

La Naturaleza de la Luz

La naturaleza de la luz ha intrigado al hombre desde los tiempos más remotos. La luz en la antigüedad: **Demócrito** consideraba a la luz como un flujo de partículas que partían de los focos de luz. Para **Pitágoras** la visión de los objetos se producía porque los ojos emitían una especie de rayos de luz que, a modo de tentáculos, se propagaban hacia los objetos. La luz en la ciencia: **Huygens** considera a la luz como una onda y con esta teoría explica todas las propiedades conocidas en la época. Sin embargo, Newton consideraba la luz como una corriente rectilínea de pequeñas partículas materiales emitidas por los cuerpos luminosos. Ello explicaba la propagación rectilínea de la luz. También explicaba la reflexión mediante rebote de esas partículas sobre la superficie.

Actualmente se acepta que la luz tiene doble naturaleza: se comporta como materia en movimiento (tiene naturaleza de partícula) y como onda que se propaga asociada a la materia (tiene naturaleza ondulatoria). El carácter material de la luz ha sido confirmado por numerosos experimentos, como el "efecto fotoeléctrico" de **Einstein**, el cual llamó cuantos de luz (fotones) a dichas partículas. Esta teoría explica el porqué la luz se puede transmitir por el vacío, mediante movimiento de los fotones. **Louis De Broglie** concluye que

"la luz, cuando se propaga se comporta como una onda, pero cuando interacciona con la materia se comporta como una partícula".

La luz consiste de *paquetes de energía* que fluyen constantemente del sol en todas direcciones. A esos paquetes se les llama '**fotones**'. Cada fotón es una entidad discreta de radiación electromagnética con una frecuencia de vibración de campo electromagnético y longitud de onda característicos. Tanto la **longitud de onda** como la **frecuencia** están directamente relacionadas con la energía de un fotón. Así, al comparar dos fotones, aquel que presenta la mayor frecuencia de vibración tendrá una mayor energía. Debido a que es más fácil medir la longitud de onda que la frecuencia de vibración de campo, la energía de la luz es usualmente descrita en términos de longitud de onda. Para la luz visible, las unidades de medida más comunes son los nanómetros, nm, (10^{-9} metros). A menor longitud de onda, mayor es la frecuencia y mayor también la energía de un fotón. En el vacío del espacio exterior, todos los fotones viajan a la misma velocidad, sin importar su nivel de energía.

La radiación electromagnética es producida en una gran variedad de longitudes de onda, las cuales contribuyen a la energía total de cada paquete o fotón. La luz visible (aquella que puede ser detectada por el ojo humano) se encuentra en el rango de los 400 a los 700 nm

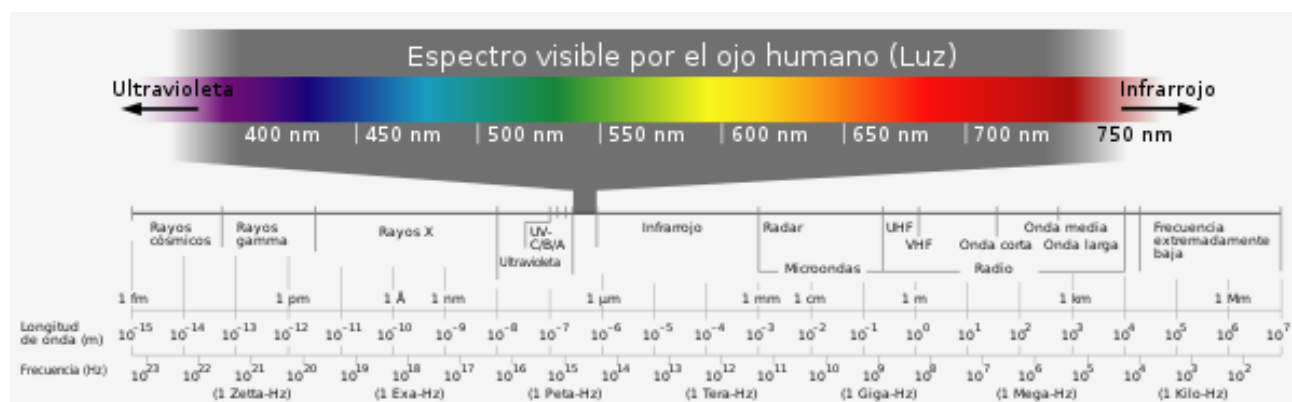


Figura 1, Longitudes de onda; obsérvese que las escalas de las longitudes de onda representadas han sido deliberadamente exageradas para los fines demostrativos del diagrama.

La radiación electromagnética de la luz ultravioleta, los rayos X y la radiación gamma presentan longitudes de onda menores que la luz visible. Eso significa que este tipo de radiaciones contienen mas energía; ello las hace potencialmente más dañinas para las moléculas y tejidos biológicos, razón por la cual se les

considera peligrosas para la salud. Las radiaciones electromagnéticas con longitudes de mayores a 700 nm incluyen la luz infrarroja, las microondas, los radares, y las ondas de transmisión de TV y radio; estas radiaciones tienen menor energía y por lo tanto son potencialmente menos dañinas para las moléculas y los tejidos biológicos.

Dentro del rango luminoso visible de los 400 a los 700 nm, el ojo humano es capaz de distinguir diferentes longitudes de onda a las que les asignamos los nombres de diferentes colores. Un ejemplo puede ser un arcoiris en el que la luz visible es refractada en las diferentes longitudes de onda que la componen. Los colores visibles son rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul claro, azul oscuro y morado. Cada color tiene una diferente longitud de onda, aunque los colores naturales raramente están compuestos de una sola longitud de onda. Algunos ejemplos comunes de colores con una sola longitud de onda son la luz que refleja la tela nueva de mezclilla azul oscuro (aproximadamente 460 nm), la luz reflejada por un pasto vigoroso (~ 550 nm) y la luz anaranjada de las lámparas de vapor de sodio usadas para iluminar algunas calles (~ 595 nm).

Actualmente es aceptada la teoría dual de la luz, sin embargo muchos fenómenos relacionados con la luz son explicados con el carácter ondulatorio de la luz que acorde con las ideas de Maxwell, un rayo de luz está compuesto de un tren de ondas electromagnéticas donde el campo eléctrico \mathbf{E} y el campo magnético \mathbf{B} son siempre perpendiculares como lo muestra la Figura 2.

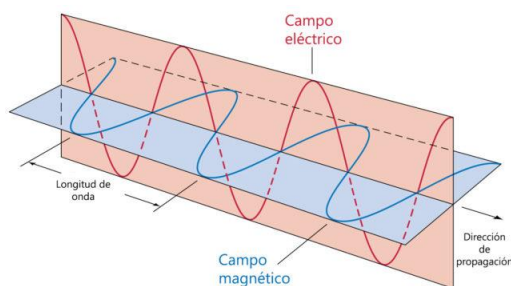


Figura 2.- El plano de los vectores de campo eléctrico \mathbf{E} es perpendicular a los vectores de campo magnético \mathbf{B} .

En la figura, se puede observar el significado de la longitud de onda, como la distancia entre dos crestas de la onda. Cabe mencionar que la luz que proviene del sol y de otras fuentes de luz se propaga en todas direcciones y que no necesariamente la dirección del campo eléctrico es siempre perpendicular al piso, sino que puede estar orientado a cualquier ángulo con respecto a la normal al piso. Un rayo de luz que tiene estas características se dice que es un rayo de luz no polarizada (véase Figura 3).



Figura 3.- Luz no polarizada

Fuentes de Luz

Sin duda nuestra estrella, el sol, es una de las fuentes de luz más importante en la biosfera de nuestro planeta. La luz solar se origina en las entrañas del sol mediante reacciones de fusión nuclear en donde se convierten 400,000 toneladas de H_2 en He cada segundo, produciendo en cada transmutación un fotón de luz (véase Figura 4)

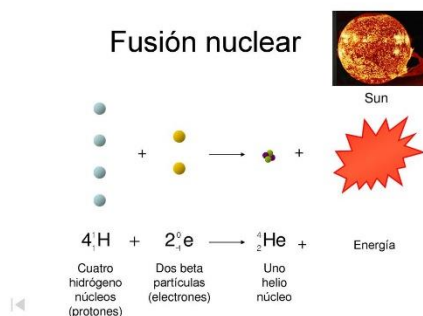


Figura 4. Esquema que muestra el proceso de reacción termonuclear para producir fotones de luz en el sol.

Otras Fuentes de Luz

Para que se lleve a cabo el proceso de combustión de algunas sustancias (sólidas, líquidas o gaseosas) son necesarias dos tipo de sustancias: comburente (combustible) y oxidante (que generalmente es el oxígeno (O_2) del aire), para ello es necesaria una pequeña cantidad de energía calorífica producida por una chispa (que puede ser producida a su vez por la fricción mecánica), los productos de la combustión de sustancias orgánicas que contienen generalmente carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno pueden ser de naturaleza diversa (dependiendo de la complejidad de las moléculas orgánicas como combustible), se pueden producir vapor de agua y gases como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO_2) etc. produciendo además en las reacciones químicas la emisión de fotones de luz.

Combustión de la madera en una fogata

Sin duda uno de los descubrimientos más importantes en la historia del ser humano fue el fuego logrado por fricción. Las moléculas de la celulosa que es la sustancia básica que conforman las fibras de la madera se descomponen esencialmente en CO_2 , vapor de agua y en fotones de luz (véase Figura 5)

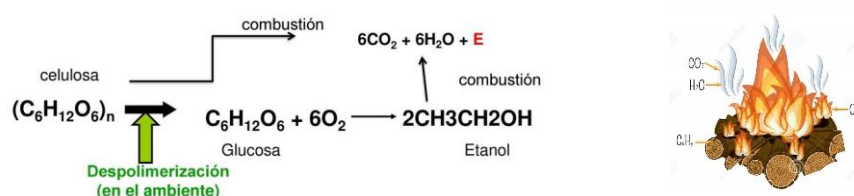


Figura 5.- Combustión de la madera

Combustión de una vela

Las velas comunes, generalmente están formadas por un hilo de nylon o de algodón trenzado llamado pabilo y de cera proveniente de las parafinas derivadas del petróleo y de ceras naturales como ésteres de ácido palmítico y alcoholes $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$ de peso molecular elevado $\text{C}_{30}\text{H}_{61}\text{OH}$. Estas sustancias al comenzar el proceso de combustión se descomponen finalmente en CO_2 , vapor de agua y en fotones de luz (véase Figura 6)

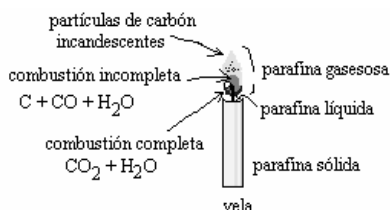


Figura 6.- Combustión de una vela

Combustión del metano

Existen innumerables sustancias que pueden servir como combustibles para llevar a cabo la producción de luz mediante el proceso de combustión, aunque no es la más adecuada debido a la poca intensidad de luz producida. Cualquier sustancia orgánica que produzca fuego al quemarse producirá una cierta cantidad de luz. Tales combustibles pueden ser el metano, el propano, los alcoholes etc. (véase Figura 7)



Figura 7.- a) Combustión del gas metano; b) Combustión del gas propano (gas doméstico)

Luminarias

La luz puede producirla la tecnología hecha por el ser humano, desde la invención de la bombilla, muchas luminarias de diferentes tipos se han desarrollado, pero todas tienen en común algo: la conversión de la energía eléctrica en energía luminosa y calor. Basicamente una luminaria es un dispositivo en el que se hace pasar una corriente eléctrica medida en Amperes (A) para producir una cantidad de energía luminosa. Generalmente la parte eléctrica suele referir a la potencia suministrada a la luminaria en Watts (W) también conocido como vatios.

Luminotecnica

La *luminotecnica* es la técnica que estudia las distintas formas de producción de la luz (artificial), así como su control y aplicación para fines específicos.

Principales magnitudes fotométricas

Flujo Luminoso. Flujo luminoso es la cantidad total de iluminación emitida por una fuente de luz en una unidad de tiempo, la unidad de medida es el **lumen** (lm). También se le puede definir como el caudal o potencia de la radiación luminosa que es emitida por dicha fuente de luz. Se utiliza para indicar la cantidad de luz manifestada en una superficie o para señalar la reproducción luminosa de una fuente. El flujo luminoso se simboliza con la letra griega Φ



Tecnología	Flujo luminoso
Lámpara incandescente de 60W	730 lm
Lámpara fluorescente de 36W	3.200 lm
Lámpara halógena de 1000W	22.000 lm
Lámpara de vapor de mercurio de 125W	5.600 lm
Lámpara de sodio de 1000W	120.000 lm

Eficacia luminosa.- La eficacia luminosa describe el rendimiento de una lámpara. Se expresa mediante la relación del flujo luminoso entregado, en lúmenes y la potencia consumida P , en Watts (vatios). El valor teórico máximo alcanzable con una conversión total de la energía a 555 nm sería 683 lm/W. Las eficacias luminosas realmente alcanzables varían en función del manantial de luz, pero quedan siempre por debajo de este valor ideal. La eficacia luminosa puede expresarse mediante la relación:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

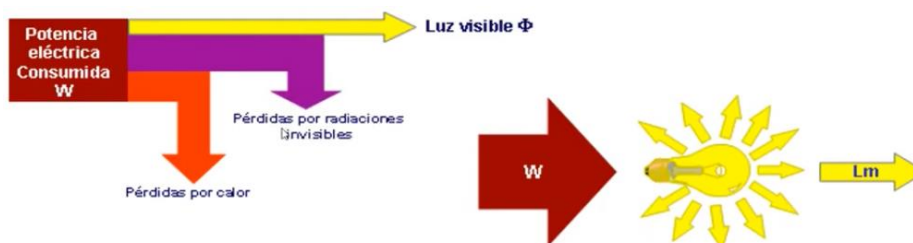


Figura 8.- Gran parte de la potencia suministrada se pierde como rayos infrarrojos y calor

En la práctica, gran parte de la potencia eléctrica que se convierte en energía luminosa se pierde como radiación infrarroja (invisible al ojo humano) y por calor. Las siguientes tablas muestran rendimientos de algunas luminarias que se usan comúnmente

Tipo de lámpara	Potencia	Rendimiento luminoso
	nominal [W]	lm/W
Incandescente común 40 W/220V	40	11
Fluorescente L 40 W/20	40	80
Mercurio de alta presión 400 W	400	58
Halogenuros metálicos 400 W	360	78
Sodio a alta presión 400 W	400	120
Sodio a baja presión 180 W	180	183

LÁMPARA INCANDESCENTE	LÁMPARA HALÓGENA	FLUORESCENCIA COMPACTA	LED MR16 / AR111
1.000 horas	3.000 horas	10.000 horas	30.000 horas
15W / 100 lm	10W / 140 lm	3W / 150 lm	1W / 75 lm*
60W / 710 lm	35W / 600 lm	12W / 650 lm	7W / 750 lm*
75W / 1100 lm	50W / 910 lm	18W / 1150 lm	10W / 1100 lm*
100W / 1600 lm	75W / 1450 lm	23W / 1600 lm	15W / 1400 lm*

Intensidad luminosa.- Se define como la medida de potencia ponderada por la longitud de onda emitida por una fuente de luz en una dirección en específico por unidad de ángulo sólido. También se puede definir como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido. En cuanto a su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es la **candela** (cd). Matemáticamente, su expresión es la siguiente:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Donde Φ es el flujo luminoso y Ω es el ángulo sólido en estereorradianes (sr)

Al igual que otras unidades base del SI, la candela tiene una definición operativa: se define como la descripción de un proceso físico que producirá una candela de intensidad luminosa. Una candela se define como la intensidad luminosa de una fuente de luz monocromática de 540 THz que tiene una intensidad radiante de 1/683 vatios por estereorradián, o aproximadamente 1,464 mW/sr. La frecuencia de 540 THz, que tiene una intensidad radiante de 1/683 vatios por estereorradian en una dirección dada, además, la medida corresponde a una longitud de onda

de 555 nm, que se corresponde con la luz verde pálida en la región de máxima sensibilidad cromática del ojo. Cabe señalar que es aceptada la conversión de W a cd como: $1\text{ W} = 1.1\text{ cd}$

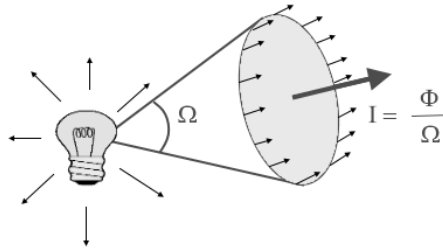


Figura 9.- Esquema que muestra el significado de la intensidad luminosa y el ángulo sólido

Con la ayuda de un fotogoniómetro, en un laboratorio, se calcula la intensidad de la fuente en todas direcciones del espacio. Como resultado, la intensidad queda definida por un conjunto de vectores (I) si se unen todos los extremos de los vectores generan un sólido llamado *sólido fotométrico* (Fig. 10a). Si se corta el sólido fotométrico con un plano que pase por el eje de simetría, se obtiene la curva fotométrica de la fuente de luz que representa la intensidad luminosa de la fuente de luz para cualquier dirección (Fig. 10b).

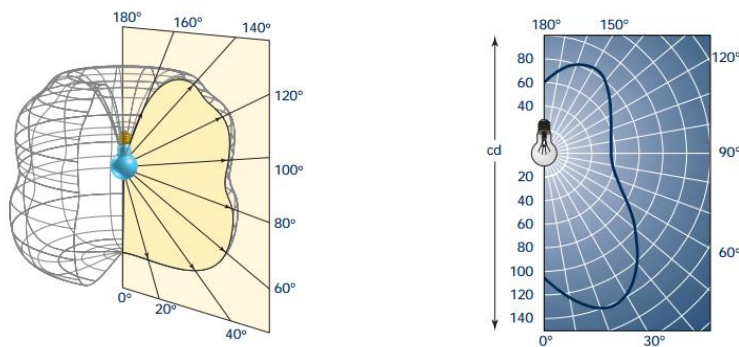


Figura 10.- a) Sólido fotométrico; b) Curva fotométrica

Iluminancia.- La iluminancia es un índice representativo de la *densidad del flujo luminoso* sobre una superficie. Se define como la relación entre el flujo luminoso que incide sobre una superficie y el tamaño de esta superficie. A su vez la iluminancia no se encuentra vinculada a una superficie real, puede ser determinada en cualquier lugar del espacio. La iluminancia se puede deducir de la intensidad luminosa. Al mismo tiempo disminuye la iluminancia con el cuadrado de la distancia de la fuente de luz (*ley de la inversa del cuadrado de la distancia*). Su unidad es el *lux*. ($1\text{ lux} = 1\text{ lm/m}^2$)

Concretamente, la iluminancia se puede definir como el flujo luminoso incidente por unidad de superficie iluminada:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

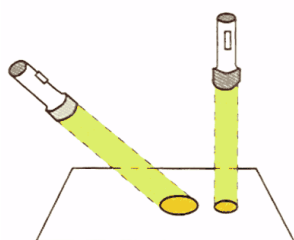
Donde Φ : Flujo luminoso que llega a la superficie (lm), S: superficie a iluminar (m^2) y E: Iluminación en la superficie (lux).

Ley de Lambert.- La iluminancia es directamente proporcional a la intensidad de la fuente luminosa, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente de luz y la superficie

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Cuando la intensidad luminosa no es perpendicular a la superficie iluminada entonces:

$$E = \frac{I}{d^2} \cos(\alpha)$$



Clases de local	Iluminancia en lux
Zonas comunes de edificios	100
Escaleras, lavabos, almacenes	150
Aulas y laboratorios docentes	400
Bibliotecas y salas de estudio	500
Oficinas normales	500
Delineación, diseño	750
Comercio tradicional	500
Grandes superficies, Supermercados	750
Industria con requerimiento visual limitado	300
Industria con requerimiento visual normal	750
Industria con requerimiento visual especial	1500
Dormitorios de viviendas	150
Cuartos de aseo de viviendas	150
Cuarto de estar de viviendas	300
Cuartos de estudio de viviendas	500

Iluminancia	Abr.	Ejemplo
0,000008 lux	8 μlx	Luz de la estrella Sirio (Vista desde la tierra)
0,0001 lux	100 μlx	Cielo nocturno nublado (luna nueva)
0,001 lux	1 mlx	Cielo nocturno despejado, luna nueva
0,01 lux	10 mlx	Cielo nocturno despejado (cuarto creciente ó menguante)
0,25 lux	250 mlx	Luna llena en una noche despejada
1 lux	1 lx	Luna llena a gran altitud en latitudes tropicales
3 lux	3 lx	Límite oscuro del crepúsculo bajo un cielo despejado
100 lux	1 hlx	Pasillo en una zona de paso
300 lux	3 hlx	Sala de reuniones
500 lux	5 hlx	Oficina bien iluminada
600 lux	6 hlx	Salida o puesta de sol en un día despejado.
1000 lux	1 klx	Iluminación habitual en un estudio de televisión
32.000 lux	32 klx	Luz solar en un día medio (mín.)
100.000 lux	100 klx	Luz solar en un día medio (máx.)

Luminancia.- La luminancia se define como la *densidad angular, rectangular y superficial de flujo luminoso* que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada. Alternativamente, también se puede definir como la *densidad superficial de intensidad luminosa* en una dirección dada.

La definición anterior se formaliza con la expresión siguiente:

$$L = \frac{d^2 F}{dS d\Omega \cos \theta}$$

donde:

L es la luminancia, medida en *Nits* o candelas por metro cuadrado (cd/m²).

F es el flujo luminoso, en lúmenes (lm).

dS es el elemento de superficie considerado, en metros cuadrados (m²).

dΩ es el elemento de ángulo sólido, en estereorradianes (sr).

θ es el ángulo entre la normal de la superficie y la dirección considerada.

Otra forma de definir la Luminancia es la siguiente: Como la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente de una fuente de luz primaria o secundaria (reflejada).

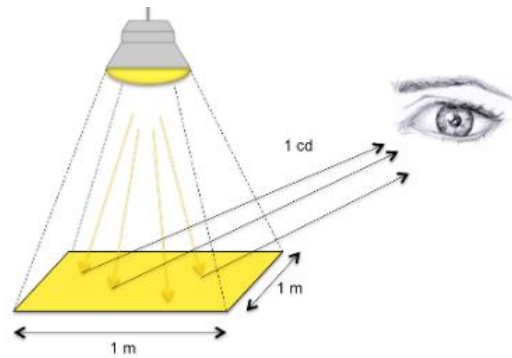


Figura 11.- Esquema que muestra el fenómeno de la Luminancia.

Una fórmula alternativa es la expresión:

$$L = \frac{I}{S \cos(\alpha)}$$

Fuente	Luminancia
Sol	150000 cd/m ²
Lámpara de sodio a alta presión	500 cd/m ²
Lámpara incandescente clara	100-200 cd/m ²
Lámpara incandescente mate	5-50 cd/m ²
Lámpara vapor de mercurio	11 cd/m ²
Lámpara fluorescente	0,75 cd/m ²
Lámpara halogenuros metálicos	78 cd/m ²
Cielo de noche	0,3-0,5 cd/m ²

Otra forma de definirla: Intensidad luminosa reflejada por una superficie. Su valor se obtiene dividiendo la intensidad luminosa por la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada. (Efecto de “brillo” que una superficie produce en el ojo)

$$L = \frac{I}{S}$$

Donde I: Intensidad luminosa reflejada, S: Área que refleja y L: Luminancia o brillo

Algunos valores de Luminancia conocidos

	cd/m ²
Calle bien iluminada	2
Papel blanco iluminado con 400lux	100
Papel blanco iluminado con 1000lux	250
Papel negro iluminado con 400lux	15
Luminancia ideal para paredes de oficina	50 a 100
Luminancia ideal para cielorraso de oficinas	100 a 300
Máxima Luminancia admitida para pantallas	200

Luminancia basada en grados de reflexión

$$L = \frac{\rho E}{\pi}$$

Donde L: Luminancia, ρ: Grado de reflexión de una superficie y E: iluminancia en luxes

Color	(ρ) Refl. %	Material	(ρ) Refl. %
Blanco	70-75	Revoque claro	35-55
Crema claro	70-80	Revoque oscuro	20-30
Amarillo claro	50-70	Hormigón claro	30-50
Verde claro	45-70	Hormigón oscuro	15-25
Gris claro	45-70	Ladrillo claro	30-40
Celeste claro	50-70	Ladrillo oscuro	15-25
Rosa claro	45-70	Marmol blanco	60-70
Marrón claro	30-50	Granito	15-25
Negro	4-6	Madera clara	30-50