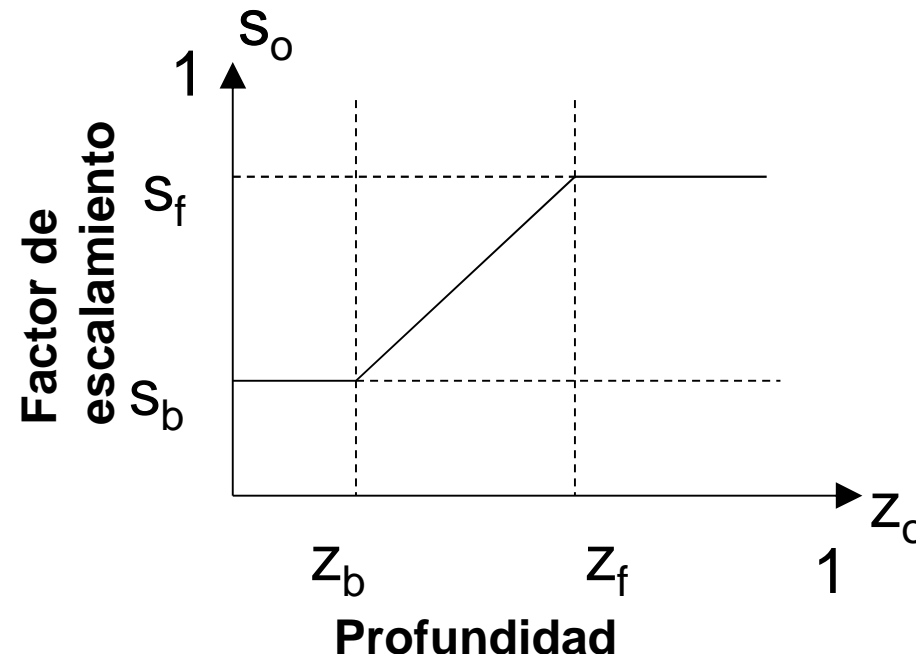
# Atenuación Atmosférica

Los objetos más lejanos al observador se generan con menor intensidad que los más cercanos.

$s_o$  = factor de escalamiento del objeto.

$I_\lambda$  = intensidad inicial del objeto.

$I_{dc\lambda}$  = intensidad indicadora de profundidad.



# Atenuación Atmosférica

$$\text{Si } \mathbf{z}_o < z_b \quad \Rightarrow \quad \mathbf{s}_o = s_b$$

$$\text{Si } \mathbf{z}_o > z_f \quad \Rightarrow \quad \mathbf{s}_o = s_f$$

En otros casos:

$$\mathbf{s}_o = s_b + (\mathbf{z}_o - z_b)(s_f - s_b)/(z_f - z_b)$$

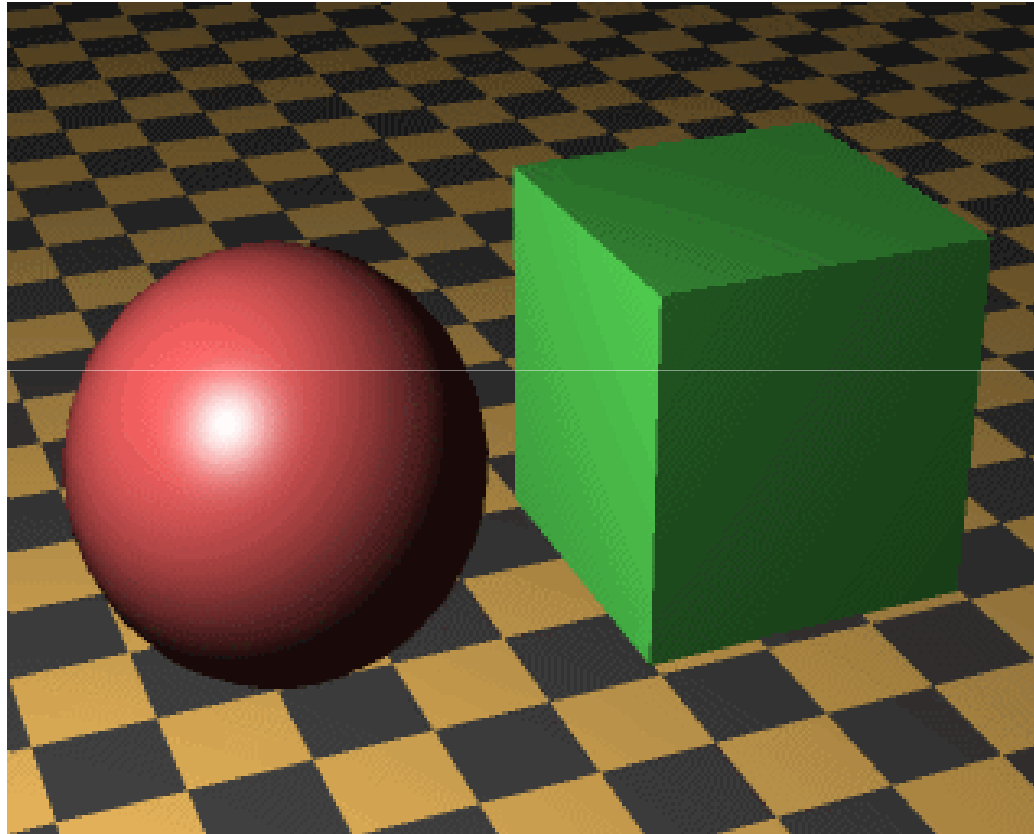
Por tanto, la intensidad del objeto es:

$$I'_\lambda = \mathbf{s}_o I_\lambda + (1 - \mathbf{s}_o) I_{dc\lambda}$$

# Atenuación Atmosférica

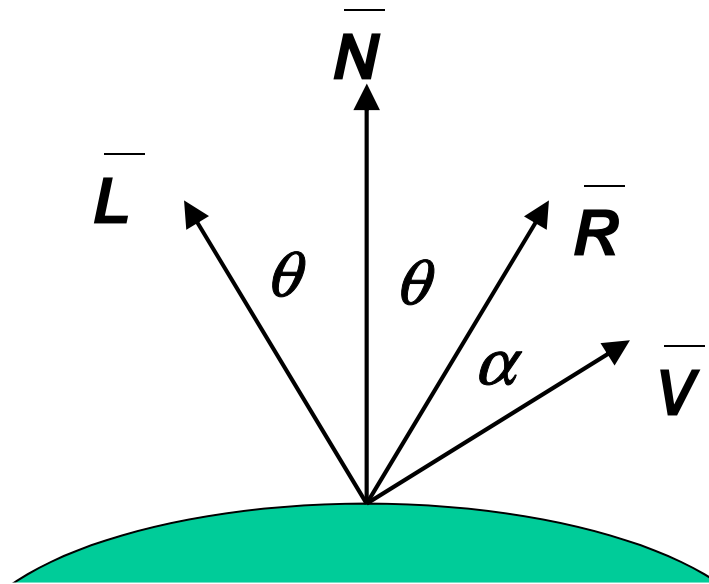


# Reflexión Especular

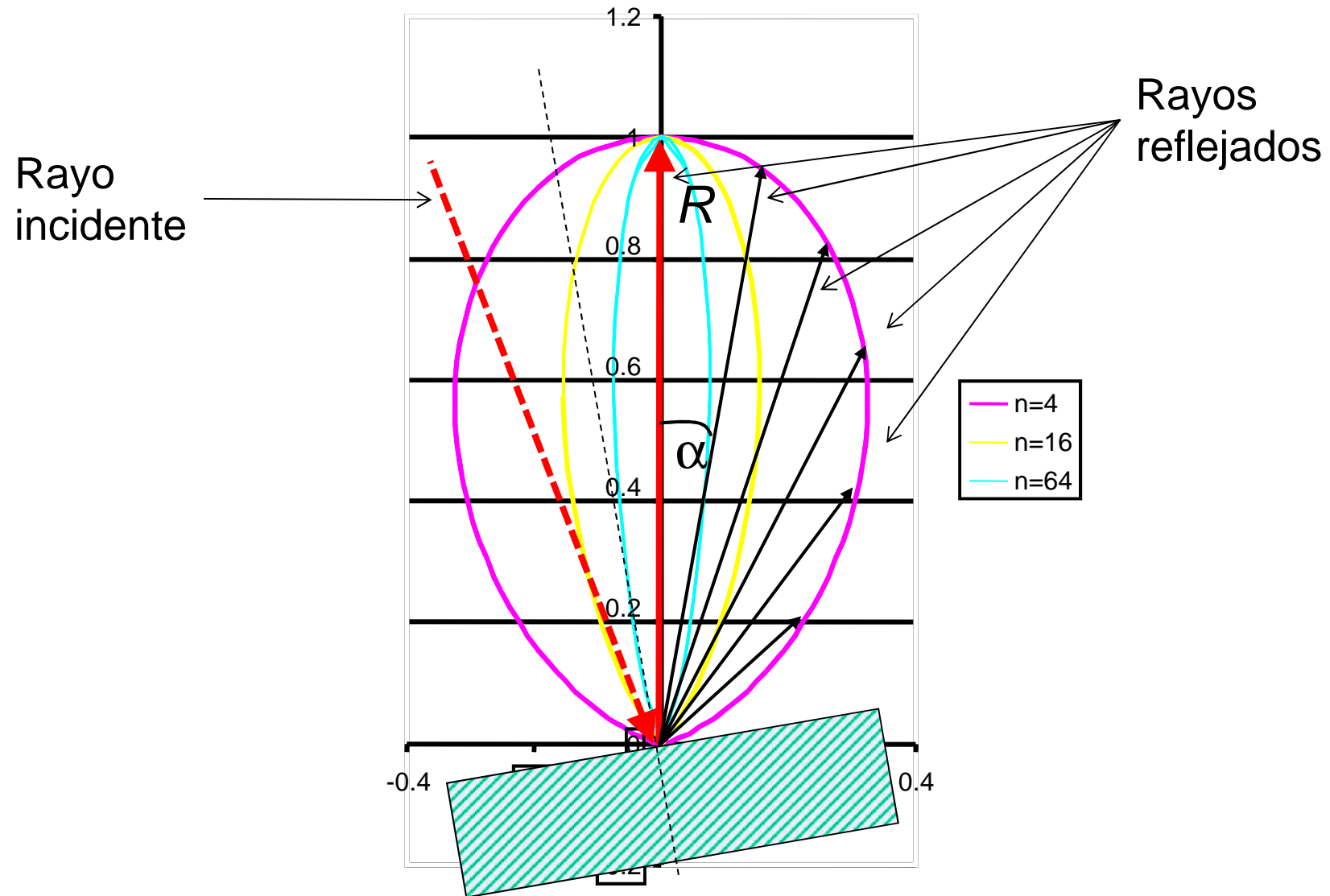




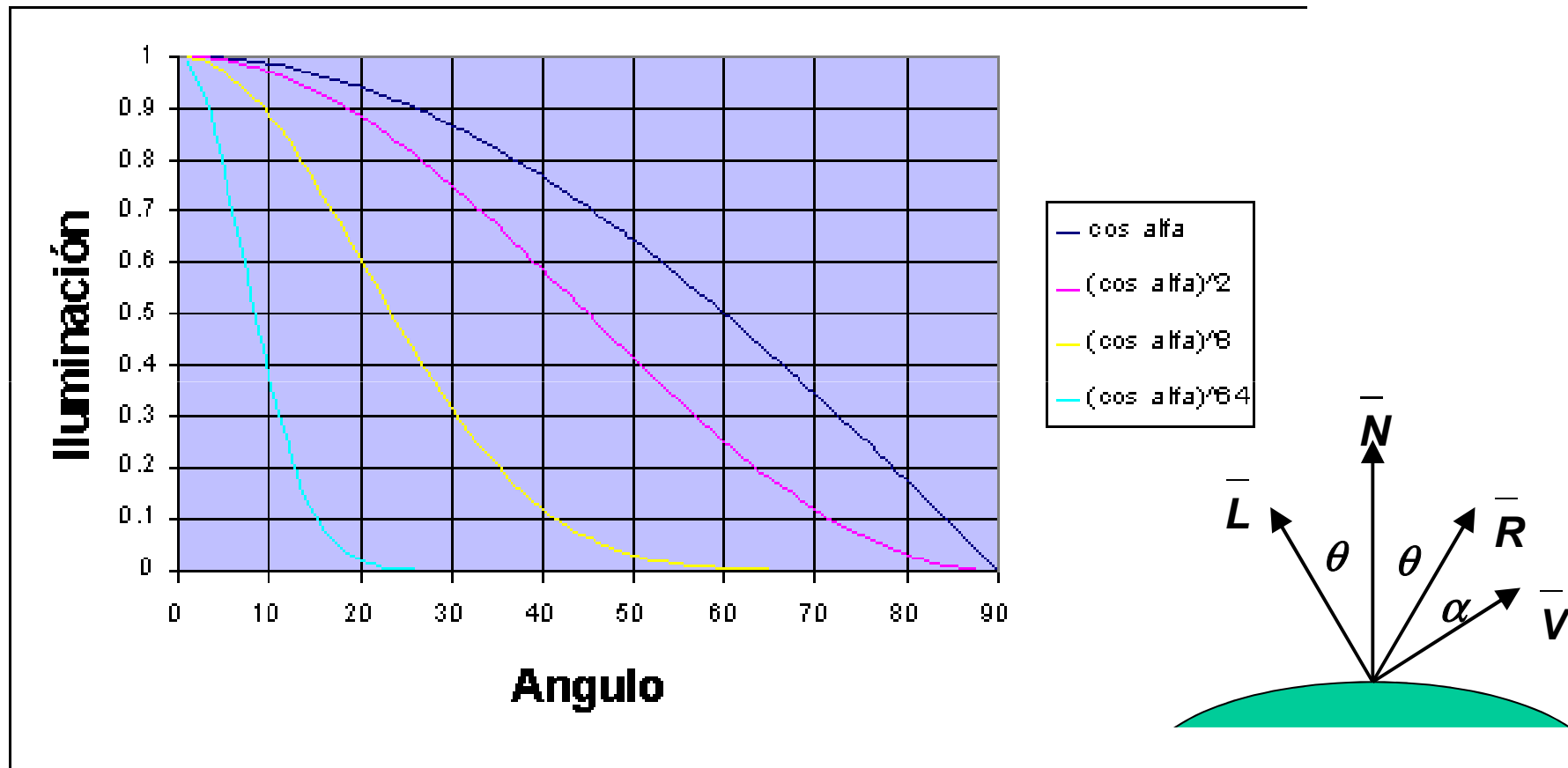
# Reflexión Especular



# Reflexión Especular (modelo de Phong)



# Reflexión Especular (modelo de Phong)



A la ecuación de intensidad se le suma el término

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

# Reflexión Especular (modelo de Phong)

Es un modelo para reflectores imperfectos.

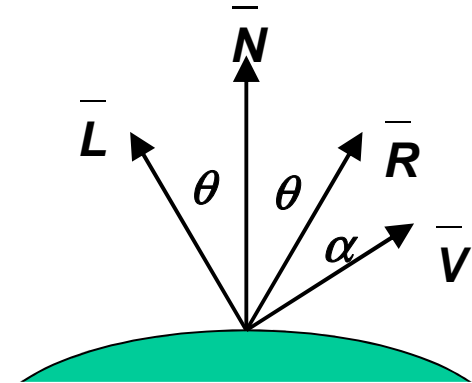
Hay un componente  $n$ , llamado exponente de reflexión especular.

$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + f_{att} I_{p\lambda} [k_d O_{d\lambda} (N \cdot L) + W(\theta) (R \cdot V)^n]$$

donde  $W(\theta)$  es la fracción de luz reflejada especularmente.

Si considero  $W(\theta)$  constante =  $k_s$

Si  $O_{s\lambda}$  es el color especular del objeto



$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + f_{att} I_{p\lambda} [k_d O_{d\lambda} (N \cdot L) + k_s O_{s\lambda} (R \cdot V)^n]$$

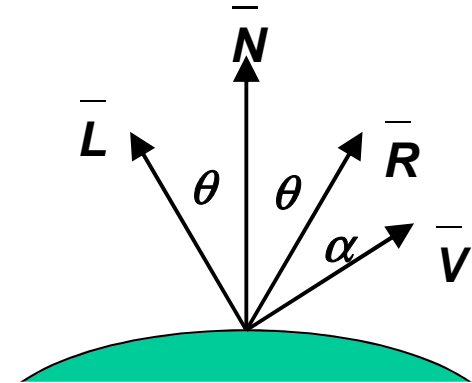
# Reflexión Especular (modelo de Phong)

Cálculo de R

$$R = 2N(N \cdot L) - L$$

=>

$$R \cdot V = (2N(N \cdot L) - L) \cdot V$$



---

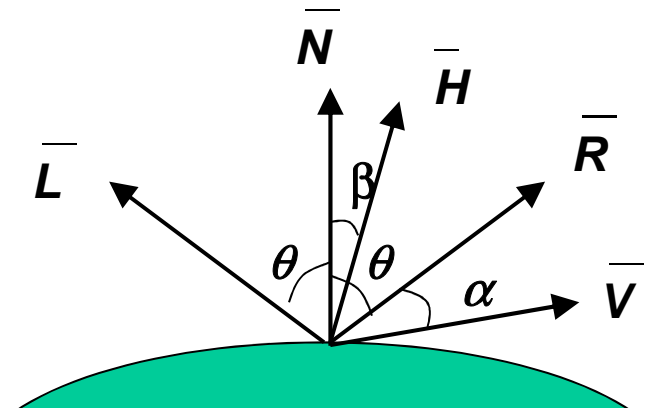
alternativa:  $(N \cdot H)^n$  en lugar de  $(R \cdot V)^n$

$H$  = vector intermedio entre  $L$  y  $V$

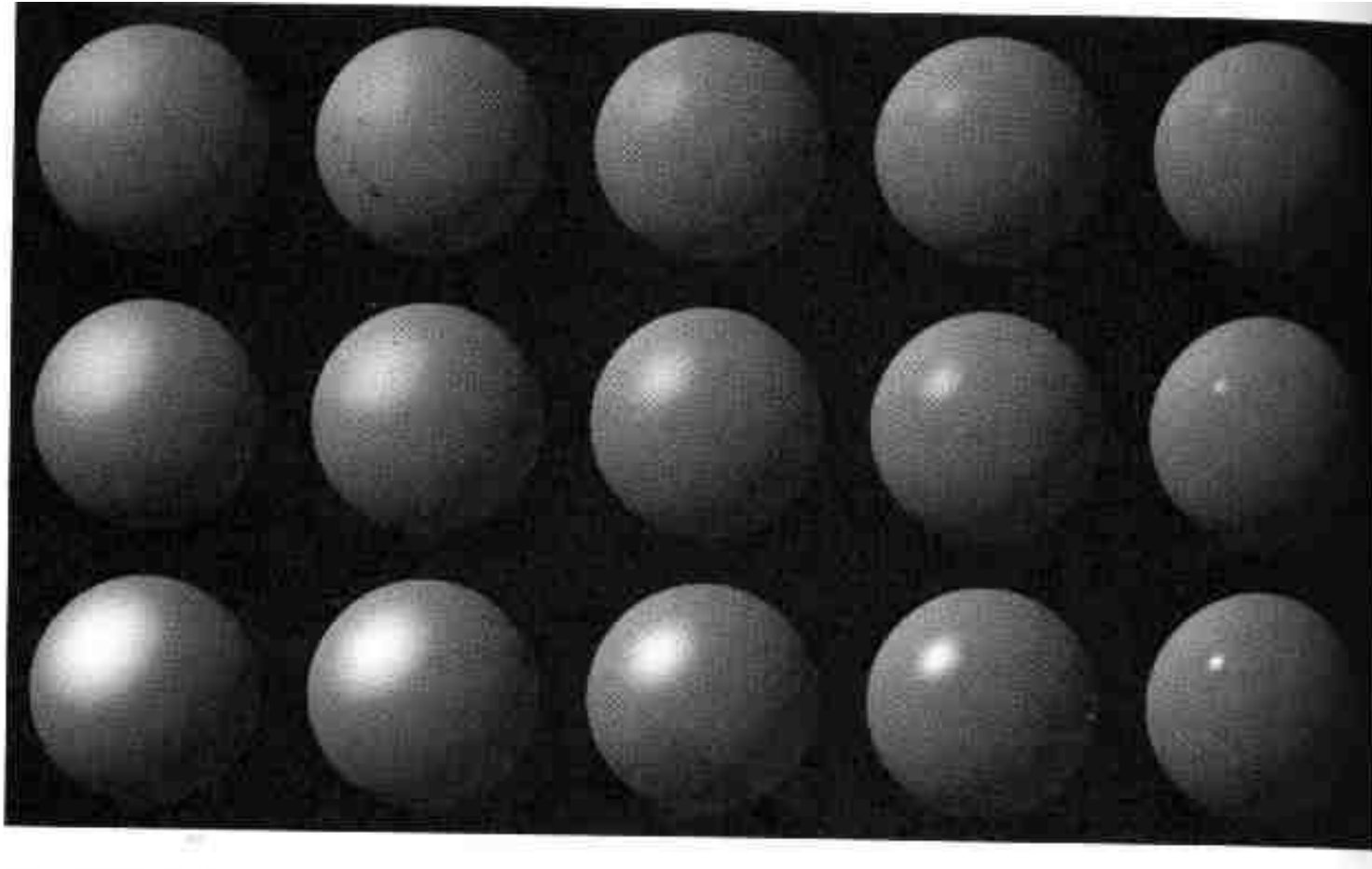
$$H = (L + V) / |L + V|$$

=>

$$(N \cdot H)^n \neq (R \cdot V)^n$$



# Reflexión Especular (modelo de Phong)

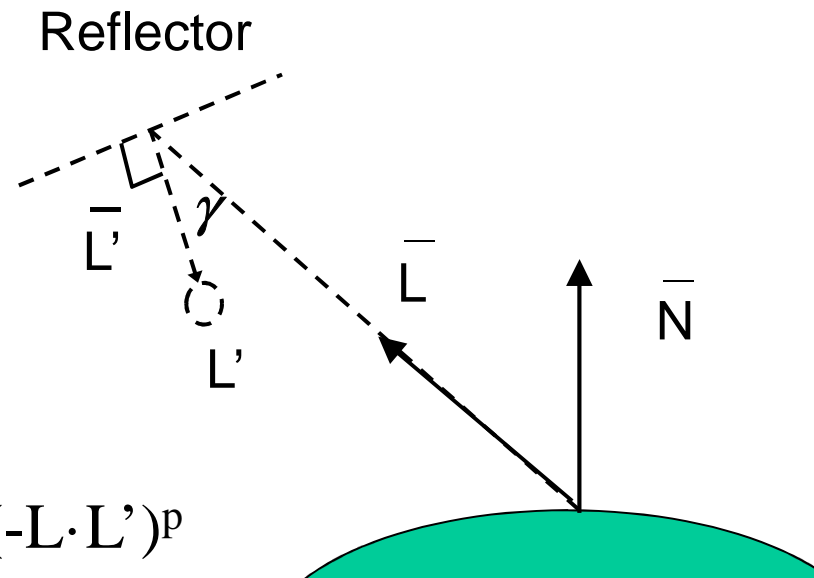


Todas las esferas tienen  $I_a = I_p = 1$ ,  $k_a = 0.1$ ,  $k_d = 0.45$ .

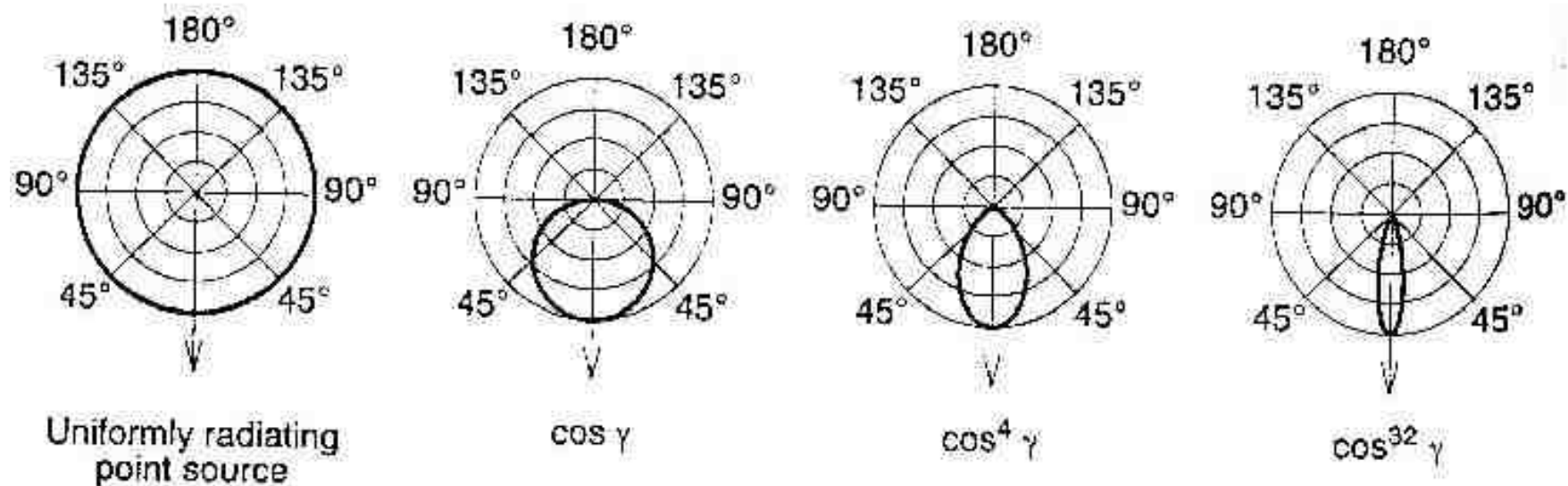
De izquierda a derecha,  $n = 3.0, 5.0, 10.0, 27.0, 200.0$

De arriba a abajo,  $k_s = 0.1, 0.25, 0.5$

## Modelo de Warn

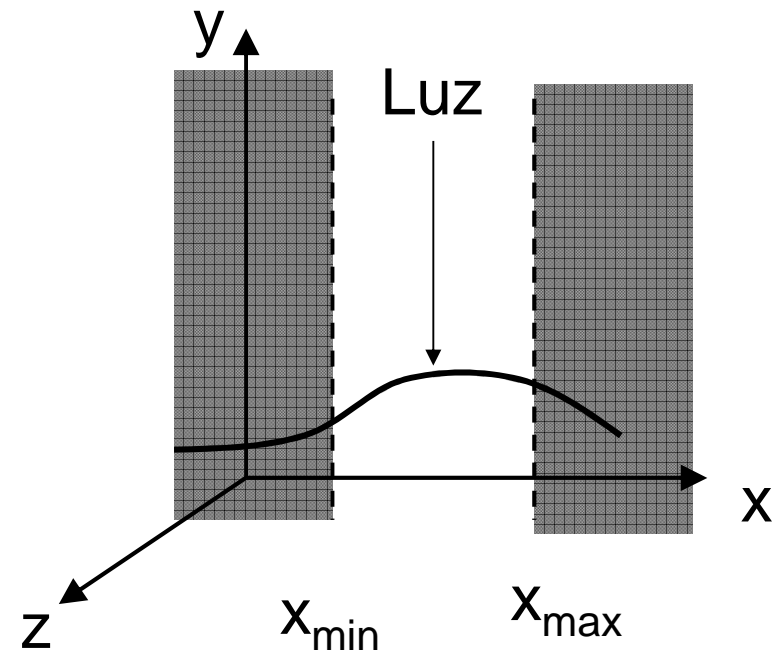
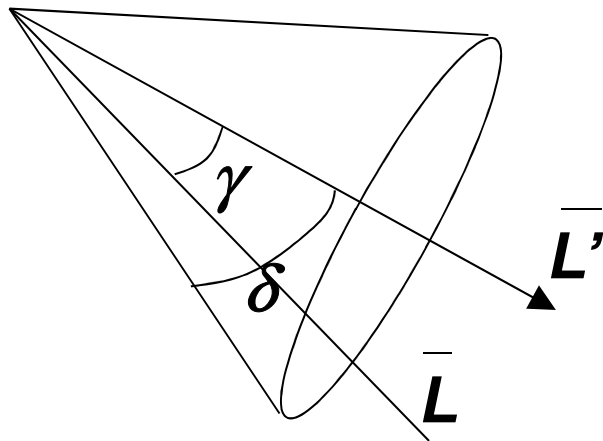
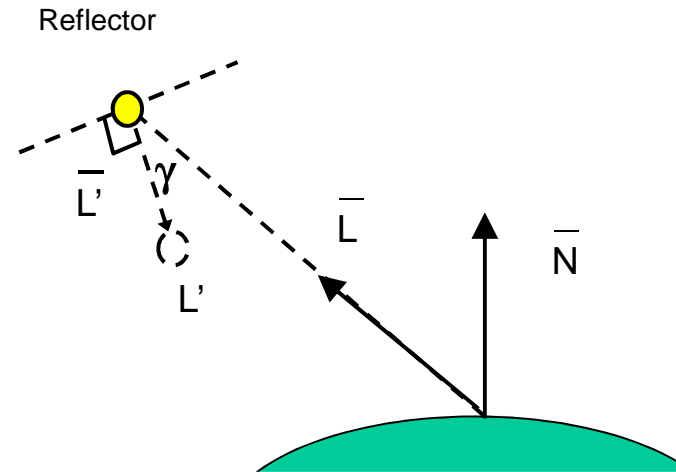


$$I_{L,\gamma} (\cos \gamma)^p = I_{L,\gamma} (-\bar{L} \cdot \bar{L}')^p$$



## Modelo de Warn

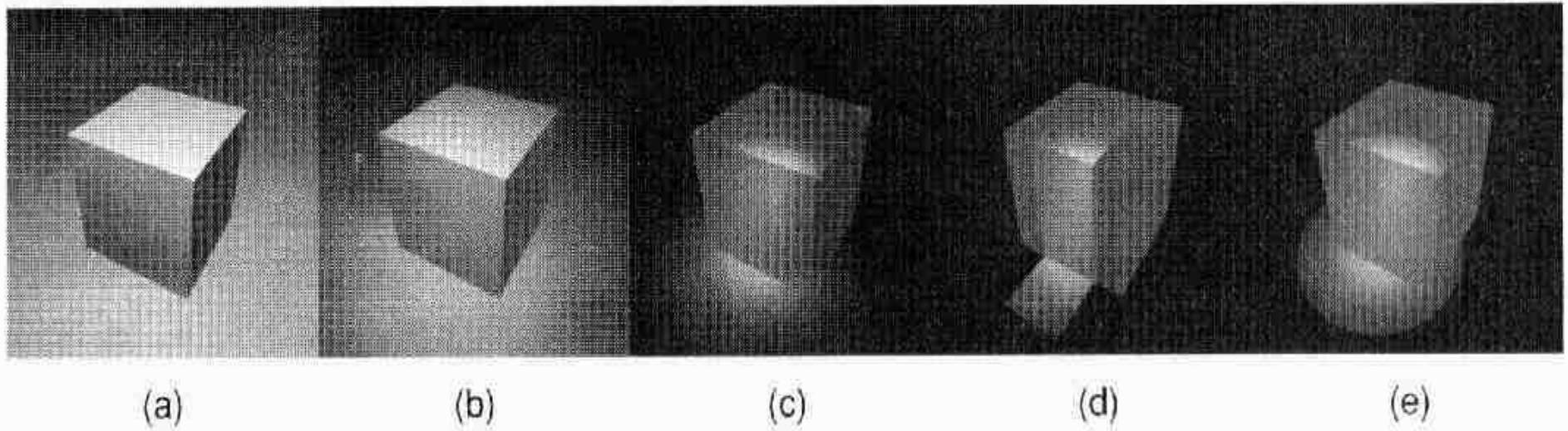
Utilización de aletas y conos.





## Modelo de Warn

Utilización de aletas y conos.



# Fuentes luminosas múltiples

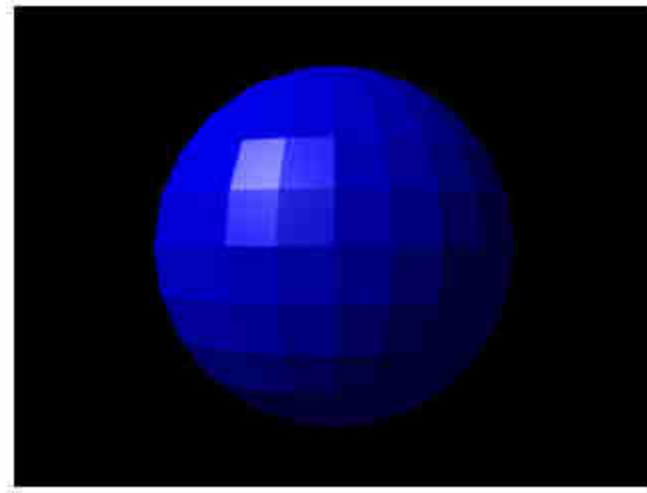
$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + \sum_{1 \leq i \leq m} f_{att_i} I_{p\lambda_i} \left[ k_d O_{d\lambda} (\bar{N} \cdot \bar{L}_i) + k_s O_{s\lambda} (\bar{R}_i \cdot \bar{V})^n \right]$$

Se incrementa la posibilidad de problemas

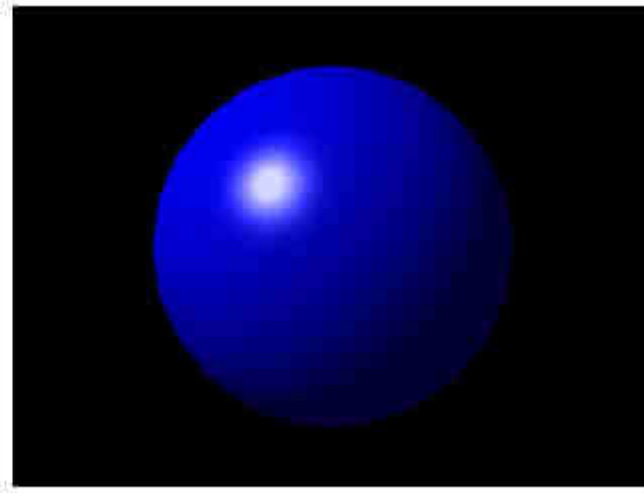
Es probable que  $I_{\lambda}$  supere el máximo permitido (1, o 255).

El control se puede hacer píxel a píxel o considerando toda la imagen.

# Modelos de sombreado para polígonos



FLAT SHADING



PHONG SHADING

# Modelos de sombreado para polígonos

## Sombreado constante:

- aplica una sola vez un modelo de iluminación para todo el polígono.
- Esta simplificación sirve si:
  - La fuente luminosa está en el infinito, por tanto  $N \cdot L$  es constante
  - El observador está en el infinito, por tanto  $N \cdot V$  es constante en toda la cara del polígono.
  - El polígono representa la superficie real que se modela y no es una aproximación a una superficie curva.
- Si las suposiciones son incorrectas, entonces hay un método para determinar  $L$  y  $V$

## Sombreado Interpolado

En lugar de evaluar la ecuación de iluminación para cada píxel, esta se interpola linealmente sobre un triángulo a partir de los valores determinados para sus vértices.

Se puede generalizar para otro tipo de polígonos.

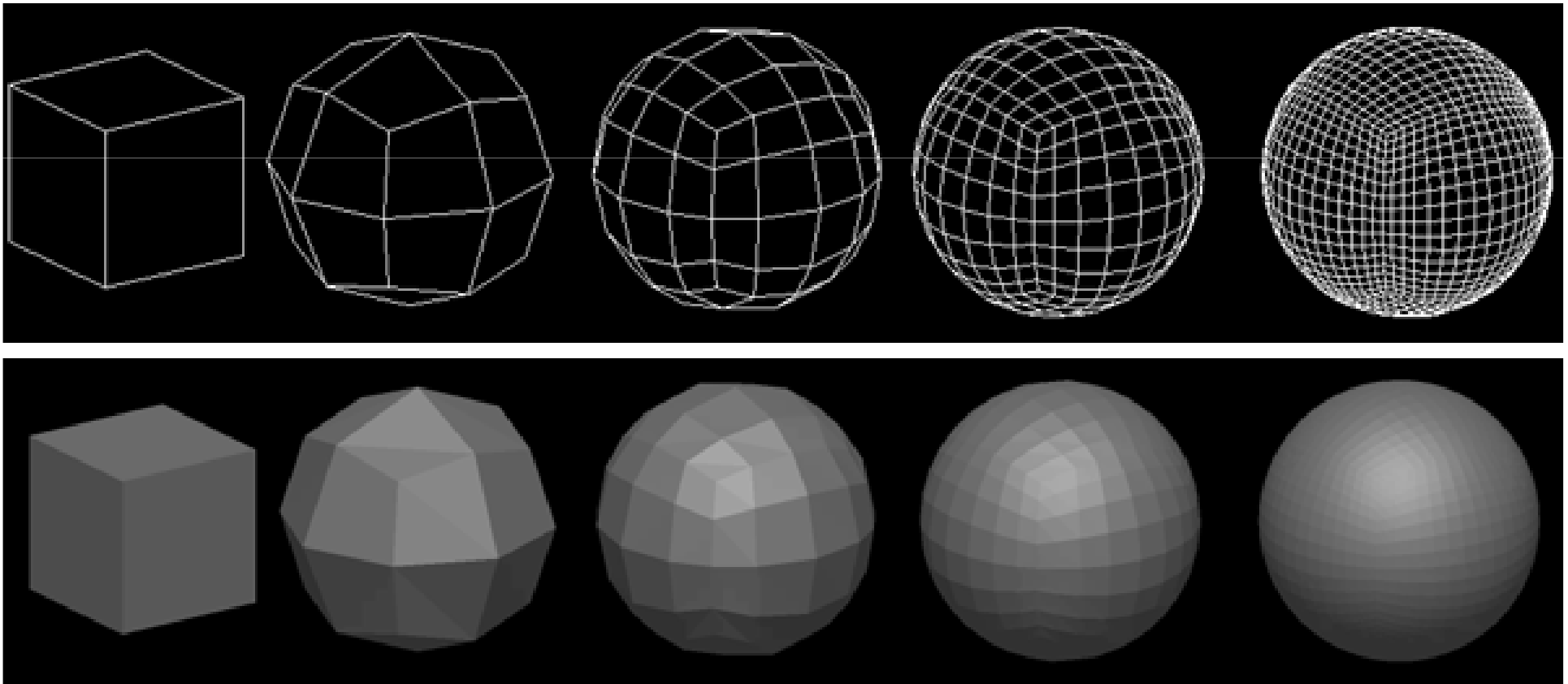
A su vez, en lugar de realizar la interpolación para cada píxel, se puede hallar una ecuación de diferencia.

Esta interpolación no evita la apariencia facetada. Según el objeto a modelar, esto es positivo o no.

## Sombreado de malla poligonal

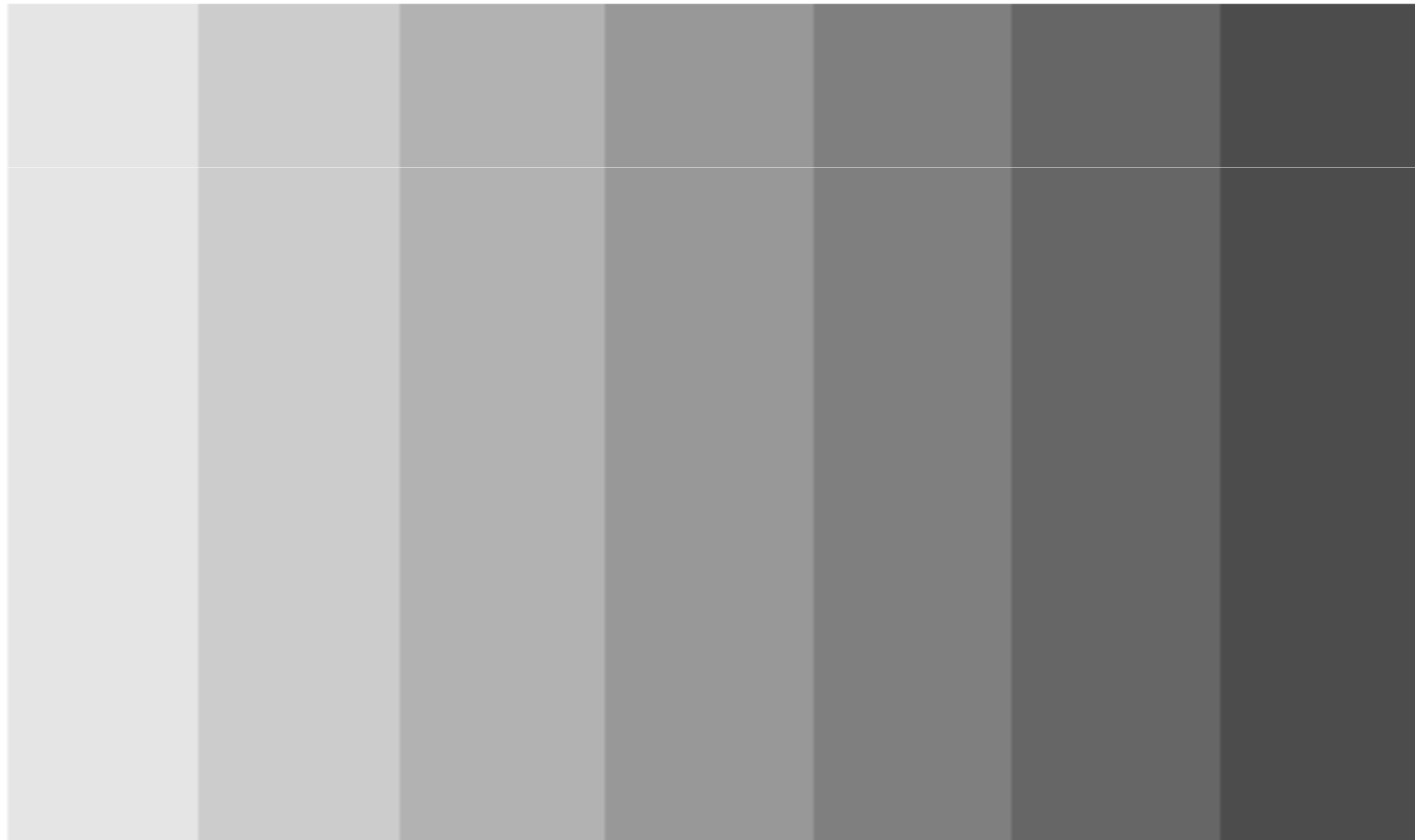
Una superficie curva se puede aproximar a otra facetada (malla poligonal)

No se logran buenos resultados en la interpolación, aunque se trabaje con una densidad alta de polígonos.



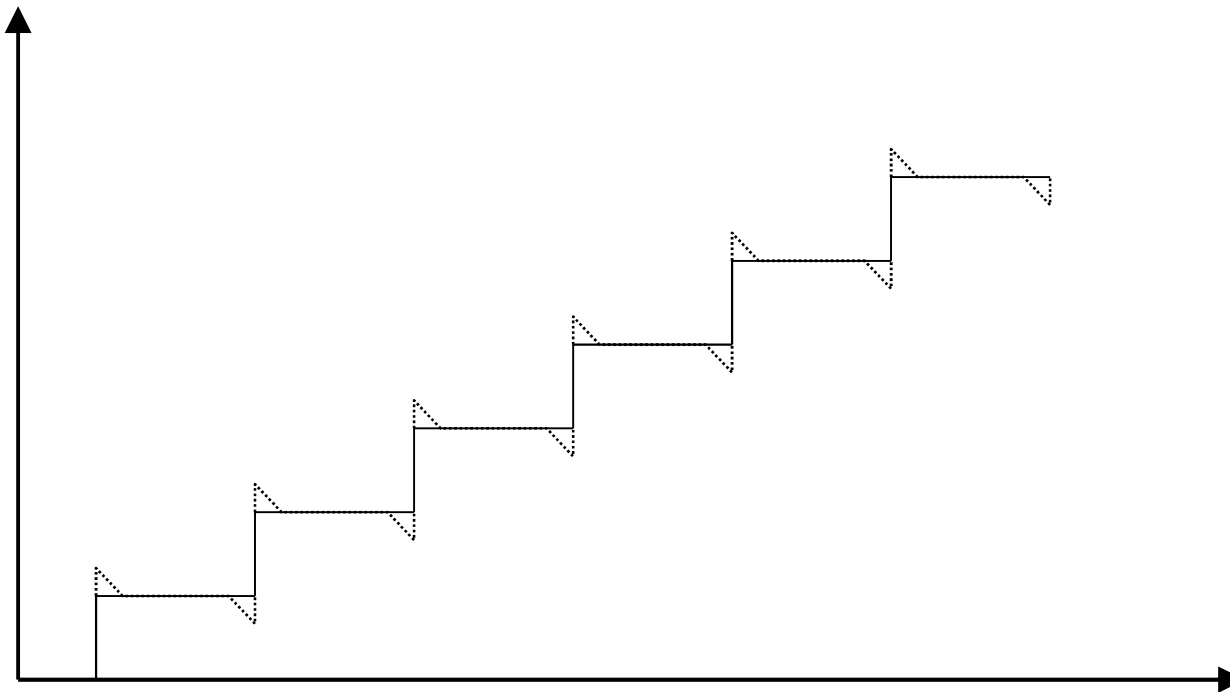
## Sombreado de malla poligonal

Los problemas en la visualización de una superficie curva a través de una aproximación facetada, tienen su origen en el efecto de banda de Mach.



# Sombreado de malla poligonal

Esquema de las intensidades reales y las percibidas.

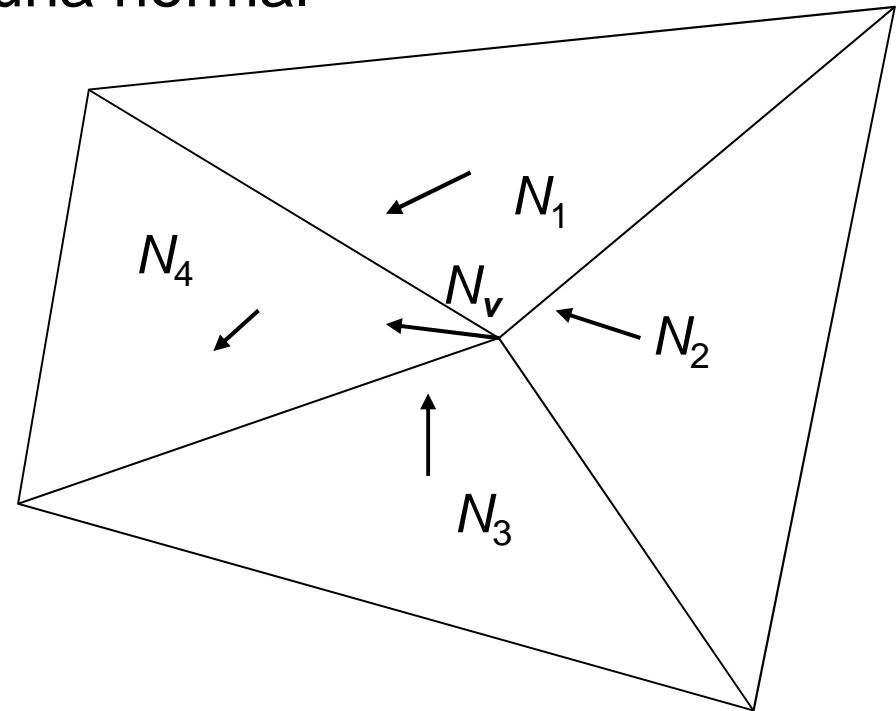




# Sombreado de Gouraud

1) A cada vértice se le asigna una normal

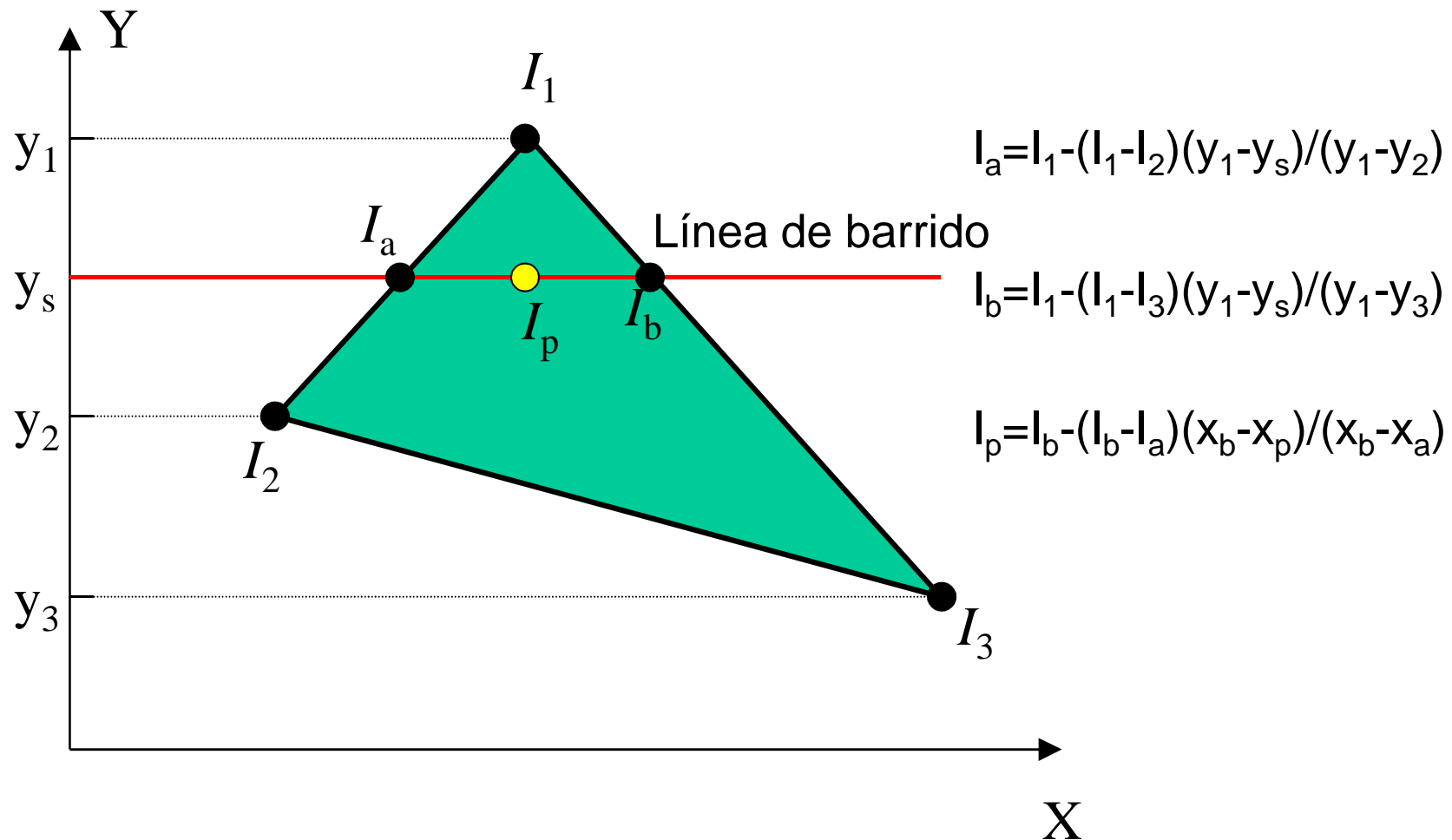
$$\bar{N}_v = \frac{\sum_{1 \leq i \leq n} \bar{N}_i}{\left| \sum_{1 \leq i \leq n} \bar{N}_i \right|}$$



- 2) Se calculan las intensidades de los vértices usando algún modelo de iluminación ya visto.
- 3) Se interpola la intensidad en cada píxel del polígono.

## Sombreado de Gouraud

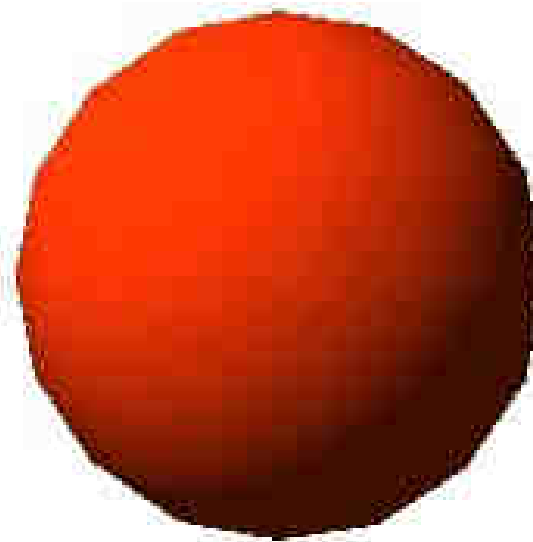
3) Se interpola la intensidad en cada píxel del polígono.



# Sombreado de Gouraud



**Flat**



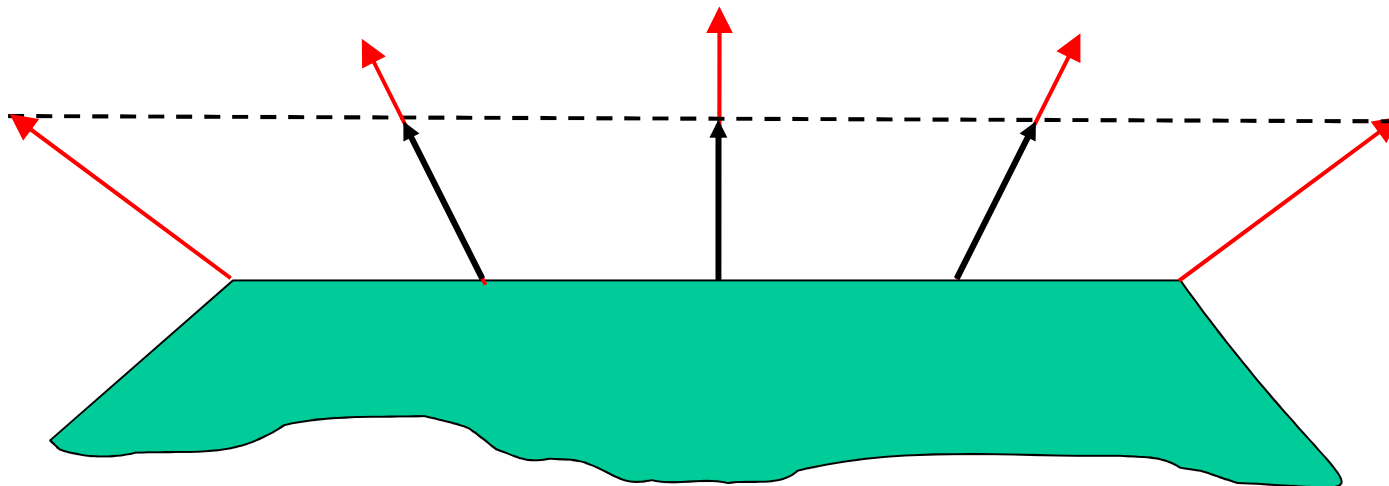
**Gouraud**

# Sombreado de Phong

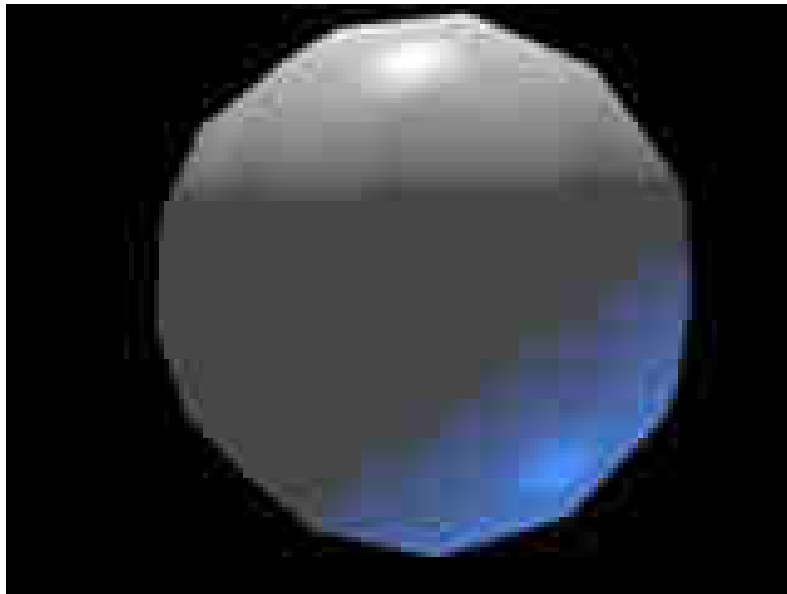
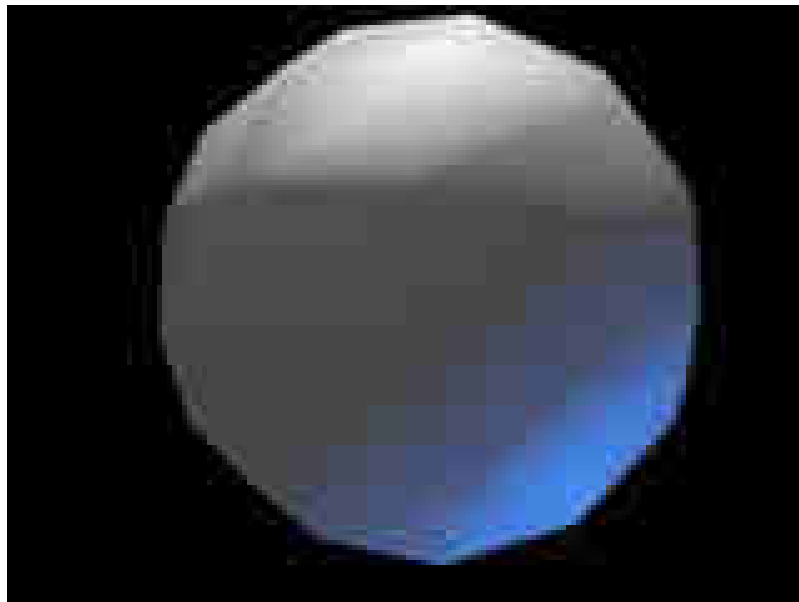
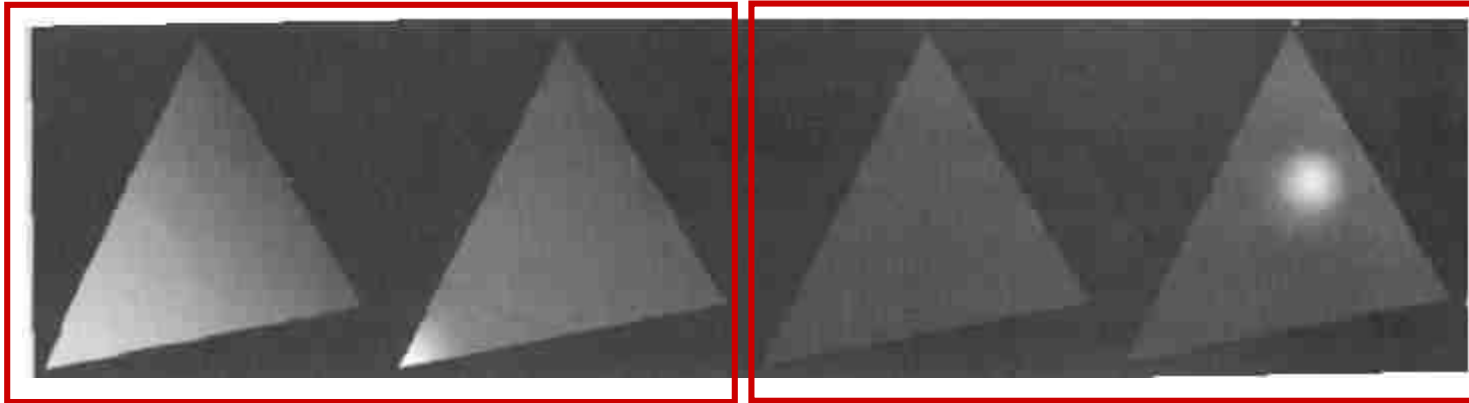
En lugar de interpolar la intensidad del vertice (Gouraud), se interpola y normaliza la normal a los vértices.

Si se utiliza sombreado de Phong con  $n$  alto, la diferencia entre Phong y Gouraud puede llegar a ser notable.

Normalizar un vector es costoso, y aplicar un modelo de iluminación a cada píxel también puede serlo.



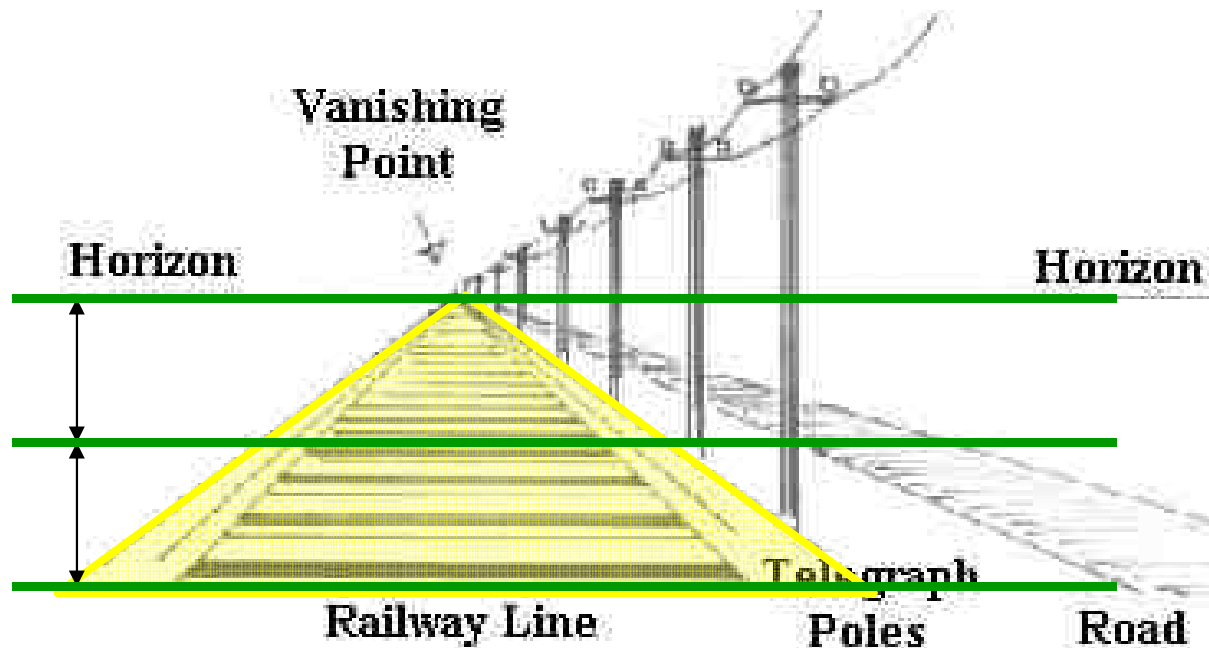
## Sombreado de Phong



# Problemas con sombreado interpolado

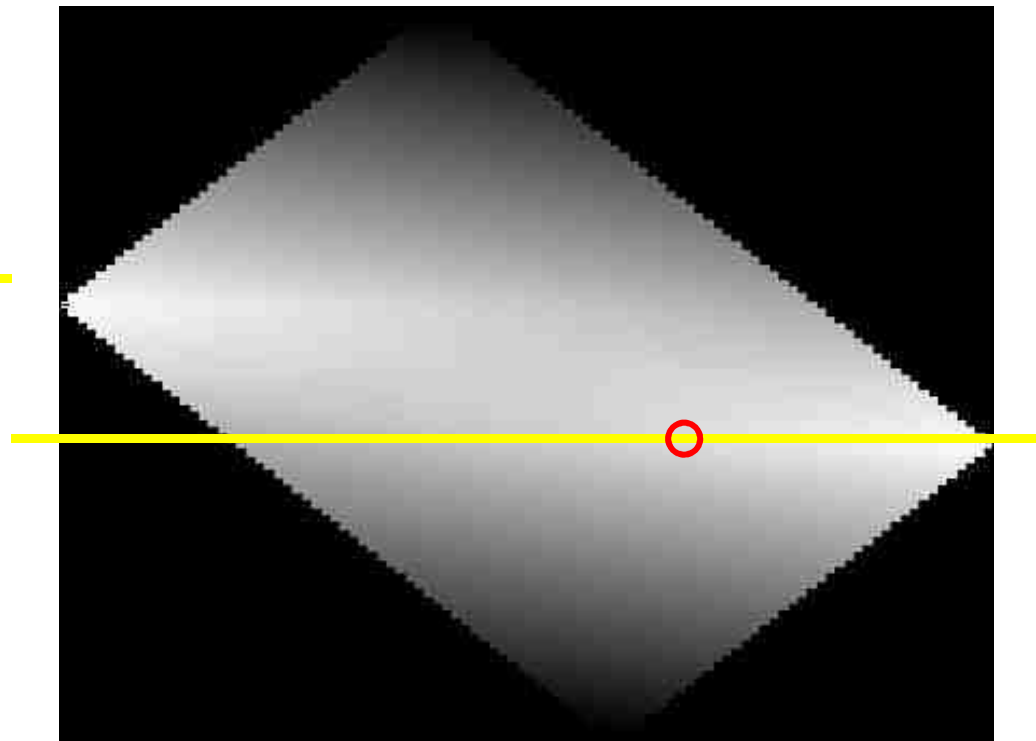
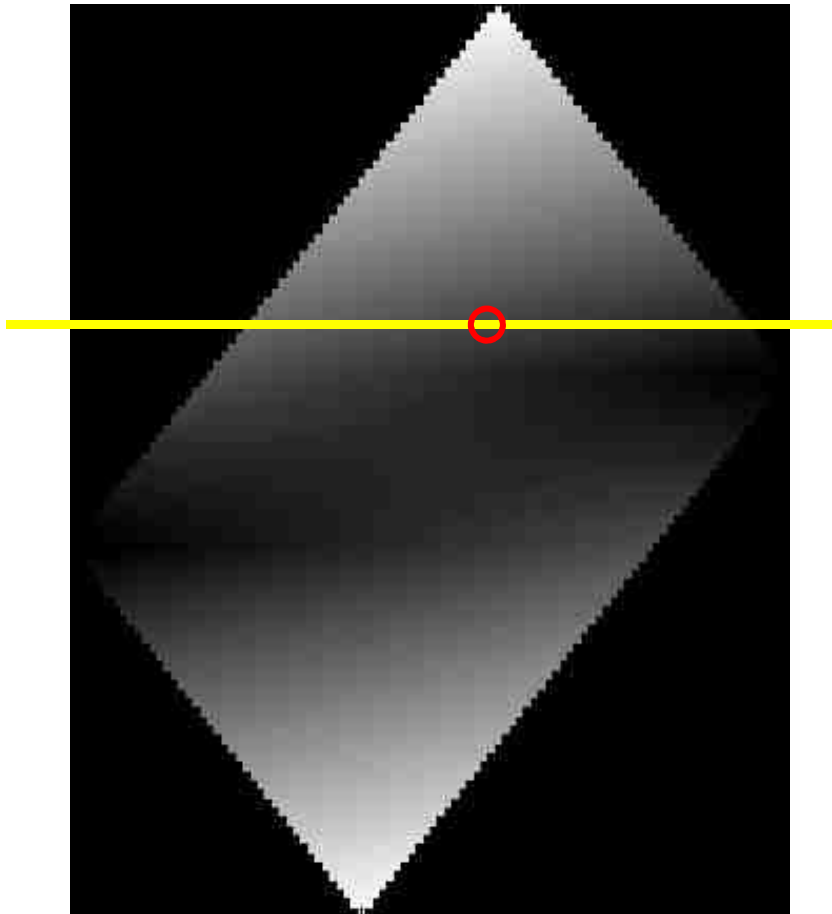
- 1) ***Silueta poligonal***
- 2) ***Distorsión de perspectiva.*** (las interpolaciones se hacen sobre la proyección en pantalla, por tanto no consideran la perspectiva).

Distancias iguales en la **y** no se corresponde con distancias iguales en la **z**.



## Problemas con sombreado interpolado

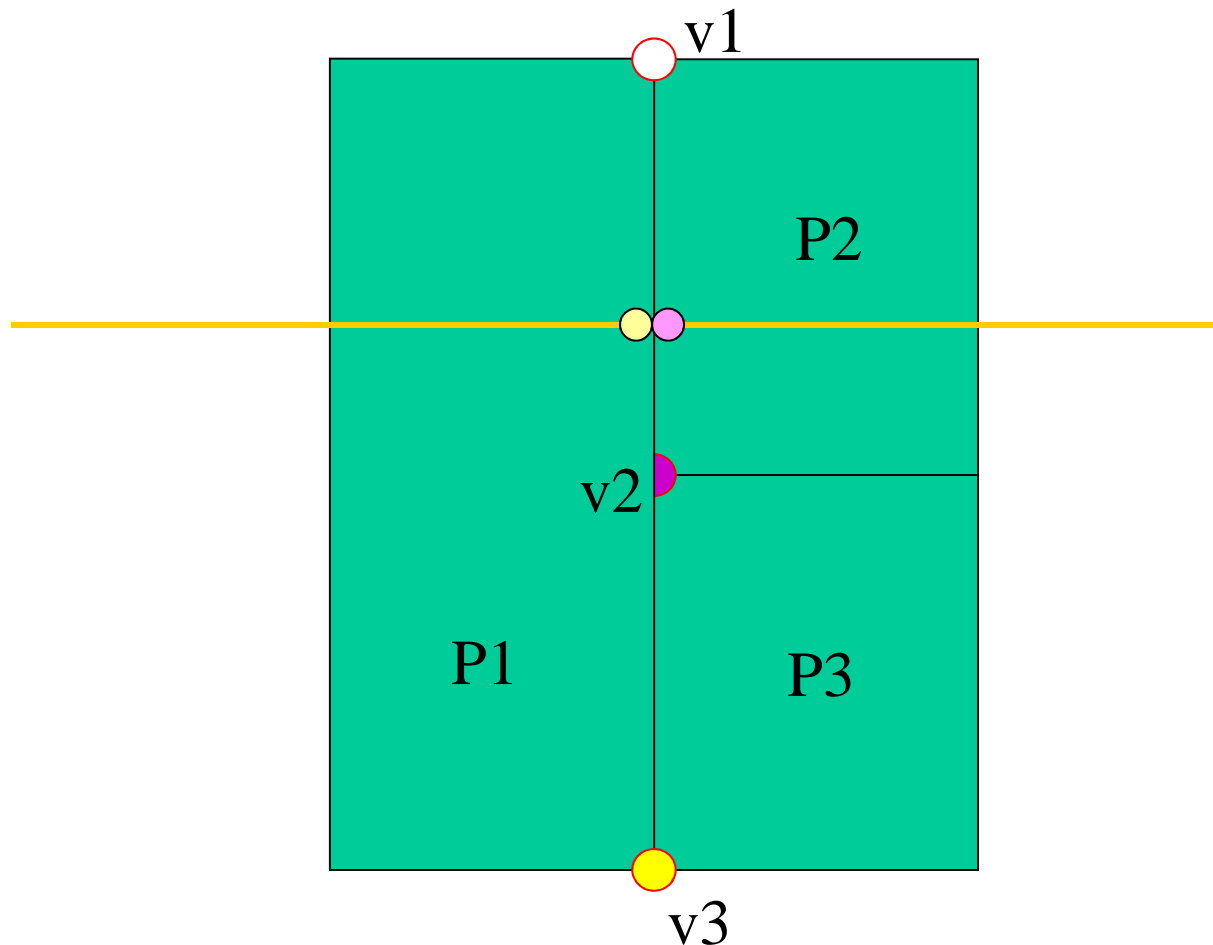
- 3) ***Dependencia de la orientación.*** Las líneas de rastreo son siempre horizontales, pero el polígono interpolado puede cambiar su orientación.



# Problemas con sombreado interpolado

## 4) *Problemas en vértices compartidos.*

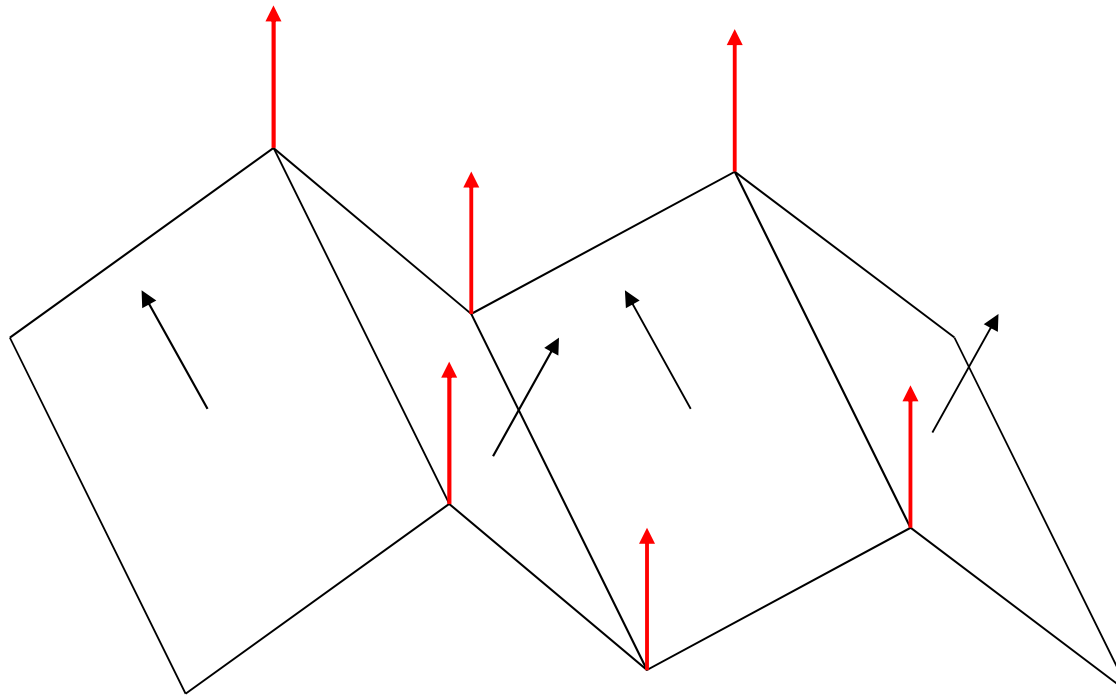
Se genera discontinuidad entre píxeles adyacentes.





# Problemas con sombreado interpolado

## 5) *Normales a vértices que no son representativas.*



# Detalle de superficie

Las superficies vistas son planas o bicúbicas. Las mismas son suaves y uniformes, lo cual no se ajusta a la mayoría de las superficies reales.

Hay algunos métodos para salvar estos detalles faltantes.

**Polígonos de detalle de superficie**

**Correspondencia de Texturas**

**Correspondencia de Protuberancias**

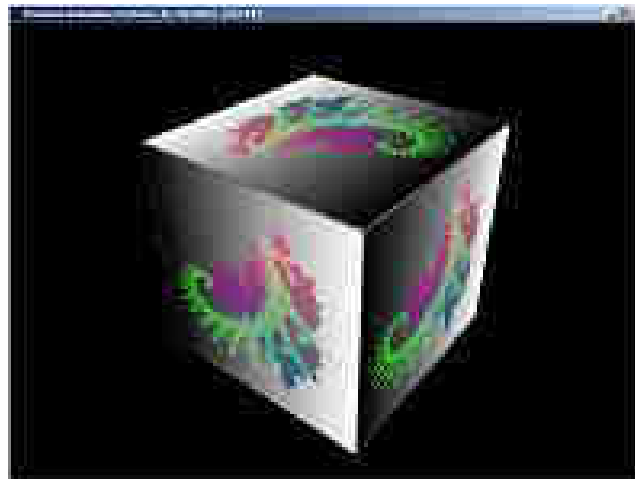
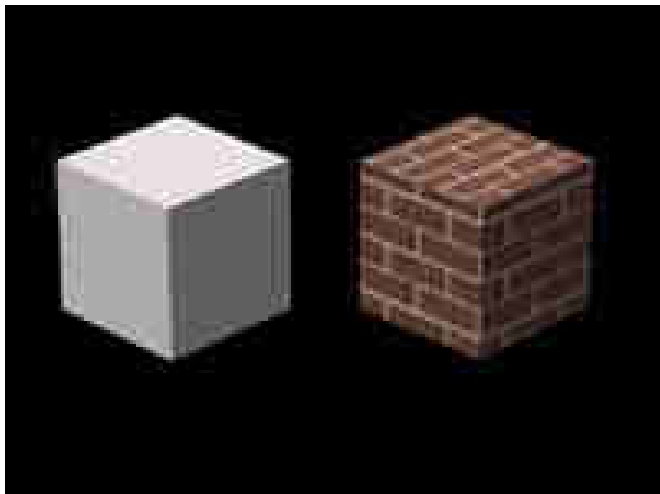
**Otros métodos**

## Polígonos de detalle de superficie

- A la casa del capítulo 6, se le pueden agregar objetos, como ser: ventanas, puertas, letras, etc.
- Esto se hace a través de “polígonos de detalle” asociados a los “polígonos base” (paredes, techo, piso).
- Los “polígonos de detalle” son coplanares con los base.
- Las propiedades de los “polígonos de detalle” tienen prioridad sobre las de los “polígonos base”.
- Al estar asociados al polígono base, se aplica *jerarquía* para el cálculo de las superficies visibles.

# Correspondencia de Texturas (texture mapping o pattern mapping)

- Se establece una correspondencia entre una imagen y una superficie.
- Como alternativa, en lugar de imagen se puede utilizar un procedimiento (o algoritmo).
- Con frecuencia un píxel de pantalla puede estar cubierto por varios elementos de textura (píxeles de la imagen). Hay que trabajar con todos para evitar artefactos de discretización.





(a)



(b)



(c)



(d)



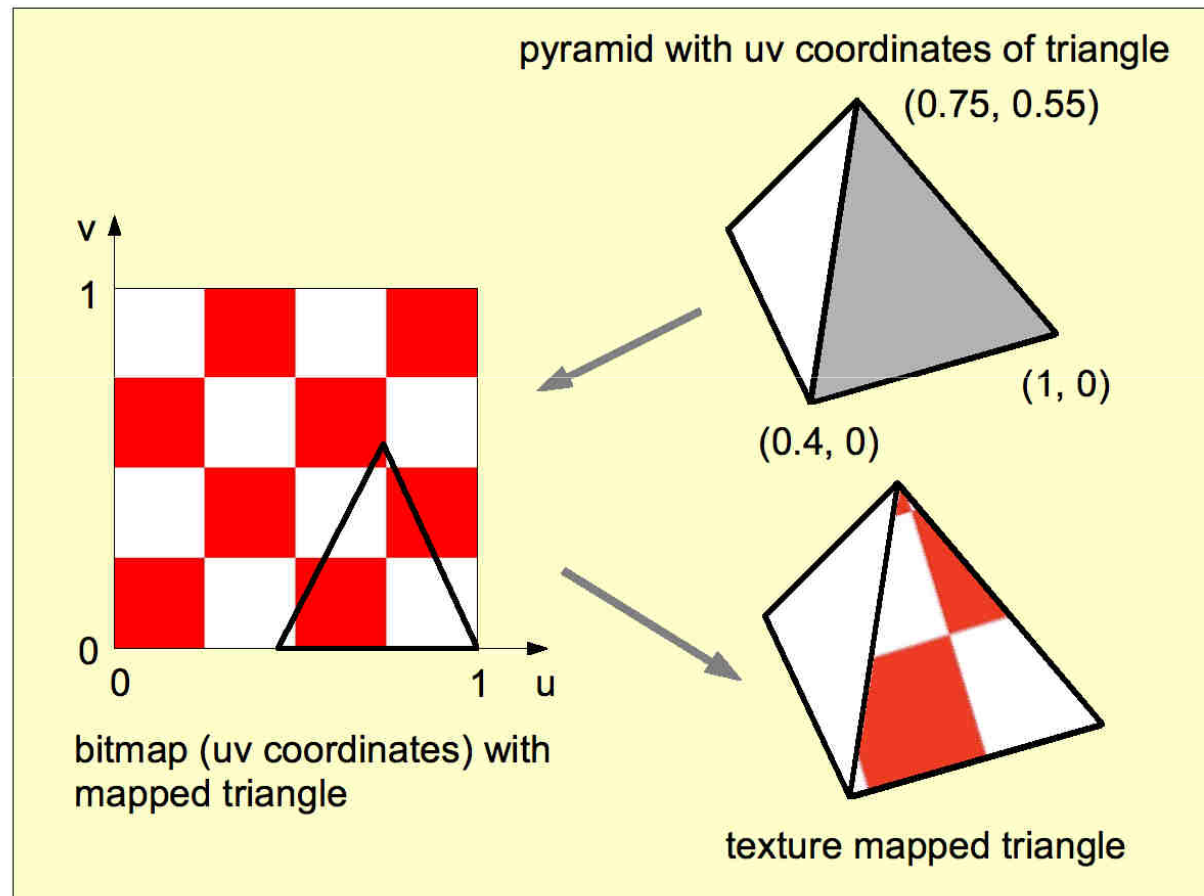
(e)



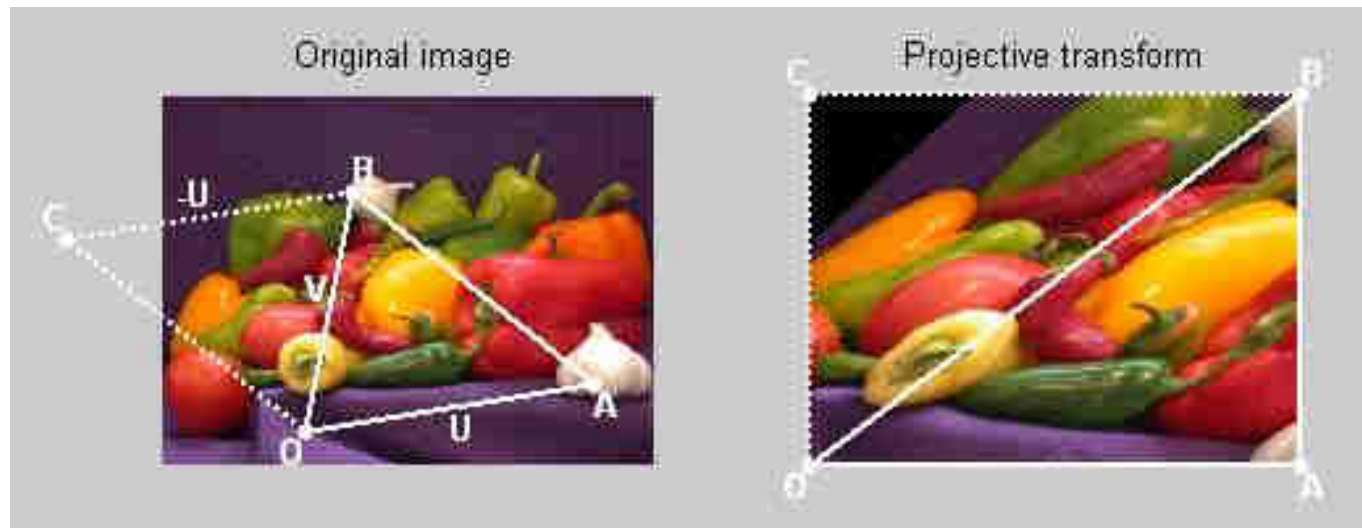
(f)



# Correspondencia de Texturas (texture mapping o pattern mapping)

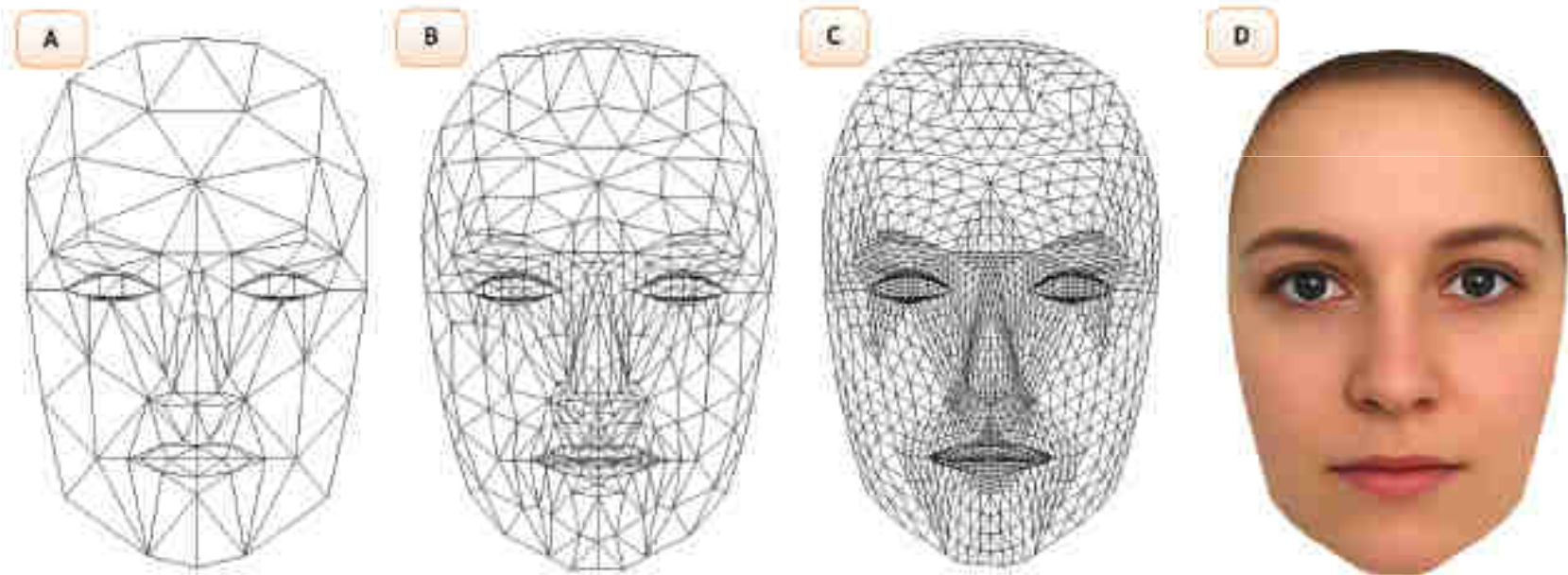


# Correspondencia de Texturas (texture mapping o pattern mapping)





# Correspondencia de Texturas (texture mapping o pattern mapping)



2.



2987 tris.  
Class : Warlord  
Name : Thorgrim  
1024 Diffuse, Specular map



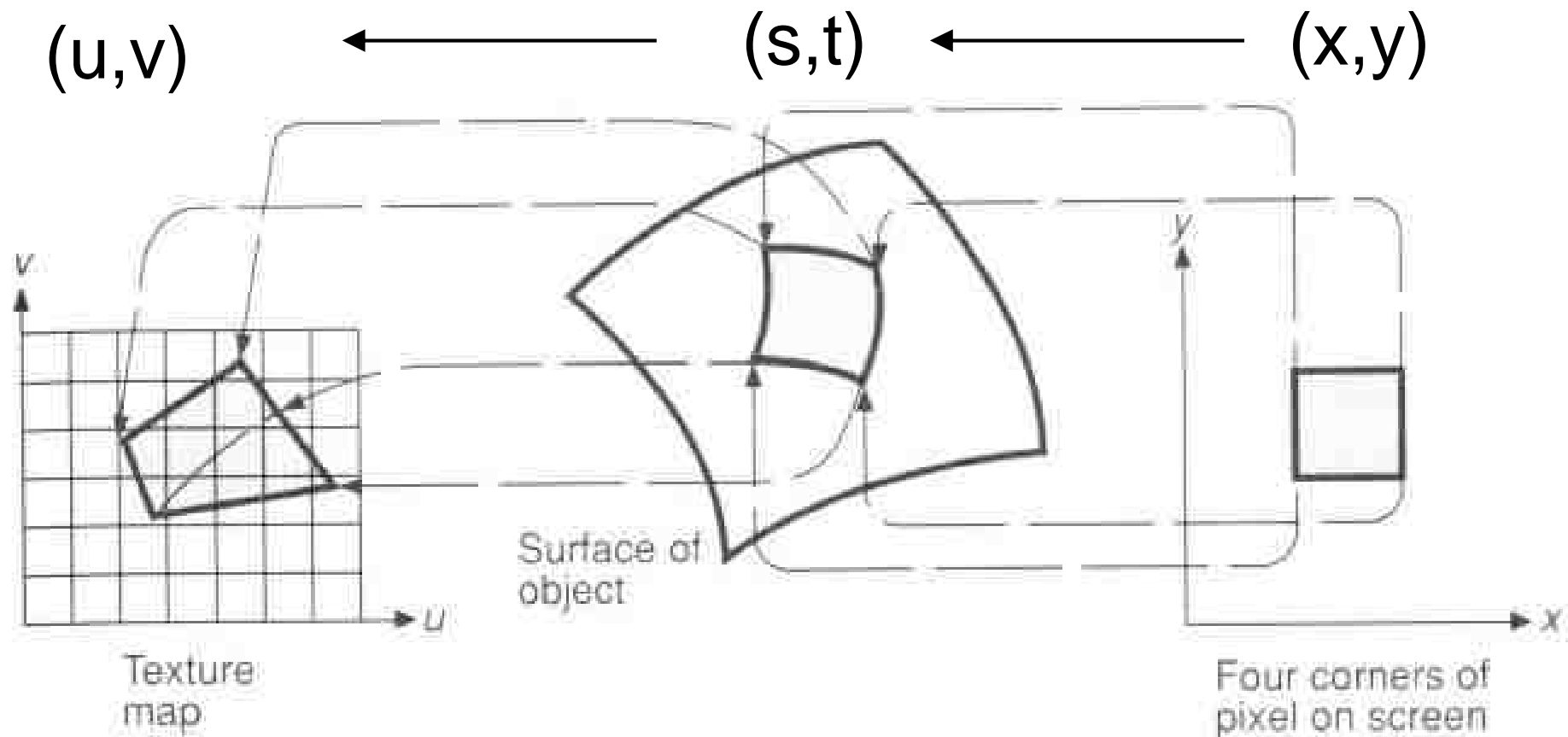
Dominance War V 3D Mini

q2000





# Correspondencia de Texturas (texture mapping o pattern mapping)



# Correspondencia de Texturas (texture mapping o pattern mapping)

- El valor de cada píxel se halla haciendo promedio ponderado, según la porción del elemento de textura que está dentro del cuadrilátero del mapa de textura.
- Si las coordenadas  $(u,v)$  caen fuera de la imagen, se puede duplicar la imagen.
- Se puede hacer corresponder las 4 esquinas del rectángulo de  $(s,t)$  con un cuadrilátero en  $(u,v)$ .
- Si la superficie es un polígono, se asignan coordenadas  $(u,v)$  de mapa de textura directamente a sus vértices. Los valores internos se interpolan de la forma ya vista.
  - Problema: la interpolación causa distorsión en caso de perspectiva.

Detalle de superficie

# Correspondencia de Protuberancias (bump mapping)



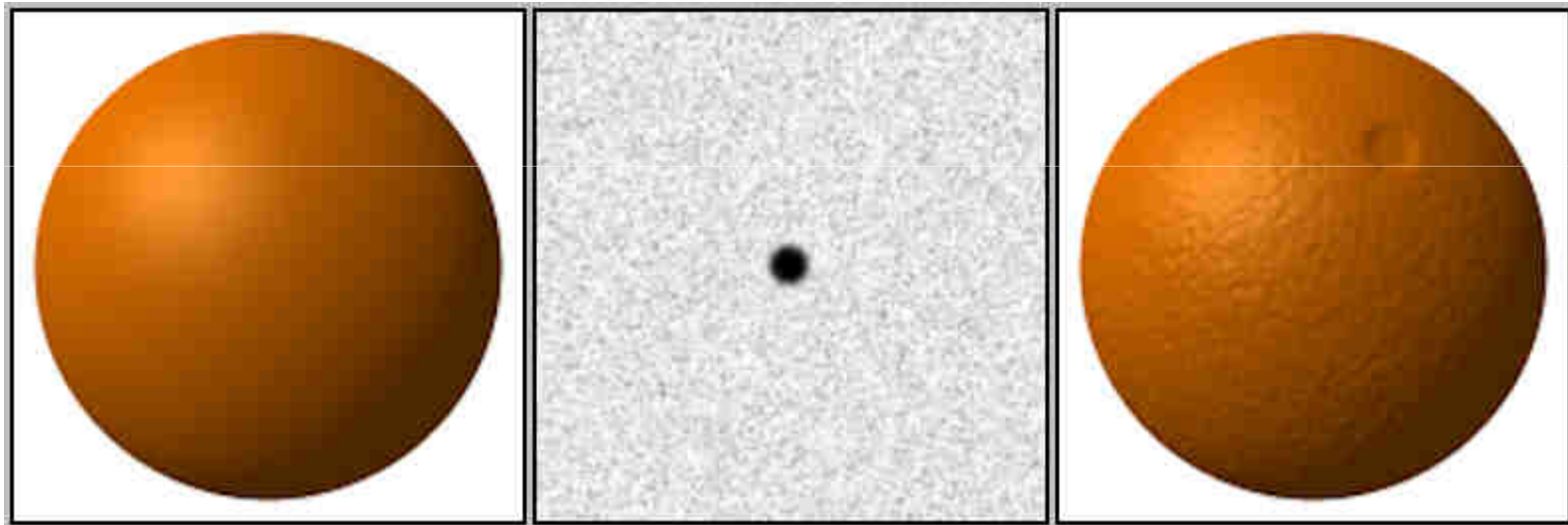
Detalle de superficie

# Correspondencia de Protuberancias (bump mapping)



Detalle de superficie

# Correspondencia de Protuberancias (bump mapping)





# Correspondencia de Protuberancias (bump mapping)

- Se define un array de desplazamientos, usado para simular el desplazamiento de un punto de la superficie un poco encima o debajo de su actual posición.

Dado un punto de la superficie  $P=[x(u,v), y(u,v), z(u,v)]$ , se cumple que, si  $P_u$  y  $P_v$  son las derivadas parciales de  $P$ :

$$N = P_u \times P_v$$

Desplazo  $P$  un valor  $B$  a lo largo de la Normal:

$$P' = P + BN/|N|$$

Una aproximación a la nueva normal  $N'$  es:

$$N' = N + ( B_u(N \times P_v) - B_v(N \times P_u) ) / |N|$$

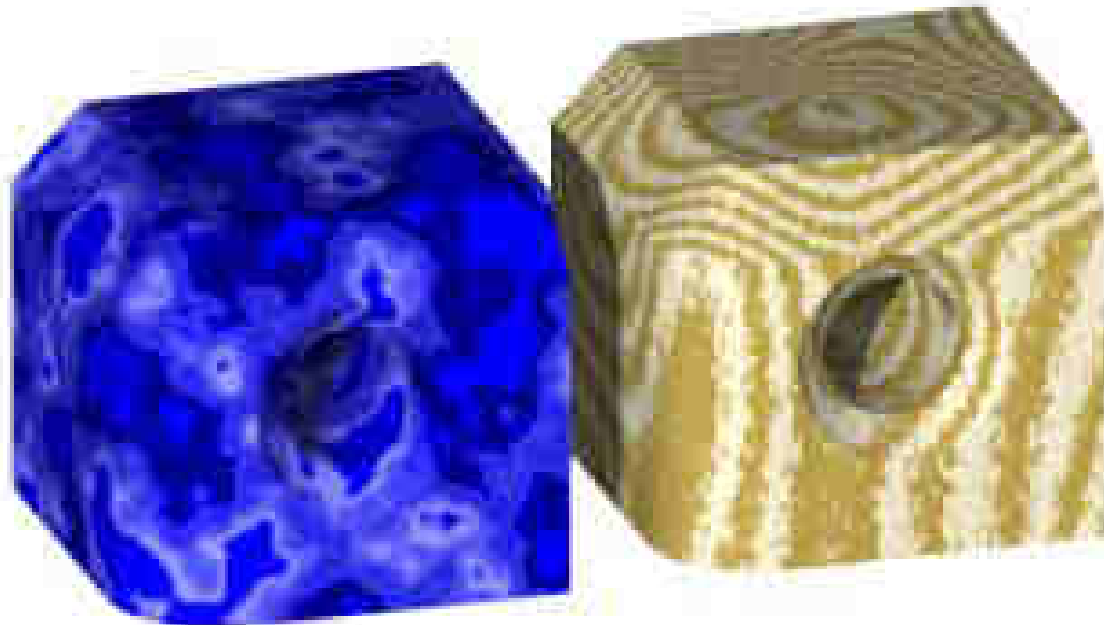
$B_u$  y  $B_v$  son derivadas de  $B$  respecto de  $u$  y  $v$

# Diferencia entre bump mapping y perturbación real de la superficie



## Otros métodos

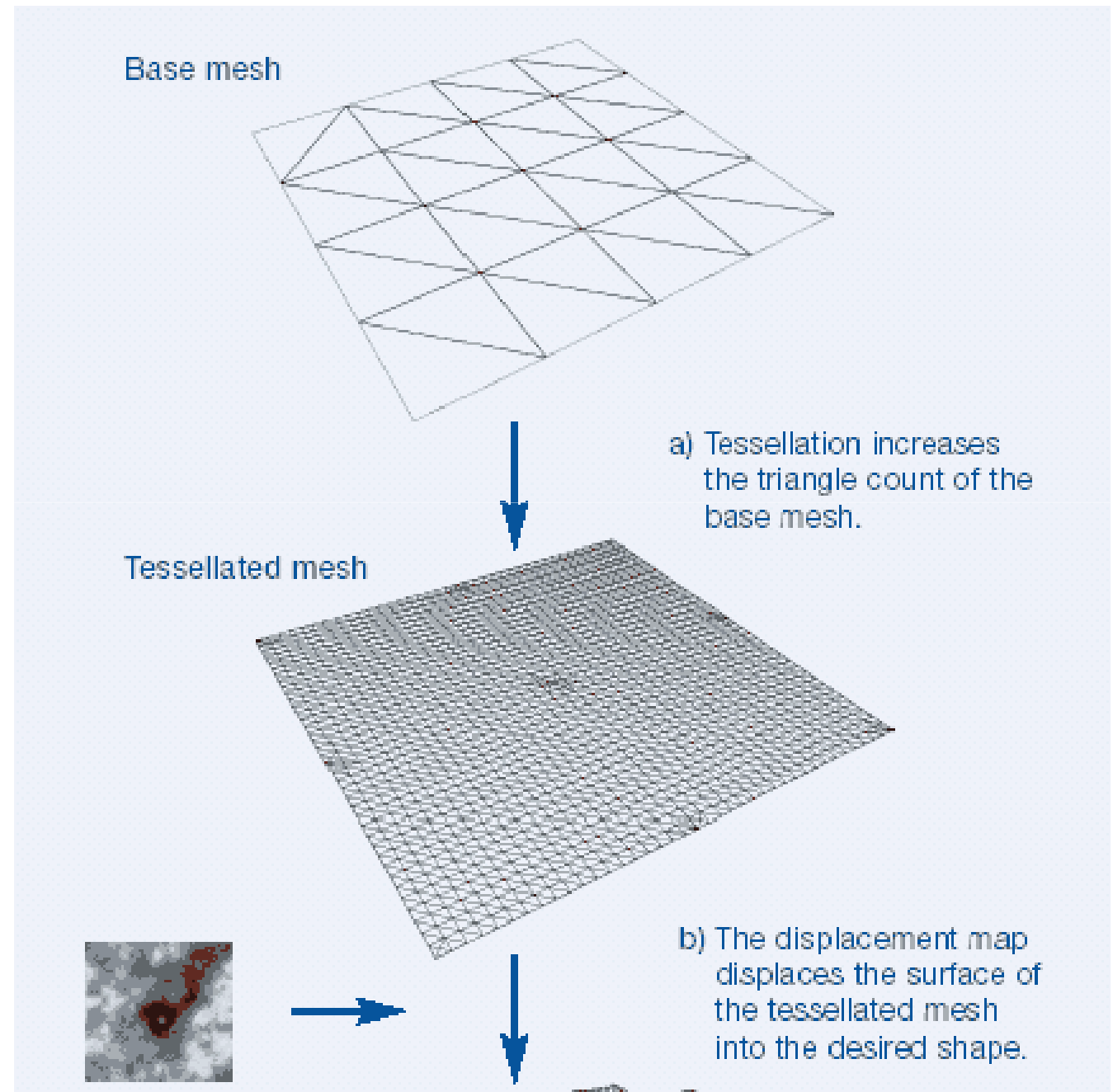
- Texturas tridimensionales permiten mejor simulación de objetos tallados en madera u otros materiales.



# Otros métodos

## Detalle de superficie

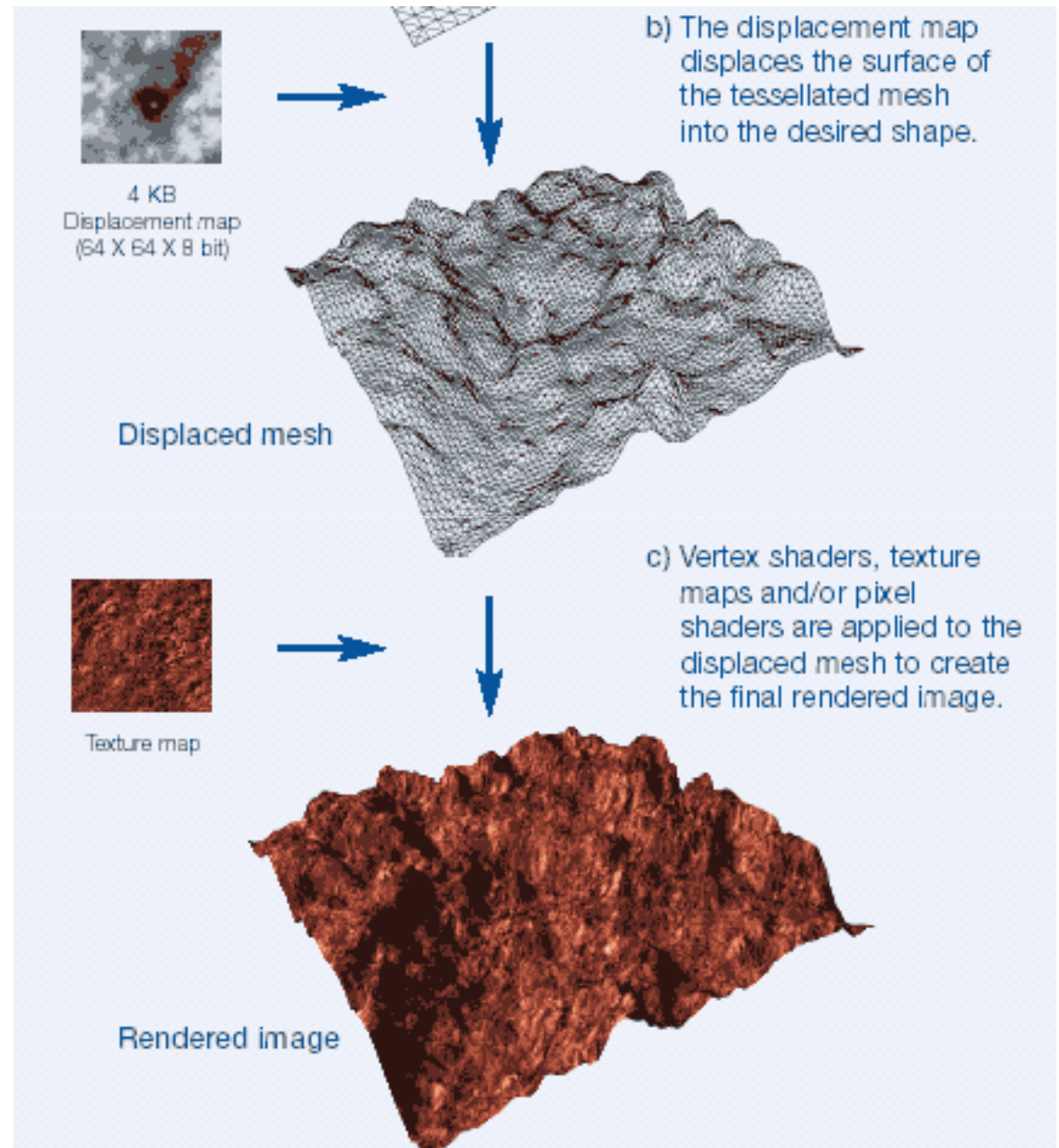
- Correspondencia con otras propiedades de las superficies. Por ejemplo, correspondencia de desplazamiento.



# Otros métodos

## Detalle de superficie

- Correspondencia con otras propiedades de las superficies. Por ejemplo, correspondencia de desplazamiento.



# Sombras

Si la fuente luminosa es puntual, no hay vistas parciales a ella.

$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + \sum_{1 \leq i \leq m} S_i f_{att_i} I_{p\lambda_i} \left[ k_d O_{d\lambda} (\bar{N} \cdot \bar{L}_i) + k_s O_{s\lambda} (\bar{R}_i \cdot \bar{V})^n \right]$$

$S_i = 0$  , si la luz  $i$  está bloqueada en este punto.

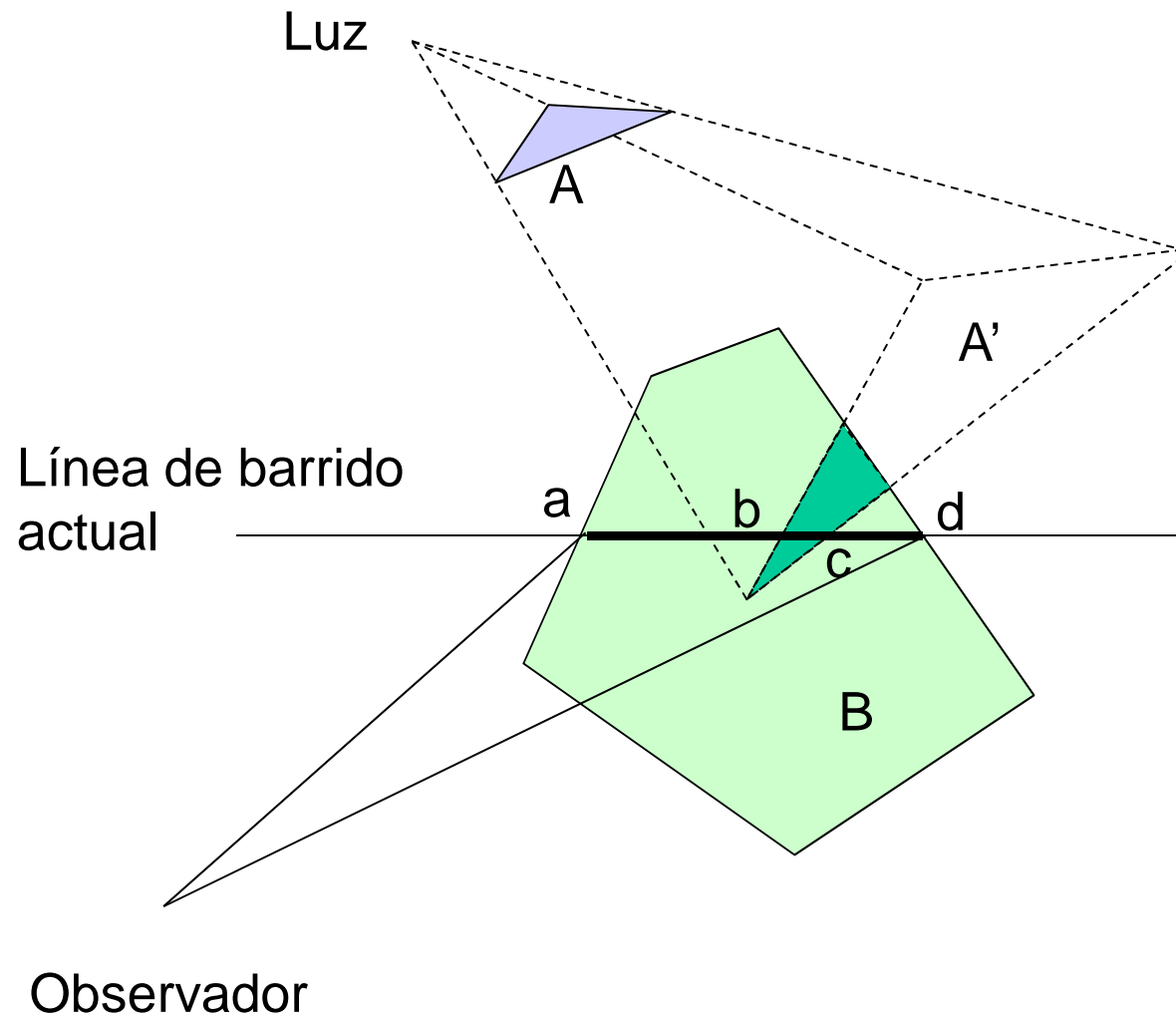
$S_i = 1$ , si la luz  $i$  no está bloqueada en este punto.

## Sombras por línea de barrido

Se pueden combinar los procesamientos de sombras y de superficies visibles.

- La fuente luminosa es el centro de proyección.
- Las aristas de los polígonos se proyectan sobre otros polígonos que intersecten la línea de barrido actual.
- Cuando el barrido cruza una arista de sombra, se cambian los colores de los píxeles de la imagen.

# Sombras por línea de barrido





## Sombras por línea de barrido

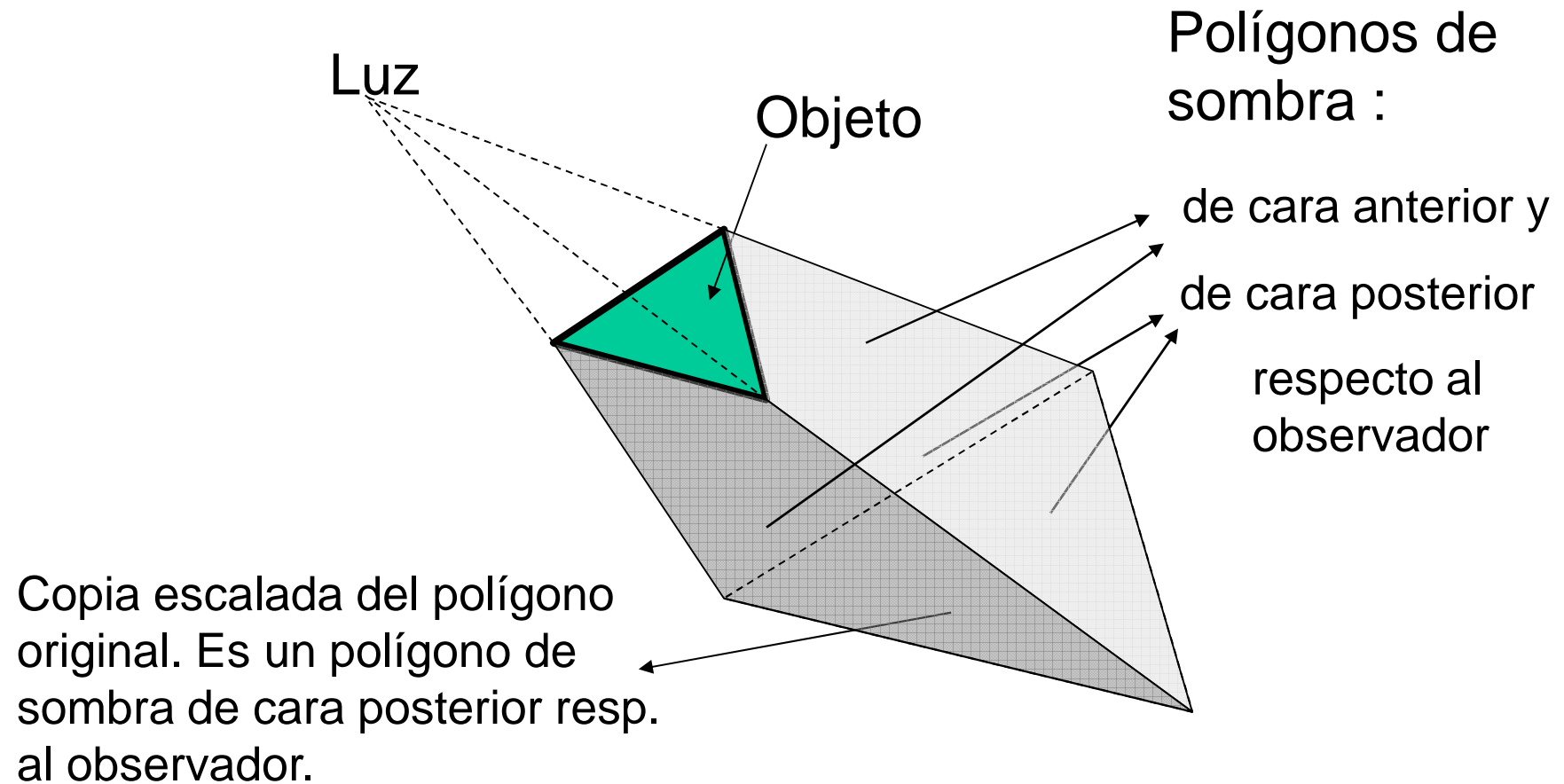
Problema: Si hay  $n$  polígonos  $\Rightarrow$  hay que calcular  $n(n-1)$  proyecciones.

Solución parcial:

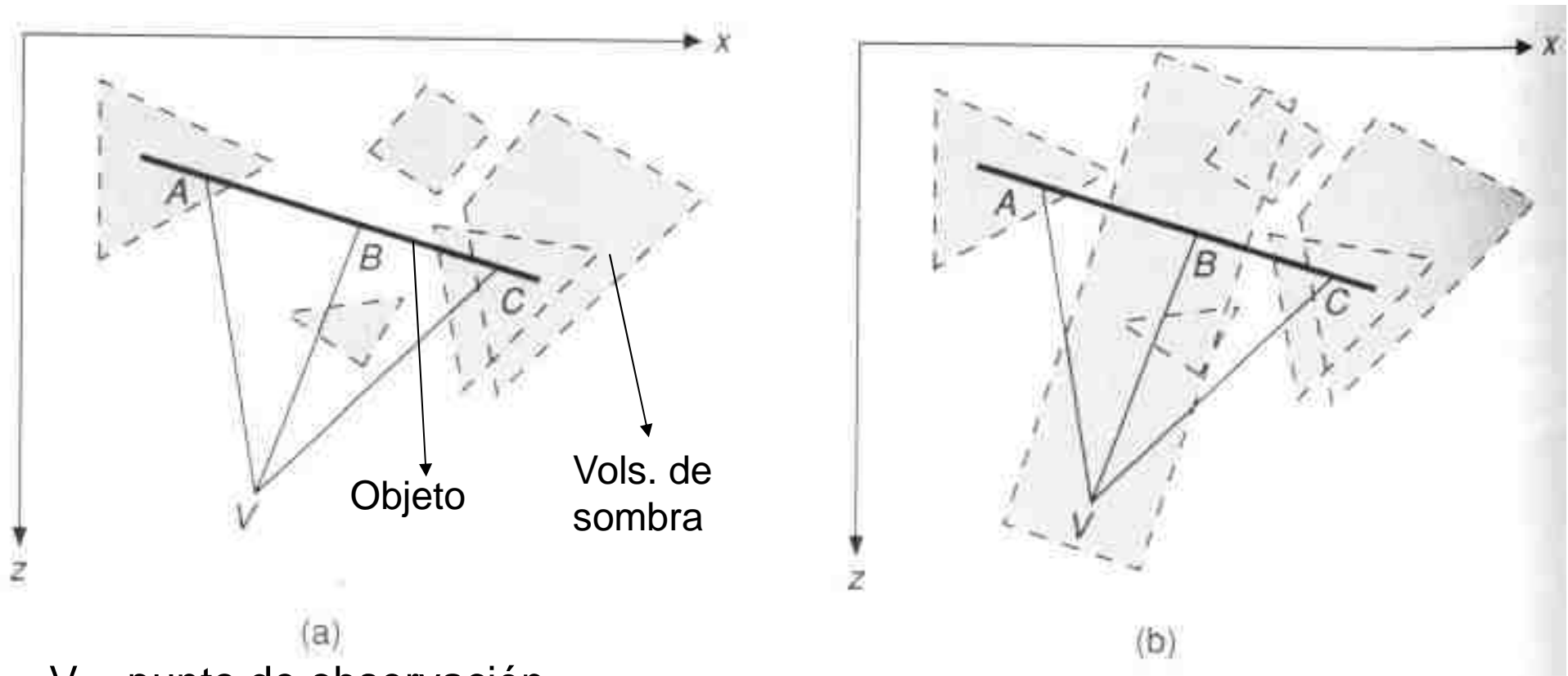
Proyectar los  $n$  polígonos en una esfera de centro la fuente luminosa.

No considerar proyecciones cuyas extensiones no se superpongan + otros casos particulares.

## Volúmenes de sombra



# Volúmenes de sombra



V = punto de observación.

Se trazan rayos desde V. Por cada rayo, hay un contador que suma 1 a cada p. de s. de cara anterior y resta 1 a cada p. de s. de cara posterior. Para muchas fuentes luminosas, hay contadores diferentes.

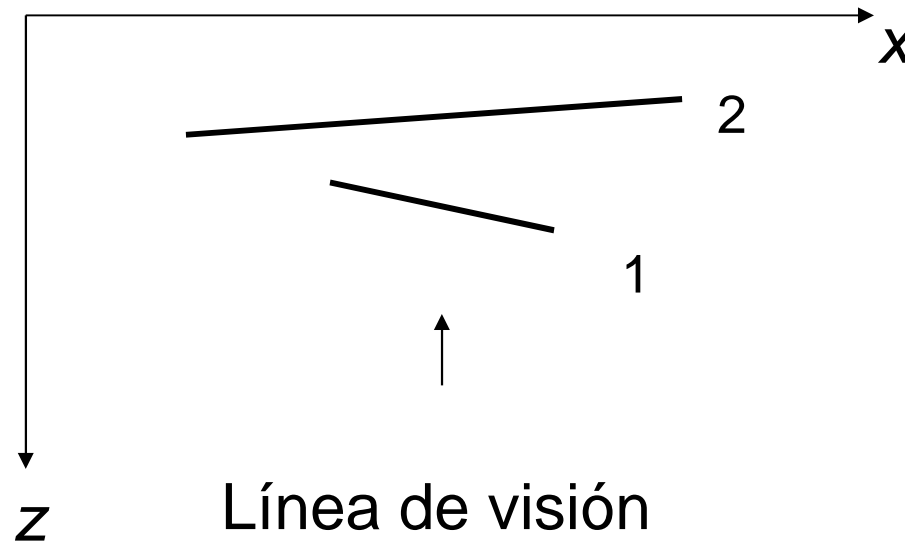
Un punto está bajo sombra si el contador es positivo en él.

# Transparencia

No refractiva y refractiva

# Transparencia no refractiva

## Transparencia interpolada



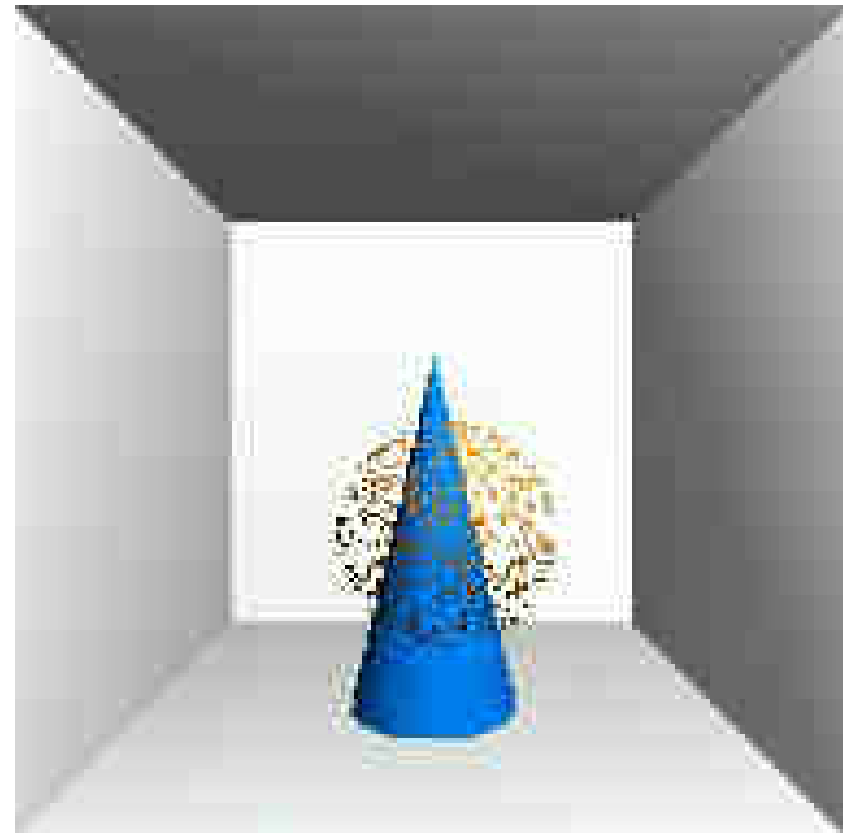
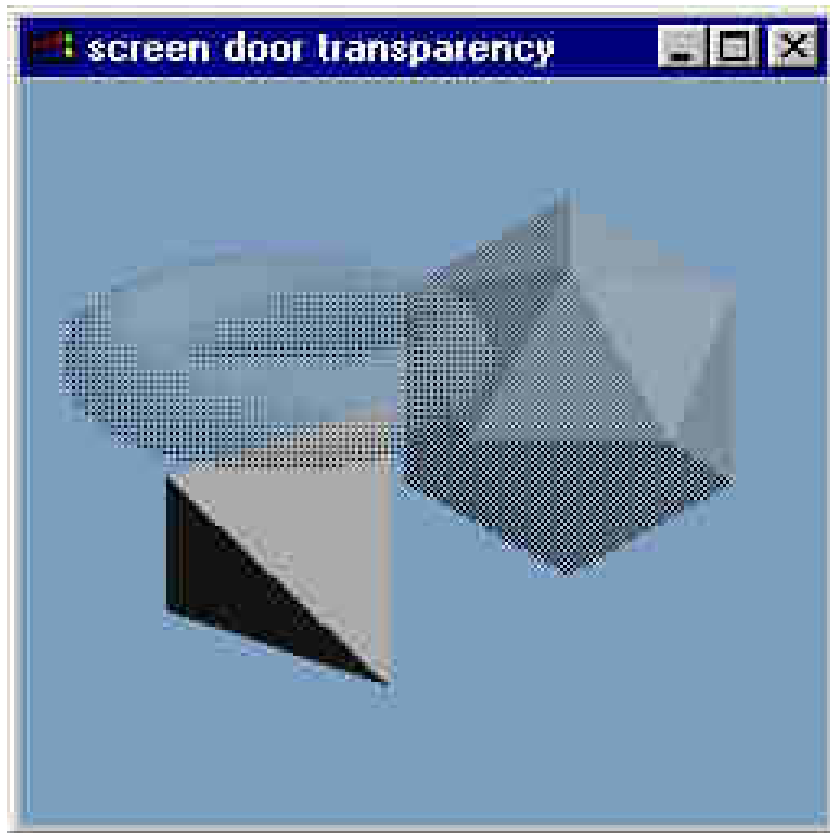
$$I_{\lambda} = (1 - k_{t1})I_{\lambda1} + k_{t1}I_{\lambda2}$$

$k_{ti}$  (coeficiente de transmisión) mide la transparencia del pol.  $i$

# Transparencia no refractiva

## Transparencia de mosquitero (screen-door)

Se implanta una malla que genera solo algunos píxeles relacionados con la proyección del objeto transparente.



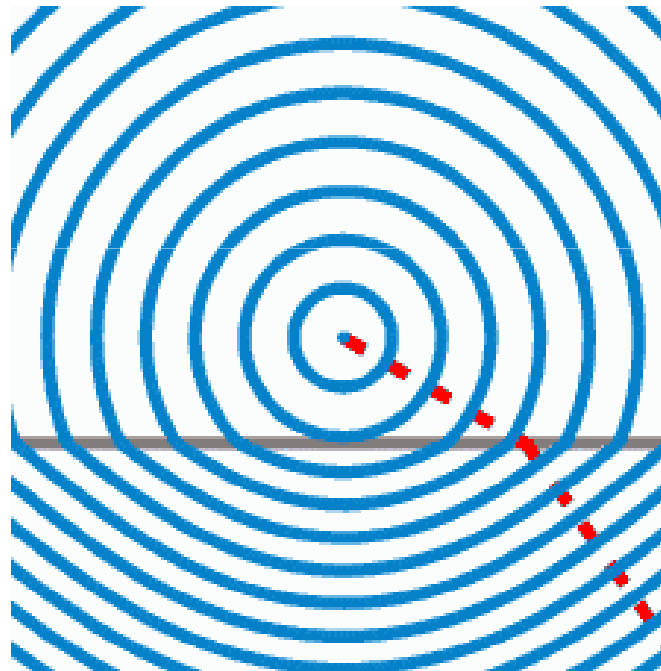
## Transparencia filtrada

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 1} + k_{t1} O_{t\lambda} I_{\lambda 2}$$

$O_{t\lambda}$  es el color de transparencia del polígono 1.

Esta función se puede invocar recursivamente, si hay varios polígonos transparentes superpuestos.

# Transparencia refractiva





# Transparencia refractiva

Línea de visión no refractada (geométrica)

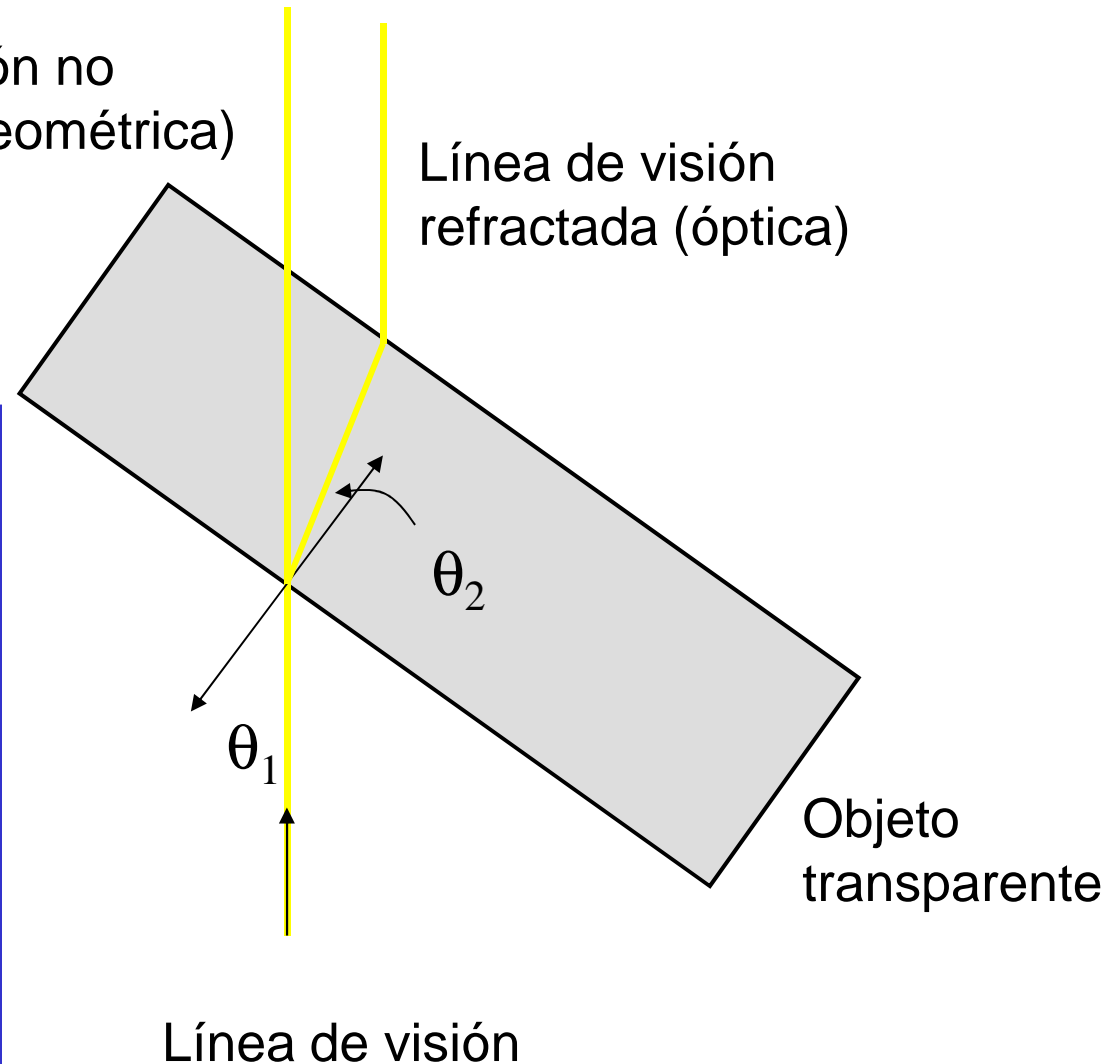
Línea de visión refractada (óptica)

Ley de Snell:

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \eta_2 / \eta_1 ;$$

$\eta_1$  y  $\eta_2$  son los índices de refracción de los materiales.

Los  $\eta$  dependen también de la longitud de onda



# Transparencia refractiva

## (índices de refracción)

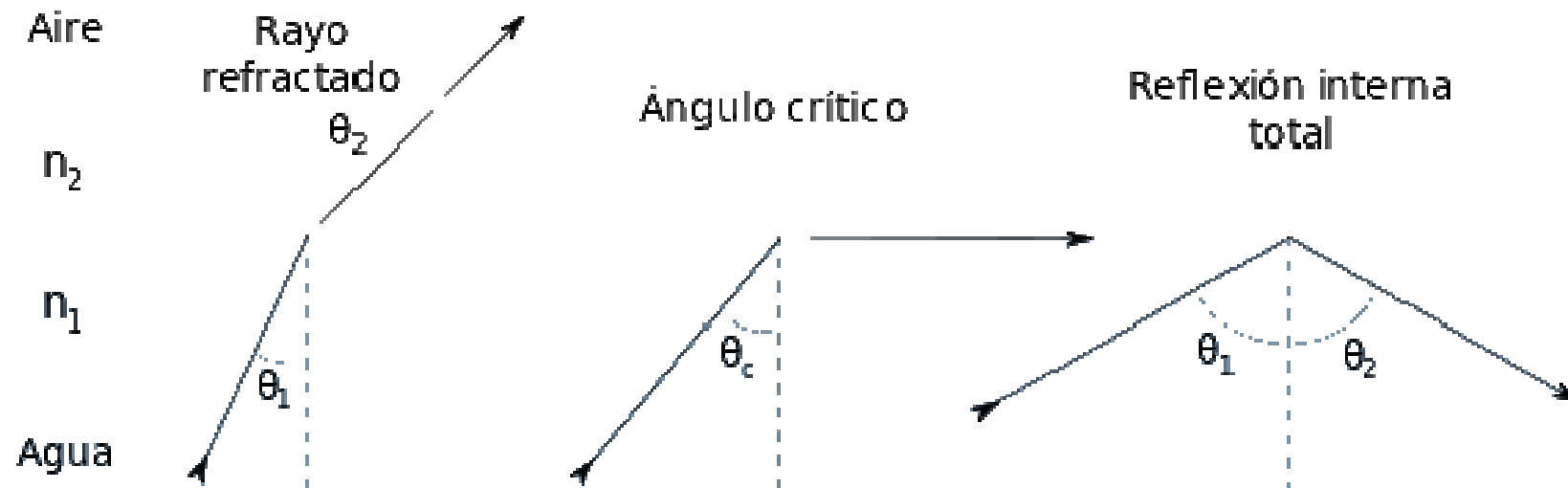
- Vacuum ...1.00000 (exactly)
- Air(STP)... 1.00029
- Acetone ... 1.36
- Alcohol ... 1.329
- Amorphous Selenium ... 2.92
- Calspar1 ...1.66
- Calspar2 ...1.486
- Carbon Disulfide ...1.63
- Chromium Oxide ...2.705
- Copper Oxide ...2.705
- Crown Glass ...1.52
- Crystal ...2.00
- Diamond ...2.417
- Emerald ...1.57
- Ethyl Alcohol ...1.36
- Flourite ...1.434
- Fused Quartz ...1.46
- Heaviest Flint Glass... 1.89
- Heavy Flint Glass ...1.65
- Glass ...1.5
- Ice ...1.309
- Iodine Crystal ...3.34
- Lapis Lazuli ...1.61
- Light Flint Glass ...1.575
- Liquid Carbon Dioxide ...1.20
- Polystyrene ...1.55
- Quartz 1 ...1.644
- Quartz 2 ...1.553
- Ruby ...1.77
- Sapphire ...1.77
- Sodium Chloride(Salt)1 . 1.544
- Sodium Chloride(Salt)2 . 1.644
- Sugar Solution (30%)... 1.38
- Sugar Solution (80%)... 1.49
- Topaz ...1.61
- Water (20 C) ...1.333
- Zinc Crown Glass ...1.517

# Transparencia refractiva

## Reflexión interna total:

Ocurre cuando la luz pasa de un medio (1) a otro (2) con menor índice de refracción ( $n_1 > n_2$ ).

Si el ángulo de incidencia es mayor que  $\theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$ , entonces en lugar de refracción ocurre una reflexión.



# Transparencia refractiva

## Reflexión interna total:

Ocurre cuando la luz pasa de un medio (1) a otro (2) con menor índice de refracción ( $n_1 > n_2$ ).

Si el ángulo de incidencia es mayor que  $\theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$ , entonces en lugar de refracción ocurre una reflexión.

