

# Diseño lumínico

## La fotometría

Sergio A. García Anaya

En la arquitectura existen estrategias y herramientas que en conjunto nos permiten crear espacios que respondan a situaciones concretas para el bienestar y uso de los mismos en la vida diaria; de ellas, la luz es una de las variables más significativas. Le Corbusier, destacado exponente de la arquitectura moderna, decía que “la arquitectura es un juego magistral, perfecto y admirable de masas que se reúnen bajo la luz. Nuestros ojos están hechos para ver las formas en la luz, la luz y la sombra revelan las formas”<sup>1</sup>.

De allí que para los diseñadores de espacios, la arquitectura y la luz sean conceptos inseparables. La arquitectura ha estado siempre estrechamente vinculada a la iluminación, primero con la luz natural; después, debido a los desarrollos tecnológicos desde el siglo antepasado, con la luz artificial. Como la iluminación es un tema central y herramienta básica para el diseño arquitectónico, hoy en día su estudio y dominio adquieren mayor relevancia.

Mientras que diversas disciplinas se enfocan en los significados de la luz, hoy por hoy se considera indispensable investigar sus aplicaciones, de tal manera que se diseñe de forma ordenada y sistemática en beneficio del usuario y de la arquitectura. A través de estos estudios se ha detectado que tanto la luz natural como la artificial pueden influir en los ciclos circadianos, los cuales regulan una notable diversidad de funciones metabólicas y fisiológicas como la temperatura corporal, la frecuencia respiratoria y cardíaca, la presión y la composición de la sangre, la secreción de la melatonina, entre muchas otras.

En el diseño, la arquitectura cobra un valor trascendente al considerar la luz –tanto la natural como la artificial– como eje central. “La luz es sinónimo de vida; sin luz todo es ausencia y negación”<sup>2</sup>. El manejo de una iluminación adecuada permite resaltar y dar interés a las formas y a los volúmenes; o bien, a las texturas y los diferentes valores cromáticos. Por lo tanto, se puede decir que: “La luz, como el vino, además de tener muchas clases y matices, no permite los excesos. La combinación de diversos tipos de luz en un mismo espacio, en exceso, como con el vino, anula la posible calidad del resultado”<sup>3</sup>. Por otro lado, el diseño de iluminación es interdisciplinario, ya que intervienen diversas áreas del conocimiento, como el diseño arquitectónico, el eléctrico, el uso racional de la energía, los programas de mantenimiento, la física y la tecnología digital, entre otras.

Cuando la luz natural disminuye o no existe, la iluminación artificial nos permite encenderla y apagarla a voluntad; variar el nivel de iluminancia (nivel de iluminación); controlarla con un propósito; proyectarla de forma constante; poder alterar el aspecto sensorial del espacio creando nuevos recorridos y tensiones; colorear o dramatizar texturas y relieves.

El propósito de este artículo es ofrecer una breve explicación de la fotometría óptica: en qué consiste y cuál es su interpretación y su aplicación en la ciencia y en el arte de la iluminación, tanto en el contexto del espacio arquitectónico como académico; pero sobre todo como herramienta docente y de investigación. De esta manera, al comprenderla buscamos colocarla a la vanguardia, en un país que requiere de proyectos acordes con una demanda social concreta, en el que la Universidad, a través de su especialización y laboratorio, podrá desarrollar e incidir de forma efectiva.

Para ello se ha esbozado al final del artículo un glosario que defina los principales conceptos y enunciados a partir de descripciones específicas. Esto responde a la necesidad de establecer un vínculo con otras disciplinas, para la difusión y la enseñanza del diseño de la iluminación arquitectónica, para lo cual también es indispensable contar con escenarios para la docencia, la investigación y la aplicación de dichos conceptos.

En consecuencia, como un parámetro inicial y conceptual, describo brevemente la astronomía y su desarrollo a través de los siglos; después, derivaron de esta ciencia la radiometría y la fotometría, disciplinas íntimamente ligadas y cuya importancia para el diseño lumínico se explicará más adelante en este texto.

### Astronomía

La astronomía es la ciencia que se refiere al estudio de los objetos y de la materia fuera de la atmósfera terrestre, así como a sus aplicaciones físicas y químicas. En la astronomía, la principal fuente de información acerca de los cuerpos celestes y otros objetos es la luz visible o, en términos generales, la radiación electromagnética.

El ser humano, por su inherente curiosidad y observación, desde hace muchos siglos desarrolló la ciencia de la fotometría observacional (astronómica), que se basa en la medición de la brillantez de los objetos radiantes (astros) en el firmamento.

La astronomía observacional se puede clasificar de acuerdo a la región seleccionada del espectro

electromagnético o tipo de energía: radioastronomía, astronomía infrarroja, astronomía óptica, astronomía ultravioleta, astronomía rayos x y astronomía rayos gamma.

Como se mencionó anteriormente, la fotometría astronómica es parte de la astronomía; consiste en el conjunto de técnicas observacionales orientadas a la medida del brillo aparente y del color de los cuerpos celestes. El brillo aparente de las estrellas suele medirse por medio del esquema especial conocido como sistema de magnitudes. Se pueden medir en luz visible, en el infrarrojo o en el azul y ultravioletas cercanos; para ello se utilizan unos filtros que sólo dejan pasar determinadas frecuencias de la radiación emitida por el objeto celeste.

Las primeras observaciones y mediciones se remontan alrededor del año 130 a. C., cuando el astrónomo griego Hiparco (Hipparchos, Nicea 190-120 a. C.) estableció un sistema de medición de la brillantez de las estrellas denominado escala de magnitudes (en astronomía, es la medida de brillo de una estrella). Este sistema consiste en clasificar a las estrellas de acuerdo a su brillantez en una escala del uno a seis, de tal manera que las más brillantes son clasificadas de magnitud uno y las más tenues, de magnitud seis.

Galileo Galilei (1564-1642), astrónomo y físico italiano considerado como el fundador de la astronomía moderna, dio a ésta su mayor impulso al inventar, a principios del siglo xvii, el primer telescopio de sesenta aumentos. Como resultado de sus observaciones publicó el tratado, escrito en latín, *Siderius Nuncius* (El mensajero de las estrellas, Mensajero sideral o Mensaje sideral), en 1610. En él expone algunos de sus importantes descubrimientos relacionados con la Luna, las manchas solares y los cuatro satélites mayores de Júpiter. La publicación produjo algunas duras reacciones de los escolásticos de la época, quienes llegaron a afirmar: "Los fenómenos celestes vistos por Galileo Galilei no son más que ilusiones ópticas y para verlos es preciso fabricar un anteojo que los produzca".<sup>4</sup>

La astronomía tuvo nuevamente un gran estímulo con la invención del telescopio de reflexión por el científico inglés Sir Isaac Newton (1642-1727), quien utilizó espejos en lugar de lentes con el propósito de evitar la aberración cromática.

Dado que el principal obstáculo de la astronomía observacional es la atmósfera terrestre, se han creado programas para poner en órbita telescopios con diferentes objetivos que permitan solventarlos.

En años recientes, el antiguo sistema de magnitudes de Hiparco fue usado con ciertas modificaciones en la primera misión espacial, denominada Hipparchus, realizada por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) que finalizó en 1993. Consistió en catalogar más de 100 000 estrellas y medir sus posicionamiento, distancias, movimientos, brillantez y color, con una exactitud 200 veces mayor que el estudio original. Los resultados de esta misión fueron publicados en 1997.

Podemos asegurar que la astronomía y la fotometría observacional siguen en pleno desarrollo. Hoy en día se cuenta con telescopios puestos en órbita por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (mejor conocida como NASA), la ESA, el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), así como otros organismos afines.

Asimismo, se encuentran en órbita varios telescopios y satélites espaciales con fines específicos que permiten detectar: planetas extrasolares (CoRoT<sup>5</sup> y Kepler<sup>6</sup>); las características y propiedades de la materia oscura (PAMELA<sup>7</sup>), las nuevas galaxias a distancias considerables (XMM-Newton<sup>8</sup>); la captación de la radiación cósmica (Planck<sup>9</sup>); el estudio de la estructura interna del sol y el origen del viento solar (SOHO<sup>10</sup>); el monitoreo del grosor de la capa de hielo en los océanos polares (CryoSat-2<sup>11</sup>).

El principal y mayor telescopio espacial, lanzado en 1990, es el Hubble,<sup>12</sup> que revolucionó la astronomía. Se encuentra en órbita a una altitud aproximada de 560 km. Ha permitido a los astrónomos observar galaxias de hace 13 millones de años— solamente entre 600 y 800 millones de años después del *Big Bang*— y proporcionado datos esenciales para entender el universo que hoy observamos. Para sustituir al Hubble, al término de su vida útil la NASA tiene programado para el año 2018 el lanzamiento y puesta en órbita del observatorio “James Webb Space Telescope”<sup>13</sup> (JWST), con 100 veces mayor sensibilidad. Este nuevo telescopio explorará todos los campos de la astronomía y todos los períodos de la historia

del universo, desde el *Big Bang* hasta la formación de galaxias y de sistemas estelares en la Vía Láctea que cuenten con otros planetas capaces de albergar vida. Cabe mencionar que será situado en una órbita a 1.5 millones de kilómetros de la Tierra y tendrá un costo aproximado de 9 billones de dólares americanos.

### Radiometría

La radiometría, como parte de la astronomía, es la ciencia que se ocupa del estudio de los métodos de medición de la energía radiante dentro del espectro electromagnético —es decir, la energía de radiación electromagnética no coherente, inclusive en el rango óptico; esto es, las propiedades físicas de la energía radiante que puede incluir desde la energía ultravioleta hasta la infrarroja.

### Fotometría óptica

La fotometría óptica es una parte de la radiometría. Consiste en la medición de la radiación electromagnética en términos de la respuesta visual humana, es decir, cuando la radiación ha sido normalizada a la respuesta (sensibilidad) espectral del ojo humano, situación que explicaremos más adelante. La información obtenida a través de la fotometría nos permite conocer las propiedades de los equipos de iluminación y materiales; a partir de esta información y mediante algunos cálculos, es posible saber los diferentes aspectos cuantitativos del comportamiento de los sistemas de iluminación. En el diseño de la iluminación, ésta se basa en la región visible del espectro electromagnético (luz), que corresponde a las longitudes de onda entre los 380 y los 760 nm, rango que es sensible el ojo humano.

Ahora bien, la luz se define como la energía radiante capaz de excitar la retina humana causando sensaciones visuales; o bien, como la evaluación visible de la energía radiante.

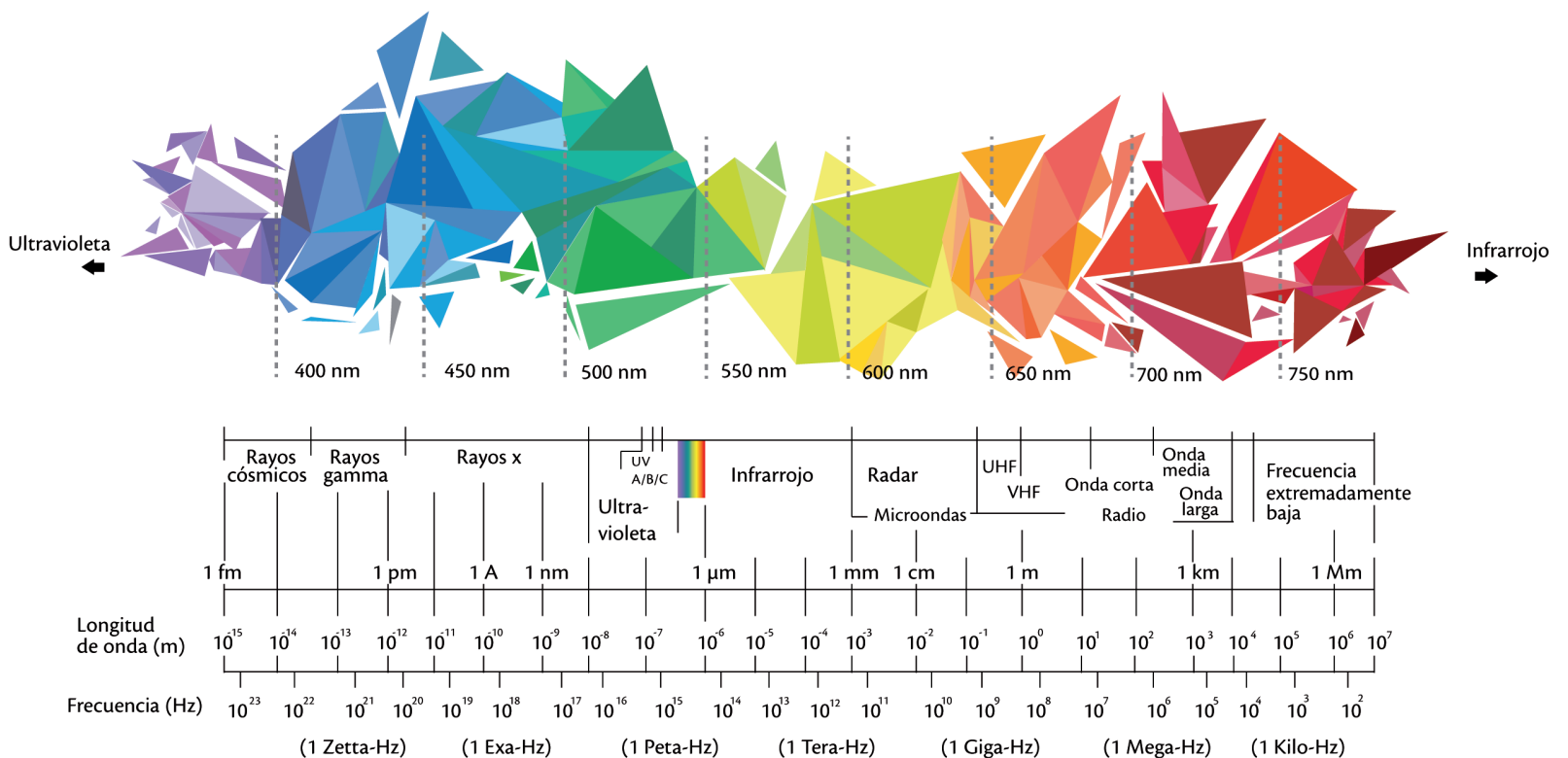
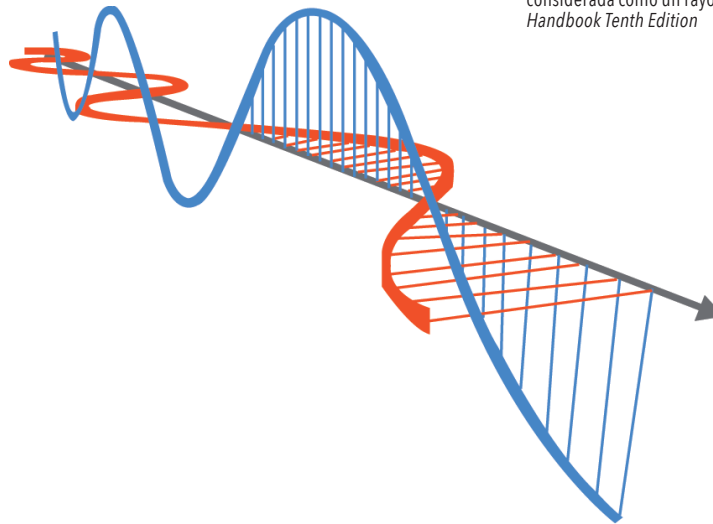
La teoría electromagnética desarrollada por James C. Maxwell (1831-1879) —usada actualmente— describe un modelo electromagnético de la radiación óptica como un vector eléctrico y

otro magnético, orientados perpendicularmente uno de otro, oscilando en fase y propagándose en la dirección perpendicular a su oscilación. La energía transportada por la resultante del producto de estos vectores se puede considerar como un rayo óptico (luz).

Toda clase de energía radiante se transmite, en el vacío, en línea recta a la misma velocidad (299 793 km/s). Sin embargo, cada una difiere en su longitud de onda y en su frecuencia. Estos parámetros se pueden alterar de acuerdo con el medio en el cual la energía se transmite con excepción de la frecuencia, que se mantiene constante e independiente del medio.

La teoría ondulatoria de la luz nos permite representar la energía radiante en un arreglo ordenado, denominado espectro electromagnético, que se caracteriza por la longitud de onda

La propagación y oscilación de los vectores eléctrico y magnético y la magnitud de energía transportada por estos vectores es considerada como un rayo óptico (luz) (Maxwell). *IES Lighting Handbook Tenth Edition*



Representación gráfica de la energía radiante (espectro electromagnético)

y la frecuencia de cada tipo de energía. Éste se extiende sobre un rango de longitudes de onda de  $10^{-16}$  a  $10^5$  nm y una frecuencia de  $10^{24}$  a  $10^4$  Hertz (ciclos por segundo).

De acuerdo a la longitud de onda de la energía radiante, representada en el espectro electromagnético, ésta se comporta según lo indicado en la tabla siguiente:

Longitud de onda	Tipo de radiación
$10^{-3}$	Rayos cósmicos
$10^{-2}$	Rayos gamma
$10^{-1}$	Rayos x
$10^1$ - $10^2$	Ultravioleta
$10^3$	Visible
$10^4$ - $10^5$	Infrarrojo
$10^6$	Radar
$10^7$	Televisión
$10^8$	Radio
$10^9$ - $10^{10}$	Transmisión onda corta
$10^{11}$ - $10^{12}$	Transmisión onda larga

Por consiguiente, cada tipo de energía radiante mencionada anteriormente tiene una aplicación específica dentro del diario acontecer, a saber: los rayos gamma, en medicina nuclear para la esterilización de instrumental de cirugía, para la eliminación de bacterias, para el tratamiento de células cancerosas; o bien, en detectores de rayos gamma para escanear contenedores en puertos marítimos. Los rayos x, en la toma de radiografías o para diferentes usos en la industria de la construcción o del petróleo. La radiación ultravioleta, de acuerdo a su longitud de onda, se utiliza, entre otras muchas aplicaciones: en la producción de ozono (eliminar olores), para efectos germicidas (eliminación de bacterias en alimentos), en la purificación de agua, en el aire acondicionado, para la producción de luz negra (identificación de billetes, minerales), para el bronceado de la piel, en el crecimiento de plantas, en fototerapia, contra enfermedades de la piel, en el tratamiento de la ictericia en neonatales y en el tratamiento del desorden afectivo estacional

(SAD, por las siglas en inglés de *Seasonal Affective Disorder*).<sup>14</sup> En resumen, todos los seres vivos, animales y plantas tienen complejas respuestas fisiológicas a las variaciones diarias y estacionales de la energía radiante solar. La interacción de los sistemas biológicos con la energía radiante en las porciones ultravioleta, visible e infrarroja del espectro electromagnético se estudia a través de la fotobiología.

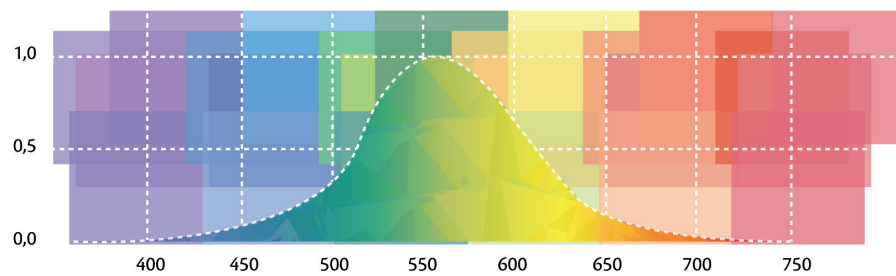
Estos tipos de energía son de primordial importancia dentro del ejercicio de la ingeniería de iluminación. En cuanto a la luz ultravioleta, con base en sus aplicaciones prácticas y de acuerdo a la Commission Internationale de L'Éclairage (CIE) se clasifica en ultravioleta cercano (UVA), entre 315 y 400 nm; ultravioleta medio (UVB), entre 280 y 315 nm; y ultravioleta lejano (UVC), entre 100 y 280 nm.

Cada tipo de energía ultravioleta, en la práctica, tiene una aplicación específica, como se mencionó anteriormente.

El espectro visible (luz) del espectro electromagnético corresponde a la energía radiante cuya longitud de onda va de 380 a 760 nm. En este rango, cada longitud de onda describe un determinado tipo de energía, la cual representa diferentes colores (violetas, azules, verdes, amarillos, naranjas y rojos) que son captados por el ojo humano en diferentes proporciones, de acuerdo a la curva de eficiencia luminosa espectral del observador estándar.

Por su parte, la región infrarroja se divide en infrarrojo cercano (longitud de onda corta), entre 0.78 y 1.4  $\mu\text{m}$ ; infrarrojo medio (longitud de onda mediana), entre 1.4 y 3.0  $\mu\text{m}$ ; infrarrojo lejano (longitud de onda larga), entre 3.0 y 103  $\mu\text{m}$ .

Recordemos que la luz se percibe a través del ojo humano gracias a la existencia de dos tipos de células fotorreceptoras denominadas, por su forma, conos y bastones. El ojo contiene alrededor de 40 millones de conos y 100 millones de bastones, células que convierten la radiación óptica en señales neuronales. Tales fotorreceptores de la retina reaccionan de diferente forma a la luz y a los colores. Los bastones se activan en



La función de eficiencia luminosa espectral (*spectral luminous efficiency function*) para la visión fotópica (indicada con  $V(\lambda)$ )

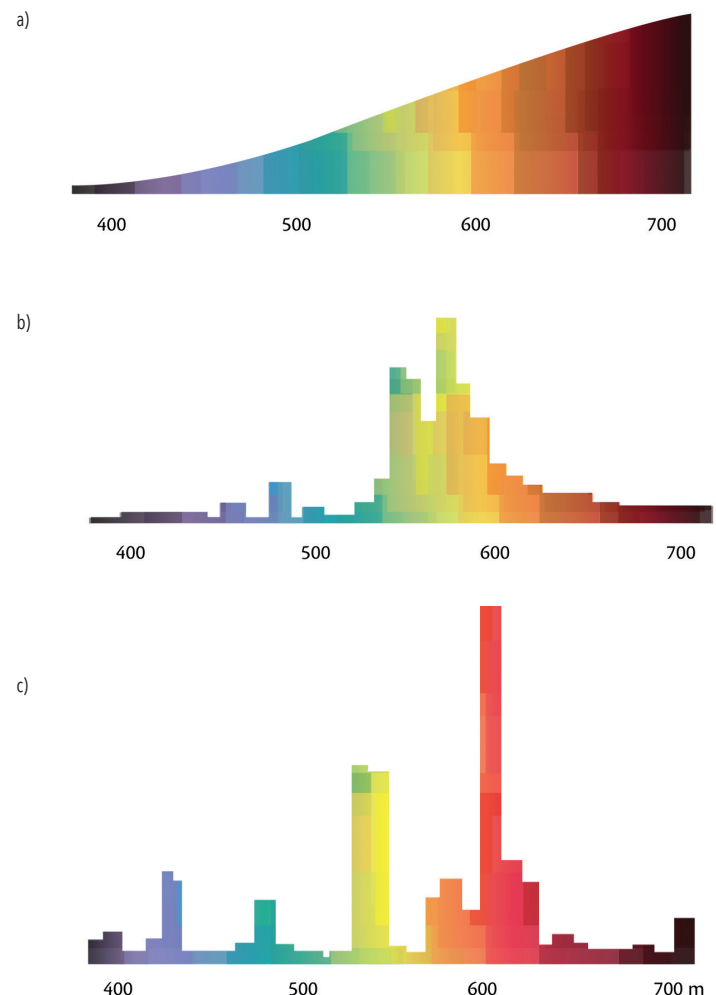
la oscuridad (bajos niveles de luminancia) y sólo permiten distinguir el negro, el blanco y los distintos tonos de grises, mientras que los conos se activan a altos niveles de luminancia y permiten la visión de los colores. En el ojo humano hay tres tipos de conos, sensibles a diferentes longitudes de onda gracias a los pigmentos (opsinas) que posee cada uno de ellos: eritropsina (560 nm, luz roja), cloropsina (530 nm, luz verde), cianopsina (430 nm, luz azul). Mediante diferentes intensidades captadas por cada tipo de cono es posible la visión de los colores que conforman el espectro de la luz visible.<sup>15</sup>

Con el propósito de estandarizar las mediciones fotométricas, la CIE estableció en 1924 la función de eficiencia (sensibilidad) luminosa espectral "fotópica" (visión diurna) de un observador estándar, es decir, la eficiencia con la cual el ojo humano capta la energía radiante en cada longitud de onda dentro del espectro visible a altos niveles de luminancia mayores a 5 cd/m<sup>2</sup>. En estos niveles, la eficiencia máxima se logra en la longitud de onda de 555 nm que corresponde a la región verde-amarilla del espectro visible.

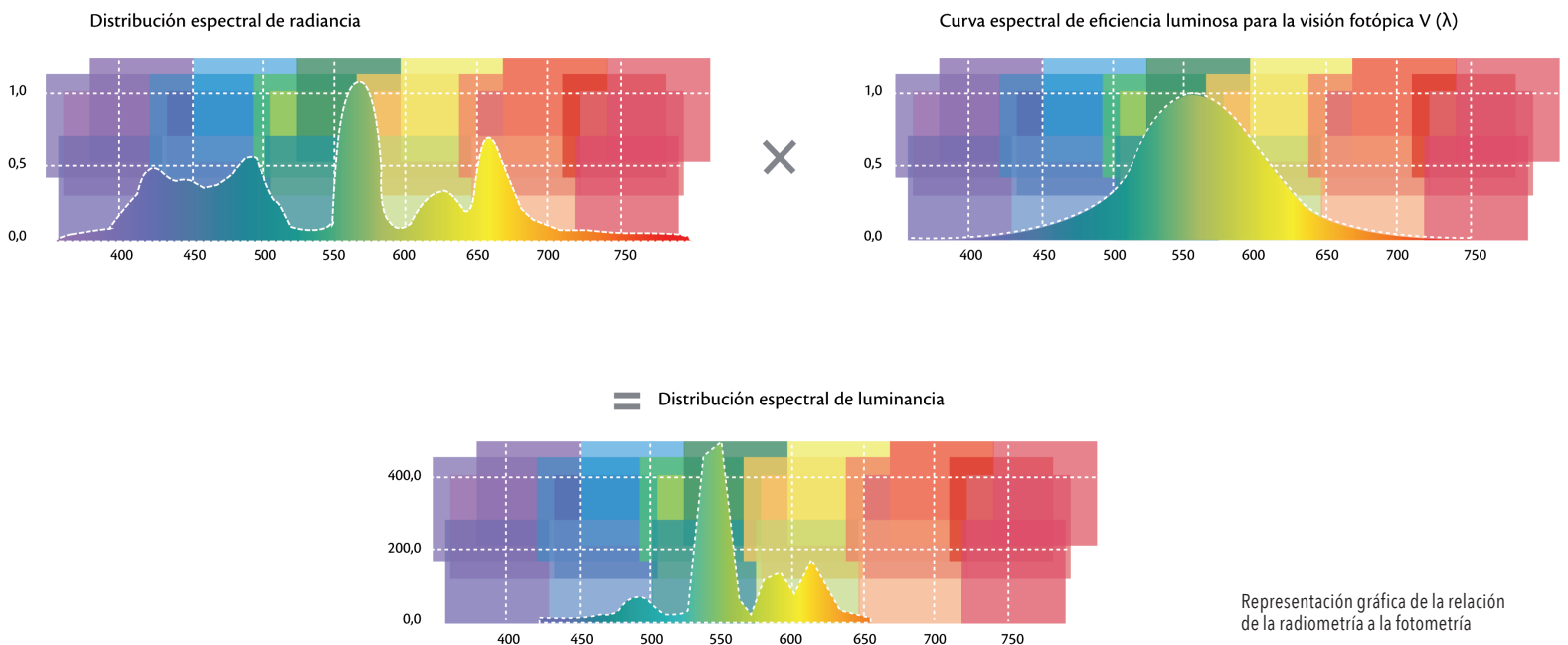
En la visión fotópica, la mayoría de los conos se encuentran en la fovea de la retina del ojo, mientras que en la parte externa de la fovea el número de conos disminuye drásticamente. La fovea es el área de la retina donde se forma una imagen muy nítida y se concentran los rayos luminosos, entonces se dice que hay visión "central" o visión "on-line".

Todas las magnitudes de iluminación, como son flujo e intensidad luminosa, luminancia e iluminancia, etcétera, están basadas en la función fotópica, lo que significa, de acuerdo con estudios recientes, que se modifica el comportamiento visual cuando se aplica en entornos con bajo nivel de luminancia.

Por otra parte, cualesquier tipo de iluminador o lámpara produce una cierta cantidad de energía radiante dentro del espectro visible, la cual se representa en una curva característica para cada tipo, denominada curva de distribución de energía espectral (SPD, por sus siglas en inglés).



Curvas de distribución de energía espectral de lámparas (a. incandescente, b y c. lámparas de descarga)



Las definiciones de cantidades fotométricas han sido estandarizadas por la CIE, la cual estableció que “la luz es energía radiante ponderada de acuerdo a la función espectral de eficiencia luminosa del sistema visual humano.” Arriba se muestra gráficamente cuál es la relación entre la radiometría y la fotometría.

Toda la información fotométrica obtenida a través de los equipos destinados para tal objeto –como son el fotogoniómetro, el espectrómetro, la esfera integradora (esfera de Ulbricht) y luxómetro, por ejemplo– se refieren a la curva fotópica, ya que todos los valores de la distribución espectral de radiancia están ponderados por la función espectral fotópica de eficiencia luminosa del sistema visual humano. Por lo tanto, esta fotometría es apta para el cálculo sólo cuando los niveles de iluminancia son altos.

Puesto que la radiometría y la fotometría están íntimamente ligadas, es necesario definir en principio las unidades básicas de la radiometría para conocer cuáles son sus equivalentes en la fotometría. Las unidades radiométricas deberán de convertirse en unidades fotométricas cuando se afectan por la ponderación de los valores de la curva de respuesta de un observador estándar (curva de sensibilidad del ojo humano).

La equivalencia entre las magnitudes básicas de la radiometría y la fotometría se sintetiza en la tabla de la siguiente página.

Después de varios estudios y experimentos realizados, finalmente en 1951, la CIE definió la función de eficiencia luminosa espectral “escotópica” (visión nocturna), que se aplica con bajos niveles de luminancia en un rango de 0.0001 a 0.001  $\text{cd}/\text{m}^2$ ; entonces los bastones permiten una visión “periférica” o visión “*off-line*”, sin percibir colores. Esta función se encuentra desplazada hacia longitudes de onda menores, con eficiencia máxima en los 507 nm, correspondiente al color azul-verdoso. Las modificaciones de la función espectral de eficiencia luminosa se deben principalmente a la existencia de dos tipos de fotorreceptores en la retina del ojo, los conos y los bastones. Los valores de funciones fotópica y escotópica fueron actualizados por la CIE en 1983.

Con el propósito de conocer cómo afectan los cambios de nivel de luminancia, debemos saber cuánto tiempo toma al ojo adaptarse a uno de tales cambios. Esto depende de la magnitud y sentido del cambio y de qué tanto se involucran los diferentes fotorreceptores. En algunos casos, cuando los cambios son pequeños, es suficiente una adaptación neuronal, y se realiza en menos de un segundo; para grandes cambios se presenta una adaptación fotoquímica. Si el cambio se encuentra dentro del rango de operación de los conos, son suficientes pocos minutos para que la adaptación ocurra; si cubre desde la operación de los conos hasta los bastones, se requieren más

de diez minutos. En cuanto a la dirección, una vez que el proceso está en marcha, cambios a valores más altos pueden lograrse mucho más rápido. Si el sistema visual no está completamente adaptado a la luminancia predominante, sus capacidades están limitadas. El estado de cambio de adaptación es llamado adaptación de transición, el cual es poco probable de ser percibido en interiores en condiciones normales, pero es notorio cuando ocurren cambios repentinos de alta a baja luminancia, tal como en la entrada de un túnel en un día soleado o en el evento de una falla eléctrica en un edificio sin ventanas.

Entre la visión fotópica y la escotópica se despliega una tercera, denominada mesópica. Para abordar este tema debemos de considerar que existe una adaptación de transición que corresponde al rango de luminancia de 0.001 a 5  $\text{cd}/\text{m}^2$ . En esta región la visión se realiza por medio de la combinación de los conos y los bastones.

Hacer una comparación entre la visión fotópica y escotópica sin considerar el estado de adaptación del ojo a diferentes niveles de luminancia, como en el caso del alumbrado vial (alumbrado público), así como considerar un solo aspecto de la visión mesópica, nos puede conducir a conclusiones equivocadas. Por lo tanto, se deben de involucrar las fases de la visión directa (*on-line*, a través de los conos) y la visión indirecta (*off-line*, a través de los bastones), con la contribución de un determina-

Magnitud radiométrica	Símbolo	Unidad	Magnitud fotométrica	Símbolo	Unidad
Flujo radiante	$\Phi_c$	W	Flujo luminoso	$\Phi_v$	Lumen
Intensidad radiante	$I_c$	W / sr	Intensidad luminosa	$I_v$	Lm / sr = candela (cd)
Irradiancia	$E_c$	W / m <sup>2</sup>	Iluminancia	$E_v$	Lm / m <sup>2</sup> = lux (lx)
Radiancia	$L_c$	W m <sup>2</sup> sr <sup>-1</sup>	Luminancia	$L_v$	lm m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> = cd / m <sup>2</sup>

do espectro luminoso que nos permita un mejor reconocimiento del color, aun en condiciones de bajos niveles de luminancia. No menos importante es considerar que las condiciones de transmitancia espectral del ojo cambian a medida que se envejece, lo que influye en los usuarios de mayor edad de las vías de circulación, sean conductores o peatones.

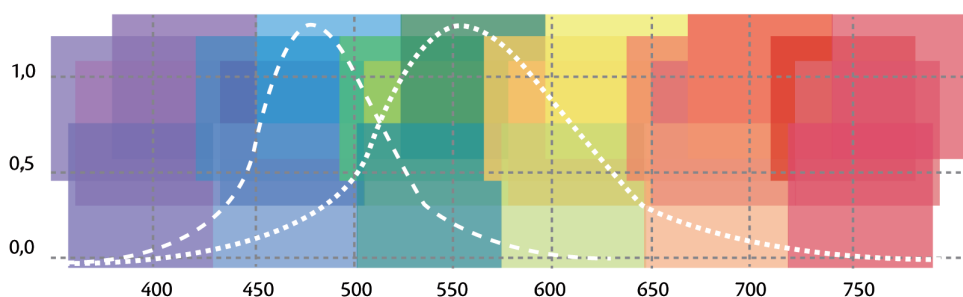
En años recientes, se han realizado un gran número de estudios sobre la luz en condiciones mesópicas. Sin embargo, debido a la complejidad de la conciliación de la visión y la fotometría, gran parte de estos trabajos simplemente ha evidenciado la necesidad de una mayor investigación.

Como ya hemos dicho, los conos, que posibilitan la visión del color, permanecen parcialmente activos en el rango de visión mesópica. De esta forma, en el alumbrado vial podríamos esperar que el reconocimiento de los colores contribuya a un mayor rendimiento visual. Efectivamente, algunos resultados de investigaciones relativamente recientes demuestran que el reconocimiento de las caras humanas con luz blanca cuyo índice de rendimiento de color (Ra) sea superior a 50, es mucho más fácil que con sodio a alta presión, con un Ra aproximado de 25. Entonces se concluye que con la luz blanca sólo es necesaria la mitad del nivel de iluminación para tener la misma posibilidad de identificación. Notemos que en este caso lo determinante es el índice de rendimiento de color y no la temperatura del mismo.

Los estudios anteriormente mencionados se realizaron con personas cuyas edades fluctuaban entre 20 y 35 años, en tanto que el cristalino del ojo se vuelve ligeramente amarillo con la edad.

Una de sus consecuencias es la pérdida de visión de las longitudes de onda cortas (colores azul y verde), lo cual motiva que la absorción del componente azul de la luz blanco-azulada –absorción que se produce en la lente que se ha amarillado– disminuya la cantidad total de luz que llega a los bastones y conos.

En situación de niveles mesópicos aplicables por lo general a instalaciones exteriores, principalmente en el alumbrado vial, el flujo luminoso efectivo estará entre los valores numéricos del flujo luminoso fotópico y escotópico. Por lo tanto, es significativa la relación entre la distribución espectral de la lámpara y el comportamiento visual. Bajo condiciones de bajas luminancias, dos lámparas que producen luminancias idénticas, pero con diferentes curvas de distribución espectral, pueden producir diferentes niveles de comportamiento visual. Para medir la efectividad de la fuente de luz



Función espectral fotópica y escotópica de eficiencia luminosa espectral



en condiciones de visión mesópica se suele utilizar la relación s/p (escotópico/fotópico). Esta relación es característica de cada tipo de lámpara y se deriva del comportamiento visual efectivo cuando el nivel luminoso de una fuente decrece.

La luz blanco-azulada (valor s/p elevado) es, por tanto, menos efectiva que la luz blanco-cálida para las personas de avanzada edad, tanto en el caso de visión directa como de visión indirecta, debido a que el efecto de absorción del azul minimiza el efecto de una mayor relación s/p.

En resumen, como resultado de los diferentes niveles de adaptación de luminancia que se presentan, el comportamiento visual es diferente en cada situación. De allí que existan tres tipos de visión: fotópica, escotópica y mesópica.

Por otro lado, la investigación científica no ha podido determinar hasta el día de hoy el funcionamiento del sistema visual humano en el espectro de la visión mesópica, específicamente para las personas de mayor edad. Por ello es necesario continuar con estudios y experimentos que nos permitan evaluar con certeza el comportamiento del ser humano en tales circunstancias.

Al carecer de una demostración científica de la información expuesta anteriormente, recordemos las palabras de Lord Kelvin:

El progreso, en una rama de la ciencia o ingeniería, depende de la habilidad de medir las cantidades asociadas.

Cuando se puede dimensionar aquello de lo que se está hablando, y expresarlo en números, entonces se conoce algo de ello; pero cuando no puedes expresarlo en números, el conocimiento es débil e insatisfactorio; puede ser el principio del conocimiento, pero apenas lo percibes, avanza a la etapa de la ciencia, sin importar de la materia de que se trate.

## Glosario

**Angstrom (Å).** Unidad de longitud equivalente a  $10^{-10}$ m, empleada para expresar longitudes de onda de la luz. Llamada así en honor del astrónomo y espectroscopista sueco A. J. Angstrom.

**Candela (cd).** Intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $5.4 \cdot 10^{14}$  Hz y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 vatios por estereorradián.

**Ciclos circadianos.** Del latín *circa* que significa "alrededor de" y *diem* que significa "día", se definen como una serie de funciones biológicas que se repiten en intervalos regulares de aproximadamente 24 horas.

Los ciclos circadianos responden a estímulos externos como la luz y la temperatura, por lo que se acompañan con el ritmo del día y la noche, pero también se sabe que son influidos por otro tipo de estímulos como ruidos, luz artificial, alimentos y la presencia de ciertas hormonas.

**Conos y bastones.** Células visuales fotorreceptoras. Gracias a los bastones distinguimos contrastes; gracias a los conos, colores.

**Curva de distribución de energía espectral (SPD).** Expresa la energía radiante relativa emitida por una lámpara, en relación a la longitud de onda dentro del espectro visible.

**Electromagnetismo.** Rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos y las relaciones entre ellos.

**Espectro.** Diagrama o gráfica de la intensidad de la luz como función de la frecuencia (o la longitud de onda).

**Espectro electromagnético.** Conjunto de ondas electromagnéticas que se propagan de manera ondulatoria y con velocidad constante. Las ondas electromagnéticas se dividen en luz visible, infrarroja, ultravioleta, rayos x, rayos gamma, radiofrecuencia y microondas. Cada onda se diferencia en la frecuencia y la longitud de onda, que son inversamente proporcionales, por esto su producto siempre es constante e igual a la velocidad de la luz.

**Frecuencia (v).** Unidad, hercio o Hertz. El número de vibraciones o ciclos por unidad de tiempo. La frecuencia de las ondas electromagnéticas suele medirse en ciclos por segundo, llamados Hertz, en honor del físico alemán H. Hertz.

**Iluminancia (E).** Unidad lux (lx) o footcandle (fc).

Es la densidad de flujo luminoso incidente localizado en un punto de un elemento diferencial de superficie y orientado en una dirección particular. Se expresa en lux, cuando se utiliza la unidad metro, o bien, en pie bujía cuando se utiliza el pie.

**Índice de rendimiento de color.** Calidad de la reproducción de colores bajo una iluminación representada. El grado de alteración cromática frente a una fuente de luz de referencia se indica a través del índice del rendimiento en color Ra y el índice de reproducción cromática, respectivamente.

**Longitud de onda ( $\lambda$ ).** Es la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda de energía radiante. Se mide en nanómetros ( $\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ) ó Angstrom ( $\text{Å}=10^{-10}\text{m}$ ).

**Lumen (lm).** Unidad de flujo luminoso. Flujo luminoso emitido en un ángulo sólido. Unidad (1sr) por una fuente puntual con una intensidad uniforme de una candela.

**Luminancia (L).** Unidad  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Cantidad de luz emitida o reflejada desde una área en particular; se expresa en candelas por metro cuadrado, algunas veces llamados nits.

**Nanómetro (nm).** Unidad de longitud equivalente a  $10^{-9}$  m, empleada para expresar las longitudes de onda de la luz.

**Ondas electromagnéticas.** Perturbaciones que se propagan con la velocidad de la luz; consisten en ondas de campo eléctrico y de campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.

**Radiación óptica.** Conjunto de radiaciones ultravioleta (uv), la luz o radiación visible (vis), y la radiación infrarroja. Su longitud de onda está comprendida entre 100 nm a 1 mm.

**Temperatura de color.** Caracterización del color de luz de una fuente. Corresponde en radiadores térmicos aproximadamente a la temperatura real del filamento de la lámpara. En lámparas de descarga, se indica la temperatura de color más parecida, esto es, la temperatura en la que un radiador completo (cuerpo negro) indica la luz de un color comparable.

**Transmitancia espectral.** La fracción (de 0 a 1) o el porcentaje (de 0 a 100) de radiación incidente que se transmite por un material determinado (independientemente de la radiación absorbida

o reflejada) en función de la longitud de onda.

**Visión escotópica** (*Skotopisches Sehen*, visión nocturna). Visión en adaptación sobre luminancias por debajo de 0,001 cd/m<sup>2</sup>. La visión escotópica se realiza con los bastoncillos, por ello abarca sobre todo la periferia de la retina. La agudeza visual es baja, no se pueden percibir colores; en cambio, la sensibilidad a los movimientos de objetos percibidos es elevada.

**Visión fotópica** (*Photopisches Sehen*, visión diurna). Visión con adaptación a luminancias de más de 5 cd/m<sup>2</sup>. La visión fotópica se realiza con los conos, por eso se concentra en la zona de la fovea. La agudeza visual es elevada y se pueden percibir colores.

**Visión mesópica** (*Mesopisches Sehen*, visión crepuscular). Situación transitoria entre la visión fotópica diurna con ayuda de los bastoncillos. La percepción de color y la agudeza visual toman los correspondientes valores intermedios. La visión mesópica abarca el campo de luminancia de 0.001 cd/m<sup>2</sup> a 5 cd/m<sup>2</sup>.

Sergio García Anaya  
Ingeniero Mecánico Eléctrico  
Masterando en Investigación de Operaciones  
Catedrático  
Especialización en Diseño de Iluminación  
Arquitectónica  
Programa Único de Especializaciones en  
Arquitectura  
Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional  
Autónoma de México  
✉ sagaprolur@prodigy.net.mx

#### Notas

1. "La luz en la arquitectura", *Deconstrumática* [revista en línea], noviembre, 2011.
2. Oswaldo Ramírez, "La luz en la arquitectura" [publicación en línea], blog de la maestría en diseño arquitectónico de la Universidad Autónoma de Durango, campus Zacatecas. <http://maestriaarq.blog.com/arq-oswaldo/> [revisado en noviembre de 2014].
3. Campo Baeza, Alberto. "Con varias luces a la vez", en *En torno a la luz y la Arquitectura* [documento electrónico], digitalizado por la Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad de San Juan, Argentina. <http://www.faud.unsj.edu.ar/descargas/LECTURAS/Arquitectura/EXTRA/8.pdf> [revisado en noviembre de 2014].
4. Ana María Cetto, *La luz en la naturaleza y en el laboratorio* (México: FCE, 1995).
5. Acrónimo en francés de Convection Rotation et Transits planétaires. Telescopio espacial francés lanzado en diciembre del 2006 por la Agencia Espacial Francesa (CNES, por sus siglas en francés) en conjunto con la ESA, para detectar planetas extrasolares y la sismología estelar.
6. Telescopio espacial enviado hacia la Vía Láctea en marzo del 2009 con el objetivo principal de buscar planetas extrasolares de tamaño pequeño, de dos a 20 veces el tamaño de la tierra. Éste equipo se complementa con el telescopio CoRoT que no puede detectarlos.
7. Siglas de Payload for Anti-Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics. Observatorio en órbita terrestre de 350-610 km, lanzado en junio de 2006, destinado a determinar características de la materia negra, así como al estudio de las partículas cósmicas, su espectro, su origen y la presencia de antipartículas.
8. Telescopio espacial de rayos x, puesto en órbita por la ESA a una tercera parte de la distancia entre la Tierra y la Luna en diciembre de 1999. Su principal misión: incrementar el conocimiento de los objetos muy calientes, las características de los hoyos (agujeros) negros y la formación de galaxias.
9. Observatorio espacial que capta la radiación cósmica o fondo cósmico de microondas (CMB). La CMB es "la primera luz" del mundo material, producida poco después del *Big Bang*. Planck observa y mide las variaciones de temperatura a través de este fondo de microondas.
10. Acrónimo de Solar and Heliospheric Observatory. Observatorio espacial puesto en órbita por la NASA en colaboración con la ESA, en diciembre de 1995, a una altitud de 1.5 millones de km, con la misión de estudiar la estructura interna del sol, su atmósfera y el origen del viento solar.
11. Satélite puesto en órbita a 700 km de altitud por la ESA, para monitorear los cambios del espesor de las placas de hielo polares, así como, del hielo marino flotante.
12. Telescopio espacial también llamado HST. Puesto en órbita a 560 km de altitud por la NASA en colaboración con la ESA, en abril de 1990. Su misión principal consiste en incrementar el conocimiento de la edad del universo, identificar los cuásares, la existencia

de la energía oscura, conocer la evolución de las galaxias y su formación.

13. Telescopio espacial infrarrojo que será situado por la NASA, la ESA y la AEC (Agencia Espacial Canadiense, por sus siglas en inglés) y cerca de 17 países más, a 1.5 millones de km de altitud. Sus principales objetivos son: el estudio de las fases de la historia y evolución de nuestro sistema solar; la formación de sistemas solares capaces de albergar vida similar a la existente en la Tierra; el nacimiento, formación y evolución de las galaxias, así como la formación de estrellas y planetas.
14. Siglas de Seasonal Affective Disorder. El trastorno afectivo estacional es un tipo de depresión desencadenada por las estaciones del año. El tipo más común de SAD se llama depresión que comienza en invierno. Los síntomas, por lo general, empiezan al final del otoño o al principio del invierno y desaparecen para el verano.
15. E. Bruce Goldstein, *Sensación y percepción* (Madrid: Debate, 1992).

#### Referencias

- 2009, año internacional de la astronomía. *Astrodiccionario* [en línea]. <http://astronomia2009.es/astrodiccionario.html> [Revisado en noviembre de 2014].
- Budding, Edwin y Osman Demircan. *Introduction to Astronomical Photometry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- Campo Baeza, Alberto. "Con varias luces a la vez", en *En torno a la luz y la Arquitectura* [documento electrónico], digitalizado por la Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad de San Juan, Argentina. <http://www.faud.unsj.edu.ar/descargas/LECTURAS/Arquitectura/EXTRA/8.pdf> [revisado en noviembre de 2014].
- Cetto, Ana María. *La luz en la naturaleza y en el laboratorio*. México: FCE, 1995.
- Goldstein, E. Bruce. *Sensación y percepción*. Madrid: Debate, 1992.
- Gómez González, Emilio. *Guía Básica de Conceptos de Radiometría y Fotometría*. Notas al Curso de Óptica, Departamento de Física Aplicada III. ESI. Universidad de Sevilla, 2006.
- Illuminating Engineering Society of North America. *The IESNA Lighting handbook*. 9ª edición. Nueva York: Illuminating Engineering, 2000.
- \_\_\_\_\_. *The Lighting Handbook*. 10ª edición. Nueva York: Illuminating Engineering, 2011.
- \_\_\_\_\_. *IES TM-12-12 Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Lighting Levels*. Nueva York: Illuminating Engineering, 2012.
- Pravilov, Anatoly M. *Radiometry in Modern Scientific Experiments*. Nueva York: Springer, 2011.
- Oswaldo Ramírez, "La luz en la arquitectura" [publicación en línea], blog de la maestría en Diseño arquitectónico de la Universidad Autónoma de Durango, campus Zacatecas. <http://maestriaarq.blog.com/arq-oswaldo/> [revisado en noviembre de 2014].