

Capítulo 11

Luz Natural e Iluminación de Interiores

Andrea Pattini

1. Fuentes de luz natural

- 1.1. Fuentes de luz natural directas, indirectas y difusas
- 1.2. Tipos de cielo
- 1.3. Cielo cubierto
- 1.4. Cielo parcialmente despejado
- 1.5. Cielo claro

2. Disponibilidad del dato de luz natural exterior.

- 2.1. Modelos de validez local de iluminancia exterior
- 2.2. Programa internacional de mediciones de iluminación natural
- 2.3. Modelos de predicción generales

3. Iluminación natural de los interiores

- 3.1. Objetivos de diseño
- 3.2. Sistemas de iluminación natural

4. Aplicaciones y desarrollos recientes

- 4.1. Bandejas o reflectoras estantes de luz
- 4.2. Nuevos materiales
- 4.3. Vidrios prismáticos
- 4.4. Sistemas con hologramas
- 4.5. Lumiductos

5. Tratamiento cuantitativo de la luz natural

- 5.1. Determinación de iluminancia absoluta.
- 5.2. Determinación de iluminancia relativa
- 5.3. Factor de luz natural
- 5.4. Mediciones en modelos a escala
- 5.5. Modelos matemáticos para el análisis de la iluminación natural interior de edificios

Conclusiones

Bibliografía

La iluminación natural constituye una alternativa válida para la iluminación de interiores y su aporte es valioso no sólo en relación a la cantidad sino también a la calidad de la iluminación.

En relación a la iluminación artificial, la iluminación natural presenta las siguientes ventajas:

* *Es provista por una fuente de energía renovable.* La iluminación natural es proporcionada por la energía radiante del sol, en forma directa o a través de la bóveda celeste.

* *Puede implicar ahorro de energía.* Una iluminación natural bien diseñada puede cumplir con los requerimientos de iluminancia de un local interior donde se realicen tareas visuales de complejidad media entre un 60-90% del total de horas de luz natural, lo que tiene un potencial de ahorro en energía eléctrica de hasta el 90% en edificios de uso diurno, como por ejemplo escuelas, oficinas, industrias y edificios residenciales.

* *Puede proporcionar niveles de iluminancia más elevados* en las horas diurnas, para una considerable parte del año, que los obtenidos con luz eléctrica mediante instalaciones económicamente sustentables. Se puede, mediante la iluminación natural, obtener una iluminancia homogénea interior de alrededor de 1000 lux.

* *La luz solar directa introduce menos calor por lumen que la mayoría de las fuentes de iluminación eléctrica.*

La luz directa del sol, iluminando superficies perpendiculares a ella, alcanza valores de entre 60.000 a 100.000 lux, muy intensa, en general, para ser utilizada directamente pues puede ocasionar deslumbramiento y aumentos de temperatura. Por estas razones, generalmente se prefiere excluir completamente la luz solar de los interiores, lo que constituye un error, pues si bien prácticamente toda la energía proveniente de las fuentes de luz se convierte finalmente en calor, la proporción de calor introducida por lúmenes de luz solar directa es menor que en la mayoría de las fuentes de iluminación eléctrica, como surge de la tabla I. Puede contribuir favorablemente en la necesidad de calefacción en invierno si las aberturas se diseñan de manera que las ganancias solares excedan a las pérdidas de calor, por ejemplo, vidrios verticales en la fachada norte para el hemisferio sur. En los meses de verano, las mismas aberturas pueden ser usadas para evitar el ingreso de la radiación directa, por ejemplo estas mismas superficies vidriadas pueden ser sombreadas para evitar el ingreso de la radiación directa, iluminando el interior por reflexión y difusión de la luz del sol.

Tabla 1. Eficacia luminosa de distintas fuentes luminosas incluida la luz directa del sol y la proveniente del cielo (Fuente: Moore, 1985).

| <i>Fuente luminosa</i> | <i>Eficacia (lm/W)</i> |
|---------------------------------------|------------------------|
| Sol | 90-117 (según altitud) |
| Cielo claro | 150 |
| Cielo promedio | 125 |
| Lámpara incandescente (150w) | 16 - 40 |
| Tubo fluorescente (150w) | 50 - 80 |
| Lámpara de sodio de alta presión | 40 - 140 |
| Lámparas fluorescentes compacta (26w) | 70 |

* *Tiene la particularidad de ser dinámica:* esta continuamente cambiando a lo largo del día y de los meses del año. En este sentido es importante destacar que la visión humana está

desarrollada de manera que evidencia cierta adaptación a las características de la luz natural y de sus cambios. Además, sus continuos cambios son favorables como efecto estimulante.

** Integra otros elementos que favorecen la satisfacción de las necesidades biológicas y psicológicas de ritmos naturales.* Por ejemplo, haciendo visible el entorno asegura una conexión con el ambiente exterior, las radiaciones externas y las condiciones de cielo, efecto que en general es muy bien recibido por el usuario de la iluminación.

** La adecuada provisión de luz natural a una vivienda o local puede incrementar el valor comercial de ellos.*

1. Fuentes de luz natural

Así como las lámparas de distinto tipo constituyen las fuentes de luz en la iluminación eléctrica, el sol y el cielo son las fuentes de las que se dispone para la iluminación natural. La luz natural llega al interior de un local directa o indirectamente, dispersada por la atmósfera y reflejada por las superficies del ambiente natural o artificial.

De la misma manera que una luminaria filtra y distribuye la luz emitida por la lámpara eléctrica que ésta contiene, la luminaria de la luz natural es la envolvente edilicia que admite la luz del sol en el interior de un espacio por transmisión, dispersión o reflexión de la misma. Esto incluye el cielo (bóveda celeste), así como al ambiente externo natural o construido por el hombre. Por lo tanto, el tipo de cielo, las superficies de la tierra, plantas y otros edificios son parte de la "*luminaria natural*". Estos elementos pueden hacer variar la iluminación interior de un momento a otro y de un caso a otro. Un caso extremo se da cuando no hay obstrucción sobre la abertura (ventana) y la luz natural proviene directamente desde el sol o el cielo. Otra situación extrema se da cuando la abertura de un local en altura está enfrentada a un edificio, de modo que no puedan ser vistos desde el interior el cielo y el suelo, en este caso la luz natural resulta de la luz reflejada desde el edificio que se ve desde la ventana.

En consecuencia, el sol, el cielo, las obstrucciones naturales (plantas, el terreno, montañas) y las obstrucciones artificiales (edificios, construcciones) contribuyen al grado de variación de iluminación natural de los interiores (Figura 1). Esta variación puede cambiar parcialmente debido al movimiento del sol y los cambios en las nubes y en parte porque el follaje de las plantas y la reflexión del piso cambian con las estaciones del año.

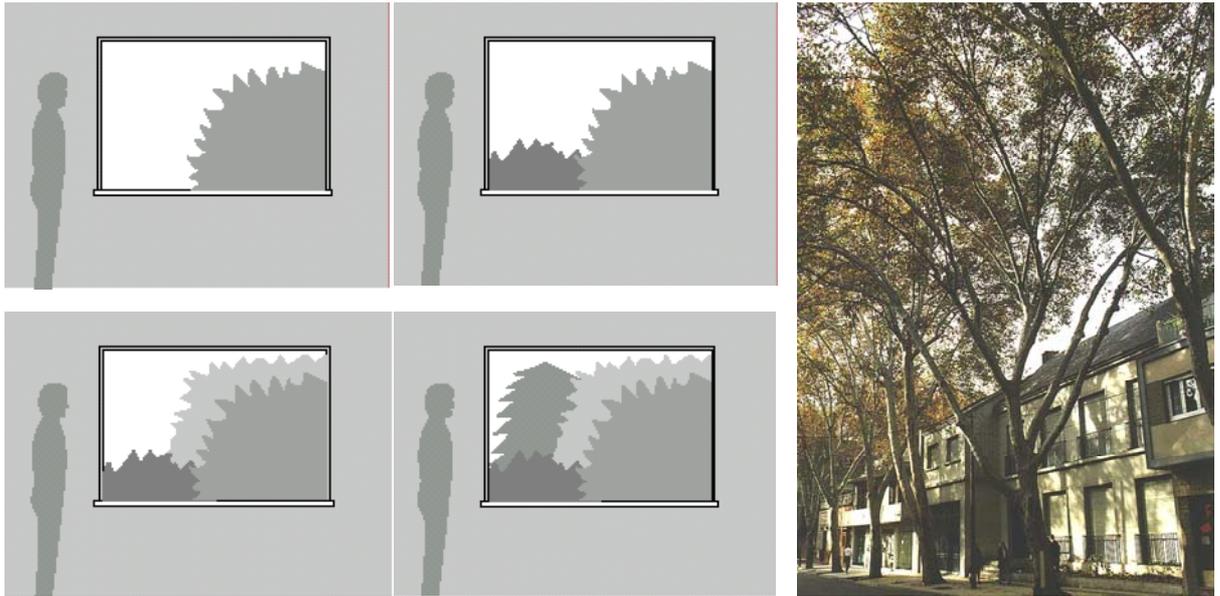


Figura 1.- Se muestra la variación de la luz natural que ingresa desde la ventana de una casa debida a las modificaciones estacionales del follaje natural

El sol determina las características esenciales de la luz natural disponible, el largo de los días y sus cambios estacionales, así como los cambios de carácter que ocurren durante el día. Estas características dependen de los movimientos de la tierra (Figura 2), del ángulo de sus ejes (influencia de la localización geográfica) y del ángulo de la superficie iluminada respecto al ángulo de incidencia del rayo de luz, denominado efecto coseno.

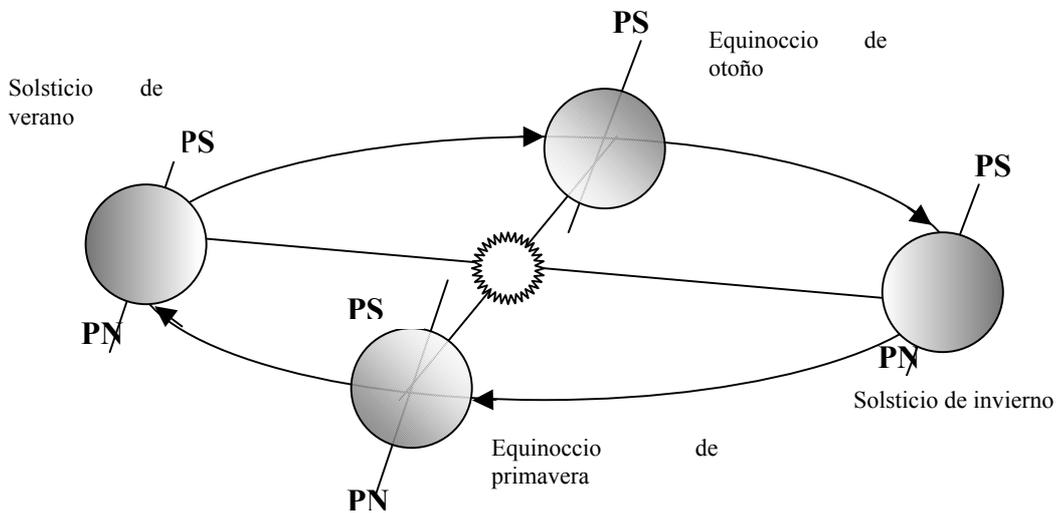


Figura 2.- Gráfico de la geometría solar

De la radiación total que llega a la superficie de la tierra después de atravesar la atmósfera, sólo la radiación visible -380 a 780nm- es relevante desde el punto de vista de la iluminación natural.

1.1. Fuentes de luz natural directa, indirecta y difusa

Se llama *luz solar directa* a la porción de luz natural que incide en un lugar específico proveniente directamente desde el sol.

La luz solar directa se caracteriza por:

- Su continuo cambio de dirección.
- Su probabilidad de ocurrencia.
- La iluminancia que produce en una superficie horizontal no obstruida.
- Su temperatura de color.

La *luz solar indirecta* es la que llega a un espacio determinado por reflexión generalmente en muros, pisos o cielorrasos. En los climas soleados, la luz natural indirecta constituye un verdadero aporte a los sistemas de iluminación natural, mediante uso de superficies reflectoras que dirigen la luz solar directa por ejemplo al cielorraso aumentando la cantidad de luz natural disponible y mejorando su distribución.

La *luz natural difusa* es aquella que tiene aproximadamente la misma intensidad en diferentes direcciones (la luz proveniente de la bóveda celeste sin considerar el sol).

Para aplicaciones de iluminación natural de edificios, lo que caracteriza la cantidad de luz natural disponible es la iluminancia en una superficie horizontal exterior no obstruida.

1.2. Tipos de cielo

Si bien la fuente primaria de luz natural es el sol, desde el punto de vista de la iluminación diurna de edificios, la fuente de luz considerada para el cálculo es la bóveda celeste, excluyendo siempre la luz solar directa sobre los planos de trabajo por su gran capacidad lumínica, que genera contrastes excesivos y causa deslumbramiento. Es muy importante evitar, desde el diseño mismo, el ingreso de luz directa del sol, mediante la difusión y reflexión de los rayos solares hacia los interiores, pues de lo contrario los ocupantes de los edificios tienden a eliminar totalmente el ingreso de luz natural y a reemplazarla por iluminación artificial, cambiando las condiciones ambientales interiores y perdiendo la oportunidad de ahorrar energía eléctrica durante las horas de sol.

Desde el punto de vista de sus características distintivas, el cielo puede ser descrito por su distribución de luminancias, lo que permite su utilización en los cálculos y en el análisis de sus efectos en el interior de un local.

Según las características locales de la bóveda celeste y las estrategias de diseño, se emplea la siguiente clasificación:

Cielo cubierto: definido para climas fríos por la CIBSE -Estandarización Británica- como un cielo cubierto en un 90% por nubes con sol no visible. Otras clasificaciones incluyen en este tipo de cielo cuando la proporción de nubes va desde un 70 a 100%. La ecuación para la distribución de luminancias para cielo cubierto es:

$$L_{\theta} = LZ \times \frac{1 + 2\text{sen}\theta}{3}$$

donde, **LZ** es la luminancia en el cenit, θ es el ángulo de altitud del punto considerado, como se muestra en la figura 3a. Un cielo cubierto es de 2.5 a 3 veces más luminoso en el cenit que en el horizonte (Figura 3a), lo que hace que sea favorable la iluminación cenital (ventanas altas o de techo), aprovechando así la parte más luminosa de la bóveda celeste, sin los riesgos de excesivos contrastes debidos a la luz solar directa. Sus valores y distribuciones varían con la localización, las características climáticas, densidad y uniformidad de las nubes y condiciones atmosféricas como la turbidez. El valor medio anual de iluminancia exterior sobre una superficie horizontal que se considera para los cálculos es de 5000 lux.

Una simplificación de este tipo de cielo es conocida como cielo de luminancias uniformemente distribuidas o **cielo uniforme** (Figura 3b), que supone una capa de nubes blancas de espesor constante y una atmósfera de turbidez constante, por lo tanto su distribución de luminancias es:

$$L(\theta) = \text{constante}$$

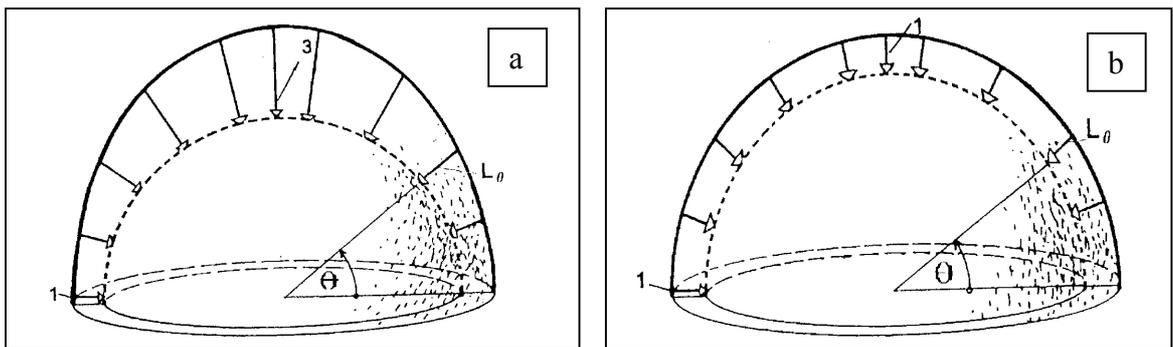


Figura 3.- a) distribución de luminancias del cielo nublado. b) distribución de luminancias del cielo uniforme.

Cielo parcialmente despejado: con presencia estacional del sol alternada por períodos de nubosidad variable (climas templado húmedo y cálido húmedo), la iluminancia en una superficie horizontal exterior no obstruida bajo este tipo de cielos, puede variar entre 100.000 lux (sin nubes) y 10.000 lux (con nubes interceptando el sol). Este tipo de cielo es el más difícil de predecir por la enorme variabilidad que puede presentar y por lo tanto no se dispone de un modelo específico simple.

Un cielo claro: definido por la CIBSE -Estandarización Británica- como un cielo no obstruido por nubes y por la IESNA -Estandarización Norteamericana- como un cielo obstruido en un porcentaje menor al 30%. En todos los casos se trata de una bóveda celeste donde el sol no está obstruido por las nubes. Su relación de luminancias es de 1 en el horizonte a 0,5 en el cenit (Figura 4)

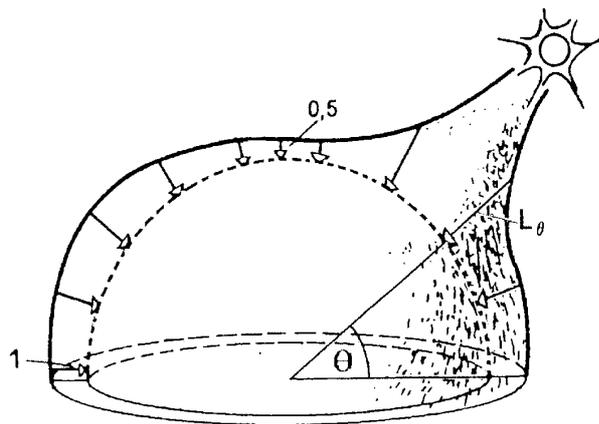


Figura 4. Distribución de luminancia de un cielo claro.

La ecuación de la distribución de luminancias del cielo claro es:

$$L_{\theta} = L_z \frac{1 - e^{-0,32 \frac{\text{sen } \theta}{\text{ZEN}}} (0,91 + 10e^{-3\kappa} + 0,45 \cos^2 \kappa)}{0,274(0,91 + 10e^{-3ZEN} + 0,45 \cos^2 ZEN)}$$

donde L_z es la luminancia del cenit, θ es el ángulo de altitud del punto considerado, κ es la distancia angular de este punto desde el sol y ZEN es el ángulo cenital del sol.

Hay dos problemas al caracterizar de esta manera las distribuciones de luminancias de los cielos. Por una parte, hay innumerables distribuciones de cielos posibles y solo tres de ellas pueden ser descritas por una fórmula matemática; por otra parte los valores de luminancia son determinados estadísticamente, con valores obtenidos como resultado de mediciones de varios años. A pesar de lo mencionado anteriormente, esta manera de caracterización es muy útil, ya que permite definir las condiciones de cielo ilustradas en las figuras 3 y 4. Las funciones sólo dan valores relativos, no absolutos, y muestran que:

- Cuando el cielo está nublado, el cenit es tres veces más luminoso que el horizonte.
- Si se considera un cielo uniforme a modo de simplificación para los cálculos, en este caso las luminancias provenientes del cielo “uniformemente nublado” son asumidas como isotrópicas (iguales independientemente de la dirección de donde provienen).
- En un cielo claro la parte del cielo más brillante es la que se encuentra en el sol y en anillo que lo circula (circunsolar) y la más oscura (azul intenso) es la que se encuentra a 90° del sol; de esta manera, el horizonte puede ser más luminoso que el cenit en condiciones de cielo claro.

El tipo de cielo, y su correspondiente distribución de luminancias –claridad-, característico del lugar donde se emplazará una construcción, puede ser establecido con precisión mediante el análisis de la frecuencia de ocurrencia de cielo claro o con nubes a partir de los datos meteorológicos locales, pudiéndose completar la información respecto a la distribución de luminancias con mediciones locales de cielo (Pattini y otros, 1994).

2. Disponibilidad de datos de luz natural exterior

El punto de partida para el aprovechamiento de luz natural en un diseño de iluminación es el conocimiento de la disponibilidad de luz exterior, tanto en sus niveles como en sus períodos de duración, de acuerdo a las horas del día y a las estaciones, sin embargo, lamentablemente, son muy pocos los países en el mundo en donde se toman registros de luz natural en forma regular.

La forma en que se trabaja para los cálculos es utilizando modelos de predicción que han sido desarrollados para cuatro aplicaciones diferentes:

- 1- Para establecer condiciones de diseño, que se utilizan en el desarrollo de herramientas simples de diseño, o bien para establecer un cielo de diseño.
- 2- Para establecer una evaluación hora-hora del recurso que luego sea introducido en herramientas complejas de simulación de consumos de energía en edificios tales como el RADIANCE, Energy-10, etc.
- 3- Para establecer promedios horarios de disponibilidad del dato en forma tabulada para el uso de arquitectos, ingenieros y diseñadores de sistemas de iluminación.
- 4- Como una herramienta de investigación que ayude a comprender el recurso de luz natural y el desarrollo de nuevas maneras de evaluar los sistemas de iluminación solar.

Los modelos de predicción se pueden dividir en los de validez local o regional y los generales.

2.1. Modelos de validez local de iluminancia exterior

El procedimiento de cálculo utilizado a partir de datos locales o regionales tabulados para evaluar el recurso y determinar las condiciones de cielo sólo puede realizarse en las localidades donde se ha medido y está disponible (Robbins, 1986), obteniendo un modelo de probabilidad de luz solar diferenciado para condiciones de cielo claro y cubierto especificando horas del día, mes y año.

Sin embargo, debido a que muy pocas estaciones meteorológicas en el mundo proveen los datos climáticos locales o regionales en forma tabulada, esta solución no es factible.

2.2. Programa internacional de mediciones de iluminación natural

La Comisión Internacional de Iluminación –del inglés Commission Internationale de L'Éclairage, CIE-, designó el año 1991 como el año internacional de la medición de la luz natural, estableciendo tres categorías de estaciones de medición *Básica*, *General* y *de Investigación*. En las dos primeras categorías las principales cantidades medidas son iluminancia y radiación, mientras que en la de *Investigación*, se realiza una recolección continua de la distribución de luminancia de cielo, así como de iluminancia, radiación y otros datos meteorológicos (Tregenza 1987, Dumortier 1998).

En Mendoza, Argentina, se desarrolló en 1993, un equipo de adquisición de datos que colecta datos exteriores de radiación solar e Iluminancia exterior directa, global y difusa, sobre superficie horizontal. Con los primeros datos obtenidos, se formuló un modelo de predicción de validez local (Pattini y otros 1996). Desde fines de 1999 esta estación de clase general (figura 5), que arroja datos minuto a minuto, forma parte de la red de estaciones de la CIE (figura 6). En la figura 7 se ha graficado la distribución de los valores registrados en la mencionada estación, de iluminancia global exterior sobre superficie horizontal, desde el amanecer hasta el anochecer, correspondientes a tres días del mes de Junio, en donde se pueden apreciar las importantes diferencias de niveles y su distribución según se trate de un día nublado (gráfico izquierdo), parcialmente nublado (gráfico central) o con cielo claro (gráfico derecho)



Figura 5.- Estación General para la medición de luz natural ubicada en Mendoza, Argentina, perteneciente a la Red Mundial CIE

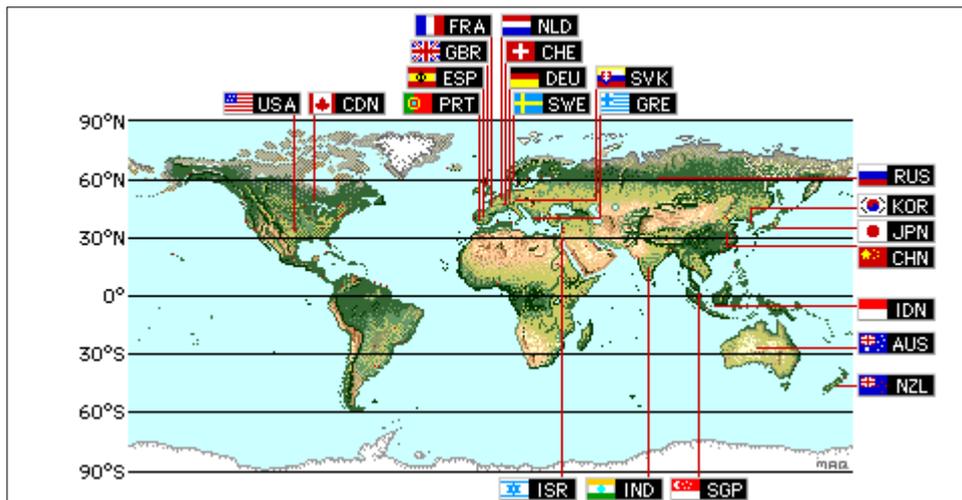


Figura 6.- Mapa con la distribución de estaciones de medición de la Red CIE, (previo a la incorporación de la estación ubicada en Mendoza, Argentina)

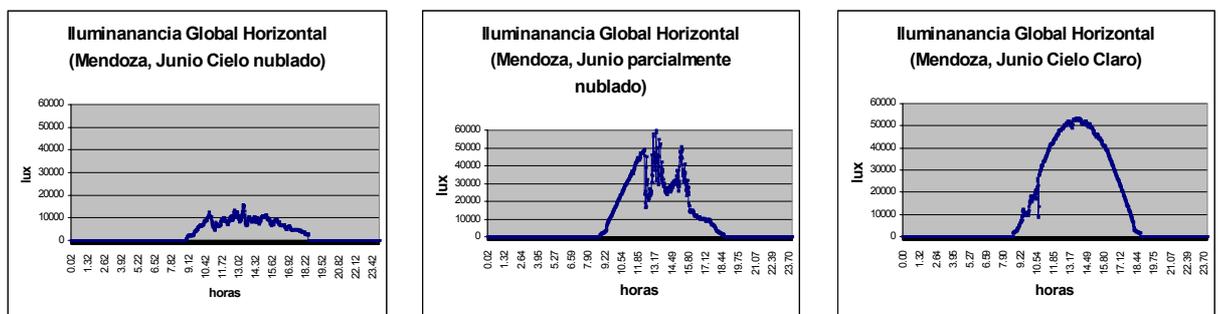


Figura 7.- Distribución horaria de valores de iluminancia global medidos en el mes de Junio en Mendoza, Argentina; correspondiente a tres situaciones: a) día nublado, b) parcialmente nublado y c) cielo claro.

2.3. Modelos de predicción generales

Una aproximación que no requiere coleccionar datos de iluminancia exterior por un período de tiempo extenso es la formulación de modelos de predicción. Un modelo de predicción de iluminancia es aquel que puede otorgar información acerca de la cantidad de iluminancia exterior que llega a una superficie de determinada orientación, en un intervalo de tiempo (generalmente horario), basándose en las mediciones y cálculos de aquellas condiciones climáticas que afectan la disponibilidad de la Luz Natural.

En este sentido, el modelo podría aplicarse a cualquier localidad, simplemente introduciendo los datos climáticos necesarios.

En muchos de estos modelos, la iluminancia global (EG) que llega a una determinada superficie está compuesta por la Iluminancia directa (ED), la Iluminancia difusa (ed) y la Iluminancia reflejada por el suelo o albedo (eg):

$$EG = ED + ed + eg$$

Si la superficie sobre la que se realiza el cálculo es horizontal, no se incluye la correspondiente componente reflejada por el suelo.

La mayor distinción entre los modelos se encuentra en si han sido formulados para cielos claros, parcialmente nublados o cubiertos.

3. Iluminación natural de los interiores

En el desarrollo preliminar del diseño de un edificio, así como en el diseño de los elementos que han de captar, dirigir y distribuir la luz natural, el criterio visual interior y los requerimientos básicos de iluminación deben ser prioritariamente conocidos y definidos. Esto nos remite a las normas y recomendaciones efectuadas a escala regional y/o internacional para los distintos tipos de locales (Gonzalo y otros, 2000; Pattini, 2000). A continuación, los diseñadores deben determinar los parámetros de disponibilidad de luz natural para la localidad donde se emplazará el edificio y la selección de los datos apropiados de luz natural que se usarán como base para la propuesta de diseño, para poder predecir entonces la contribución de iluminación natural para varios esquemas.

3.1. Objetivos de diseño

El diseño debe procurar **optimizar la orientación** de las plantas de los edificios para permitir, dentro de las posibilidades de los terrenos, el acceso de la luz natural a la mayoría de los locales. En la figura 8 se muestran locales, con distintas formas y orientaciones, y se indica en cuáles casos la situación es más favorable.

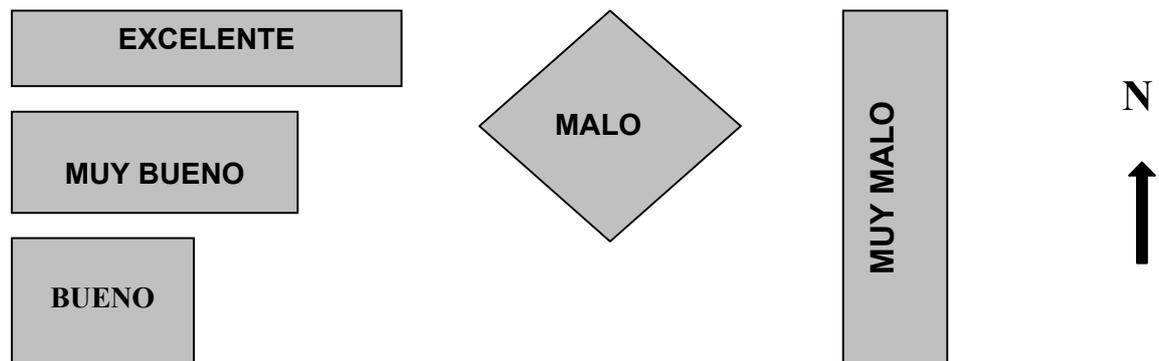


Figura 8.- Orientaciones favorables y desfavorables de los edificios para que la mayoría de los espacios tengan acceso a la luz natural.

En cuanto a las ventanas utilizadas para el mejor aprovechamiento de luz natural en la iluminación de interiores, los objetivos de diseño son:

- Maximizar la transmisión de luz por unidad de área vidriada (marcos y hojas de ventanas esbeltas)
- Controlar la penetración de luz solar directa sobre el plano de trabajo
- Controlar el contraste de claridad dentro del campo visual de los ocupantes, especialmente entre las ventanas y las superficies circundantes del local.
- Minimizar el efecto de reducción de ingreso de radiación debido al ángulo de incidencia de la luz -efecto reducción por coseno-. Esto significa que aventanamientos ubicados en la parte alta de los muros producen más iluminancia que una ventana más baja de la misma área.

- Minimizar el deslumbramiento de velo sobre los planos de trabajo, resultante de la visión directa de la fuente de luz en las ventanas superiores.
- Minimizar las ganancias de calor diurno durante el período de verano.
- Maximizar las ganancias térmicas diurnas en invierno para permitir la calefacción natural los espacios.
- Proveer sombra sobre las áreas vidriadas para evitar sobrecalentamientos estacionales o deslumbramientos según la orientación de la fachada donde está ubicada la ventana (Figura 9).

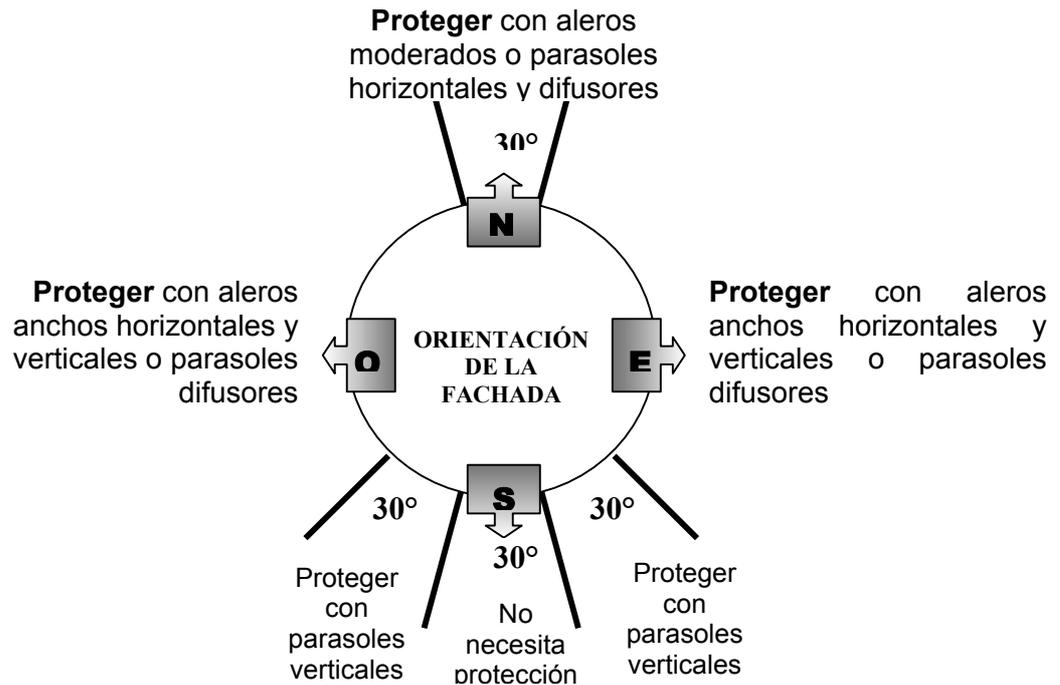


Figura 9.- Indicación sobre los distintos tipos de protección a utilizar sobre las ventanas para evitar deslumbramientos según orientación de la fachada en donde el aventanamiento esta emplazado.

3.2. Sistemas de iluminación natural

Llamamos sistema de iluminación natural al conjunto de componentes que en un edificio o construcción se utilizan para iluminar con luz natural. La cantidad, calidad y distribución de la luz interior depende del funcionamiento conjunto de los sistemas de iluminación, de la ubicación de las aberturas y de la superficie de las envolventes.

Básicamente son tres los sistemas de iluminación natural utilizados:

- Iluminación lateral
- Iluminación cenital
- Iluminación combinada

Iluminación lateral

La luz llega desde una abertura ubicada en un muro lateral, y es por eso que la iluminancia del plano de trabajo cercano a la ventana tiene un nivel alto y aporta en forma importante a la

iluminación general. Si nos movemos, alejándonos de la ventana, el valor de la iluminación directa decrece rápidamente y la proporción relativa de la componente indirecta (reflejada y difusa) se incrementa. Sin embargo, como se muestra en la figura 10, la cantidad y distribución de la luz que ingresa lateralmente a través de una abertura en un muro depende fundamentalmente de la orientación del muro donde la misma esta emplazada, debido a que en general, las ventanas orientadas al Norte reciben sol (iluminación directa) desde el amanecer hasta el atardecer, las orientadas al Este solo permiten el ingreso de la radiación directa desde el amanecer hasta el mediodía, La ubicadas hacia el Oeste desde el mediodía hasta el atardecer y las emplazadas hacia el Sur no reciben aporte de iluminación directa, solo reciben iluminación difusa y reflejada.

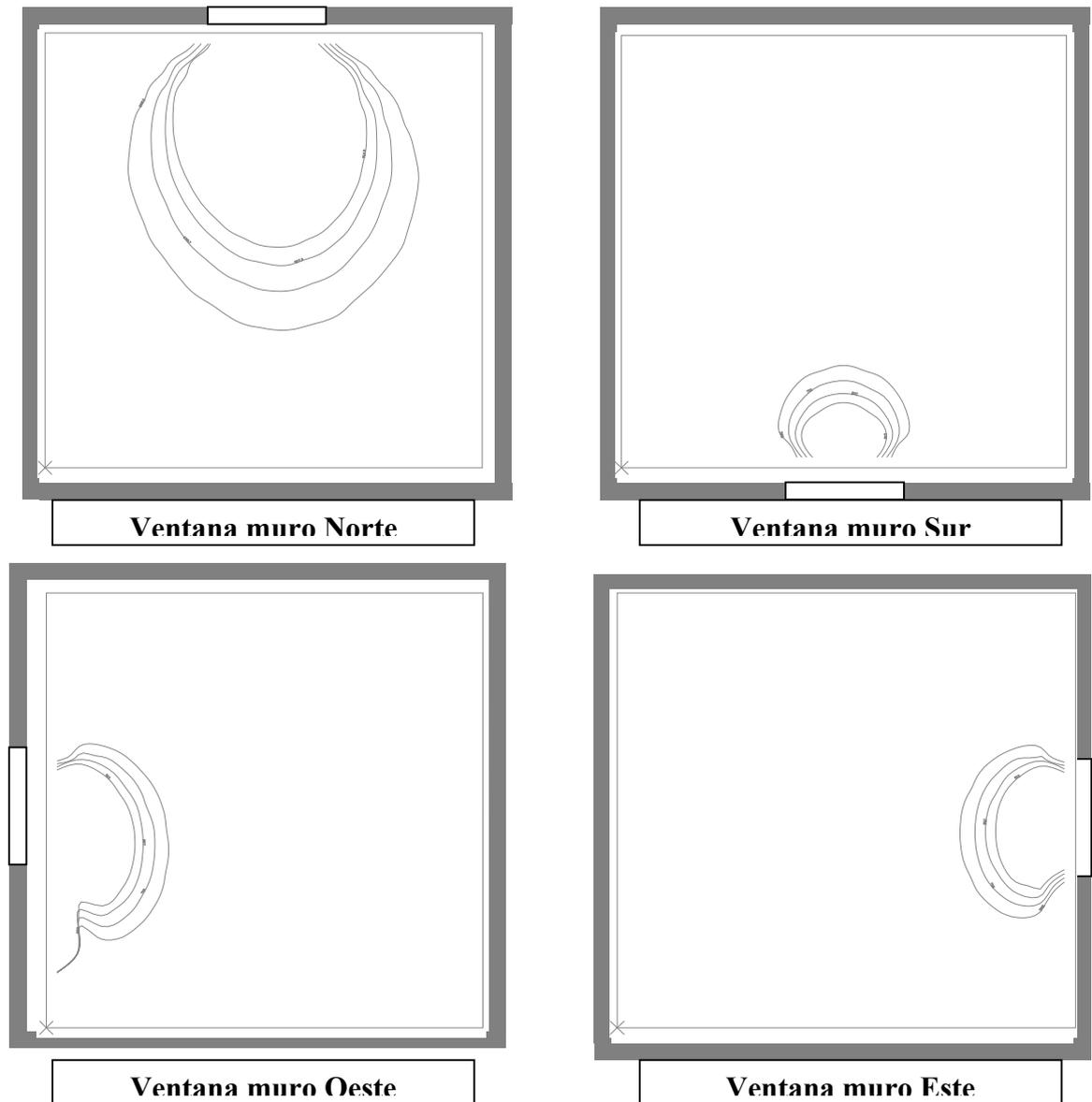


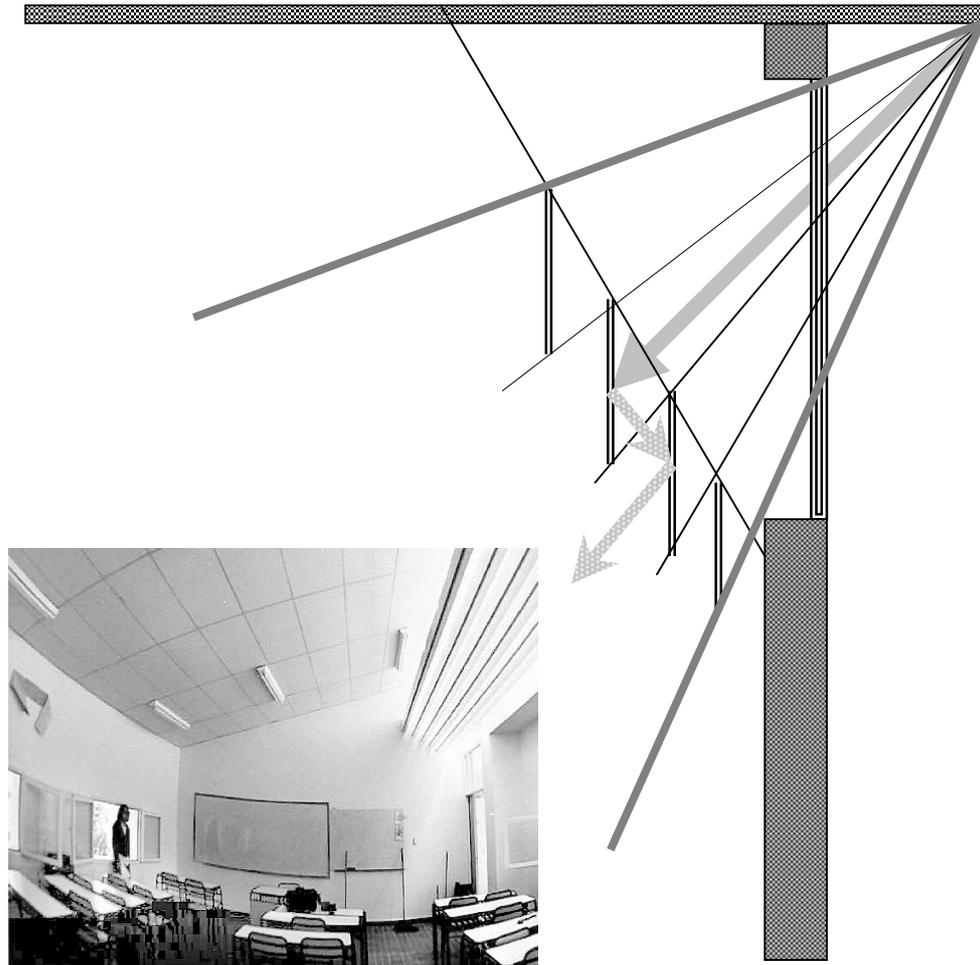
Figura 10.- Diferencias entre las curvas de isolux resultantes en el mismo espacio interior modificando solamente la ubicación de la ventana en los muros Norte, Sur, Oeste y Este.

Iluminación lateral y el muro norte

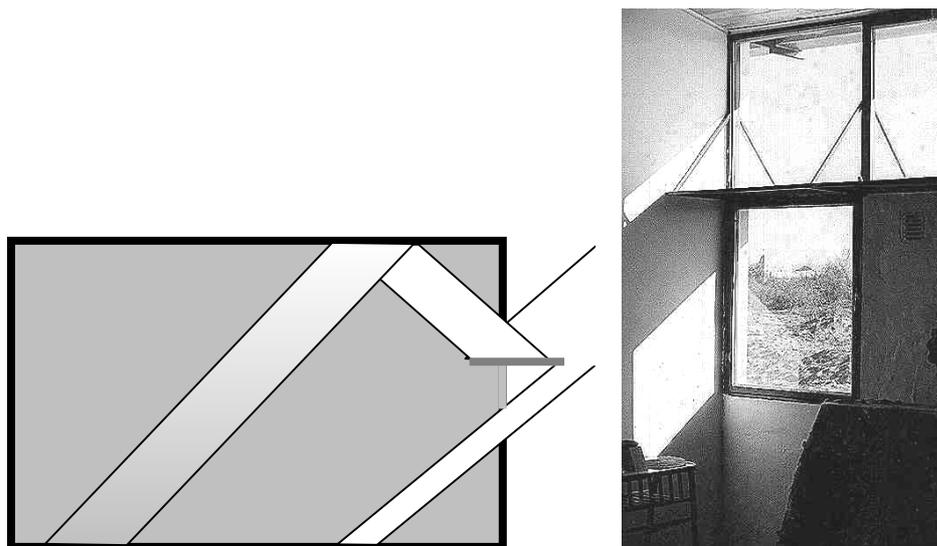
En diseños de edificios que utilizan energía solar pasiva para su acondicionamiento térmico, la misma superficie vidriada (ganancia directa solar) puede ser utilizada para calefaccionar

durante los meses de invierno, y enfriar por ventilación cruzada natural y para materializar el sistema de iluminación natural.

La ganancia térmica solar directa en fachadas verticales orientadas al norte, potencial causa de deslumbramiento, se puede controlar con un alero fijo o con sombra vegetal, bloqueando la radiación directa sobre las áreas vidriadas en los meses de verano, ingresando por lo tanto sólo iluminación difusa a los interiores. En la situación de invierno, lo que se desea es el ingreso del sol en el local para ganancia térmica, cosa que ocurre naturalmente, ya que el sol tiene ángulos bajos y el alero que sombreaba en verano (ángulo solar alto) permite el total asoleamiento de la superficie vidriada. Para evitar también el deslumbramiento y en consecuencia las molestias visuales, que produce el ingreso del sol directo en invierno a través de la ventana ubicada en la fachada norte, se puede difundir el rayo solar mediante estantes de luz interiores o difusores que redirijan o difundan la luz solar directa para iluminar (figura 11), una vez que ya ingreso al local para calefaccionar, acumulándose en los elementos constructivos con masa (muros y pisos).



a- Diseño de difusores interiores de luz solar directa en ventanas fachada norte



b- Diseño de estantes de luz interior - exterior en ventanas de fachada norte

Figura 11.- Control de la luz solar directa proveniente de aberturas ubicadas en la fachada norte.

Iluminación cenital

Se utiliza generalmente en las localidades con predominio de cielos nublados. El plano de trabajo es iluminado directamente desde la parte más luminosa de estos tipos de cielos, el cenit. La proporción de iluminación indirecta generalmente no excede el 25%. En la figura 12a se indica la distribución de las aberturas según su relación con la altura del local.

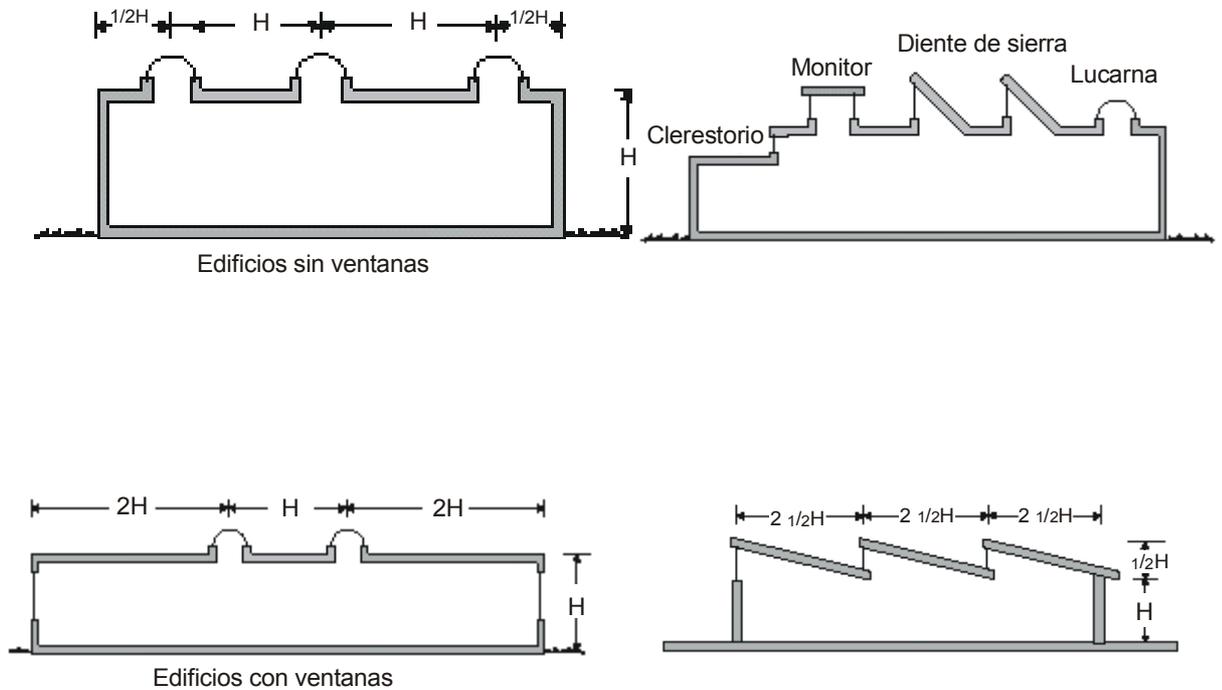


Figura 12.- Se muestran esquemas de aberturas para lograr: a) iluminación cenital y b) iluminación combinada

Iluminación combinada

En la iluminación combinada hay aberturas en muros y en techos. En un interior donde la envolvente no está claramente dividida en muros y techos, por ejemplo en cerramientos abovedados, se la considera como iluminación lateral si la abertura es más baja que 2.5 m; por encima de esta altura se considera iluminación cenital o superior. En la figura 12b se indica la mejor distribución en el espacio de las aberturas combinadas. En una iluminación combinada, la relación de la componente directa e indirecta de la iluminación puede ubicarse entre los dos extremos mencionados anteriormente.

4. Aplicaciones y desarrollos recientes

Por razones de facilidad constructiva y de costos, la mayoría de los aventanamientos para iluminación natural se realizan a través de los muros laterales. El factor más importante a tener en cuenta cuando se ilumina lateralmente es la orientación.

Los diseños con iluminación unilateral tienen tres problemas que resolver:

- La mala distribución de la iluminación lateral.
- La luz solar directa, que puede causar deslumbramientos

- El hecho de que sólo los locales con un muro al exterior o al techo (cielo) pueden ser iluminados con luz natural.

4.1. Bandejas reflectoras o estantes de luz

La distribución interior de la iluminación lateral, que ingresa por una ventana ubicada en la fachada norte, puede ser mejorada con la colocación de una bandeja o estante horizontal de material reflectante. Un estante de luz tiene el efecto de incrementar la componente reflejada y redireccionarla al cielorraso interior que trabaja como una fuente secundaria de luz natural.

La ubicación de los estantes de luz con respecto al plano del edificio afecta su exposición al cielo, y por ende su reflexión de luz sobre el cielorraso. Este tipo de estante de luz *intermedio* se utiliza dividiendo la parte superior e inferior del vidrio, reflejando luz adicional a través de la parte superior del vidrio, mientras actúa como un alero de sombra para la parte de abajo del vidrio en los meses de verano.

La contribución de los estantes de luz a la iluminación interior está directamente afectada por la reflectancia del cielorraso. El muro posterior también afecta la iluminancia, porque su aporte está limitado por su exposición directa a la luz solar y, en un grado menor, a la luz reflejada desde el techo; la exposición directa del muro posterior del reflector horizontal es despreciable.

Es un error de concepto generalizado que esta configuración aumenta la iluminancia en la parte posterior del local. En la práctica, la reflectancia adicional sobre la superficie del cielorraso no incrementa la luz directa del cielo que es obstruida por el estante. La principal ventaja del estante de luz intermedio es la reducción del deslumbramiento desde el cielo a los lugares próximos a la ventana, como se muestra en la figura 13.

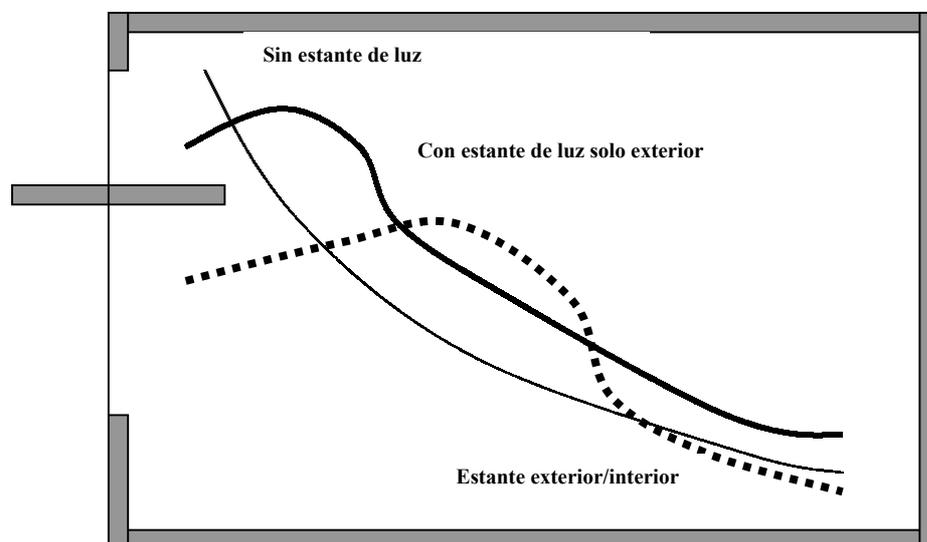


Figura 13.- Efectos de un estante de luz o bandejas reflectoras

4.2. Nuevos materiales

Se ha extendido la utilización de nuevos materiales que se aplican sobre los estantes de luz, como por ejemplo el *sistema Valra*, que utiliza un *material reflexivo flexible* que puede ajustarse estacionalmente. También se han desarrollado materiales *difusores reflexivos*

basados en el mismo principio, formados por tablillas fijas —tipo cortina americana— que con la finalidad de optimizar su mantenimiento, y en consecuencia máxima duración con efectividad a lo largo del tiempo, se los puede colocar entre dos paños de vidrio.

4.3. Vidrios prismáticos

Se utiliza el efecto que produce un prisma de redirigir la luz por refracción, produciendo un efecto similar al de los estantes de luz: al llegar la luz del sol directamente a las superficies de los múltiples prismas del vidrio (o material plástico), es redirigida hacia el cielorraso. Con cielo nublado su efecto es despreciable. También en este caso, para un mantenimiento adecuado en el tiempo, estas placas prismáticas se colocan entre dos vidrios transparentes, en la parte superior de la ventana. Pueden construirse fijos o permitir algún tipo de movimiento de acuerdo a las estaciones. Una sofisticación es la realización de una película prismática adherente que puede ser aplicada sobre la superficie de la ventana.

4.4. Sistemas con hologramas

Estos tienen una propuesta similar a la anterior, pero en este caso, la difracción es creada por estructuras microscópicas y los elementos ópticos holográficos pueden ser usados tanto en soporte móvil como fijo. El efecto de arco iris puede hacer que no sea adecuado para todas las aplicaciones.

4.5. Lumiductos

Estos sistemas son utilizados cuando un local no tiene posibilidades de recibir la luz natural porque no tiene ningún muro expuesto al exterior o bien porque se considera insuficiente la luz natural que ingresa. En la figura 14 se muestra un ejemplo. Tienen tres partes constitutivas:

- Un captador de luz solar
- Un conductor de luz solar
- Un emisor de luz al interior del local (o boca de salida)

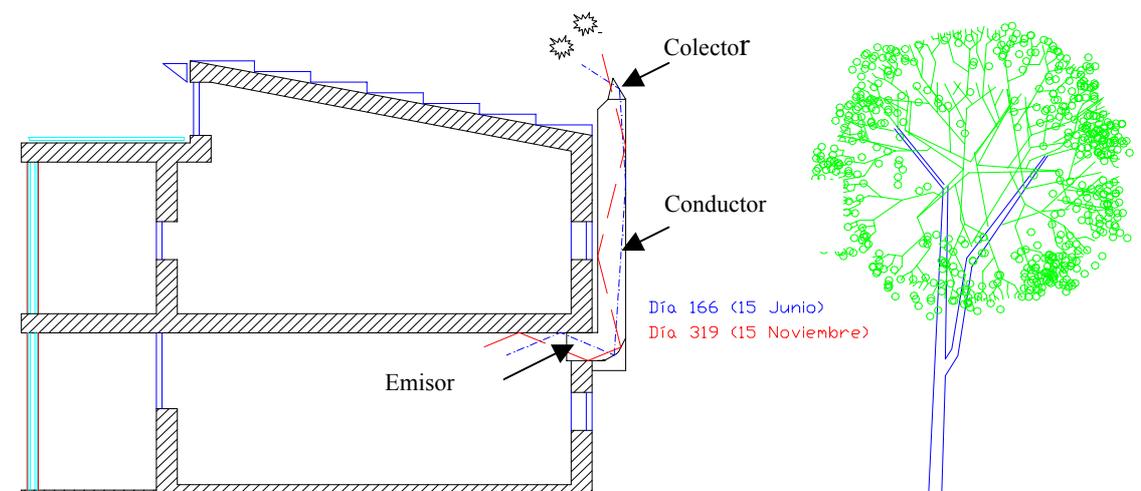


Figura 14.- Diseño de lumiducto (con la indicación de sus componentes) para aula de planta baja.

Este sistema es sólo justificable en climas soleados y no responde con eficiencia a la luz natural difusa.

5. Tratamiento cuantitativo de la luz natural

La iluminación de un interior es cuantificada por la iluminancia en el Plano de Trabajo. El Plano de Trabajo de referencia, es un plano ficticio, horizontal, vertical o con una determinada inclinación (dependiendo del uso que se le dará al local: oficina, aula, museo, etc.) formado por una grilla de puntos equidistantes y de una altura correspondiente con la función (ej. 0,80 m para oficinas).

Los procedimientos para calcular la iluminación interior en cada uno de los puntos de la grilla del Plano de trabajo, proveniente de fuentes naturales han sido propuestos por diferentes países desde hace más de 90 años (Fontoynt, 1998). En general en la actualidad se pueden clasificar en dos:

5.1. Métodos que proveen iluminancia relativa (los valores se expresan en porcentajes).

Los métodos de análisis que determinan la iluminancia relativa, le permiten al diseñador o analista hacer una predicción del porcentaje de la Luz Natural exterior que es utilizada para iluminar el interior analizado. La iluminancia relativa es frecuentemente percibida como una constante que no varía con la hora del día ni con la orientación de la abertura (Factor de Luz Natural).

5.2. Métodos que proveen valores absolutos de iluminancia interior de un local (los valores se expresan en lux).

Estos métodos le otorgan al analista o diseñador una predicción de la cantidad de iluminación interior provista por la Luz Natural en cada punto considerado del local. La iluminancia absoluta varía con el tiempo (hora, mes, estación), con la orientación de la abertura, y con las condiciones de cielo (claro, parcialmente nublado y cubierto)

5.3. Factor de luz natural

Este método ha sido desarrollado para condiciones de cielo nublado, pues la iluminancia relativa es una constante, lo que no ocurre bajo condiciones de cielo claro.

El Factor de Luz Natural (FLN) es la relación entre la iluminancia en un punto interior (E_i) y la iluminancia horizontal en una superficie exterior no obstruida (E_e) medidas en forma simultánea, de manera que:

$$\text{FLN} = (E_i/E_e) \times 100$$

Obteniéndose:

$$E_i = (\text{FLN}/100) \times E_e$$

Como la iluminación externa está en constante cambio, la iluminancia interior la acompaña, de manera que la iluminancia cambia su valor en el tiempo t:

$$E_i(t) = (FLN/100) \times E_e(t)$$

En esta ecuación el término $E_e(t)$ representa el aporte del cielo como luminaria y el término $FLN/100$ depende del diseño de arquitectura.

El *Factor de Luz Natural* es una expresión de la eficacia de utilizar la luz del cielo para proveer iluminancia horizontal en un interior, es decir que este factor indica en qué medida el edificio y su interior -muros y cielorraso-, así como las obstrucciones externas, restringen la potencial disponibilidad de iluminancia. El FLN podría ser del 100% en ausencia de un edificio o de una obstrucción.

En una forma simplificada se puede decir que el FLN considera los tres componentes siguientes:

1. La componente de cielo (C_c): es la proporción de luz que aporta de la porción de cielo que "ve" el punto interior donde se calcula la iluminancia.
2. La componente reflejada del exterior (C_{re}): es la proporción de luz reflejada que llega al punto interior donde se calcula la iluminancia desde todas las superficies del exterior.
3. La componente reflejada del interior (C_{ri}): es la proporción de luz reflejada que llega al punto interior donde se calcula la iluminancia desde todas las superficies interiores.

$$FLN = C_c + C_{re} + C_{ri}$$

El Factor de Luz Natural cuantifica todos los efectos del exterior y del interior en la iluminancia de un punto interior considerado, siendo una función de:

- La posición de un punto considerado
- Las dimensiones interiores
- Las reflectancias de las superficies interiores
- La localización, tamaño y estructura de la abertura
- La localización, tamaño y reflectancias de las obstrucciones externas
- Las reflectancias del suelo (albedo)

Si se analiza ahora el FLN en distintos puntos del ambiente interior (Plano de Trabajo), y para un dado valor de E_e en el tiempo, el mismo cambia de un punto a otro de la misma forma que lo hace la iluminancia del interior, es decir, tiene igual distribución. Esto significa, que una curva de distribución de iluminancia E_i (lux) tendrá una forma similar a la curva de FLN (%).

En general se especifican los siguientes valores críticos del Factor de Luz Natural:

- Valor de FLN promedio
- Valor de FLN mínimo
- Valor de uniformidad FLN_{min}/FLN_{prom}

que, de acuerdo a lo dicho en el párrafo precedente, están en relación directa con los valores respectivos de iluminancia en el interior.

5.4. Mediciones en modelos a escala

La evaluación de la luz natural en modelos a escala (Pattini y otros, 1993) es muy utilizada porque además de permitir un análisis cuantitativo (valores interiores medidos) otorga datos cualitativos de la distribución de la iluminancia interior. La luz no tiene dimensión escalar, por lo tanto, los valores de iluminancia medidos en maqueta serán los mismos que se registrarán en el local de interés. El único factor de posible distorsión está referido a las reflectividades de las superficies interiores, es decir que habrá que utilizar en el interior de las maquetas superficies con valores de reflexión similares a los que se utilizarán para pintar el local en la realidad.

La evaluación en modelos a escala puede realizarse bajo una bóveda celeste natural o en cielo artificial. Este último permite sólo estudiar configuraciones comparativas, ya que no permite el análisis de la presencia estacional del sol. En general, los cielos artificiales reproducen las condiciones exteriores similares a las de la bóveda celeste uniformemente cubierta.

Para medir la cantidad de luz interior de maquetas se utiliza un luxímetro, midiendo sobre una grilla que simula la altura del plano de trabajo, o bien con varios sensores de lectura simultánea.

Para poder establecer los valores de FLN pueden realizarse mediciones de iluminancia exterior e interior simultáneas.

5.5. Modelos matemáticos para el análisis de la iluminación natural interior de edificios

Los modelos matemáticos ofrecen ventajas en su modo de obtener los valores de iluminación interior:

- Permiten un análisis rápido de varias configuraciones de aperturas para modificar o verificar diferentes conceptos de diseño, incluyendo la forma del local, el tamaño de ventanas, la orientación de las aberturas y otras variables.
- La mayoría de las técnicas de modelización matemáticas están disponibles en forma de programas computacionales comerciales.
- Pueden utilizarse para determinar el rendimiento de los sistemas de iluminación (natural y artificial) en un período de tiempo determinado, con posibilidad de visualizar los ambientes interiores, ya sea en monitor de PC o en impresos en papel.

Desventajas:

- Las simplificaciones asumidas por los modelos matemáticos utilizados como herramientas simples de diseño a menudo limitan su uso y reducen su exactitud y precisión en comparación con el comportamiento del edificio o respecto a un modelo a escala.
- Los modelos matemáticos más avanzados utilizan el método de transferencia de flujo del que es imposible su cálculo manual.
- Las técnicas de modelización matemática están limitadas por el número de casos que han sido estudiados para desarrollar el modelo matemático.

Los trabajos de cálculos lumínicos basados en modelos matemáticos pueden hoy ser realizados con un importante número de simuladores que se ajustan a cada necesidad de

respuesta, pero el debate sobre la validación del simulador que se debe utilizar se centra en conocer si los mismos parten de datos que sean válidos para calcular los aportes en las condiciones similares en donde se emplazaran los edificios bajo análisis (cielos típicos).

Como dato general podemos decir que ninguno de ellos tiene el grado de precisión que puede lograrse con evaluaciones en modelos a escala. Pero son de gran utilidad en las etapas de prediseño y evaluación comparativa de estrategias. Esto es importante conocerlo, principalmente en los climas soleados, en los que conviene manejar con mayor grado de ajuste los diferentes aspectos que intervienen en los sistemas de iluminación natural para evitar en la práctica posibles situaciones de discomfort térmico y/o deslumbramientos.

Los programas más utilizados como herramientas de predicción son: SuperLite y Radiance desarrollados por el Laboratorio Lawrence Berkeley de California, Estados Unidos, Lumen Micro de Lighting Technologies, y el Genelux desarrollado en Francia.

En el siguiente sitio de internet pueden obtenerse herramientas de cálculo sin costo:

<http://www.aud.ucla.edu/energy>

Conclusiones

La iluminación natural constituye un recurso sustentable para la iluminación de edificios y es una alternativa preferida por los usuarios.

Para el aprovechamiento de la luz natural en edificios y sus partes constituyentes, es necesario comprender los principios de la iluminación natural, para integrarlos adecuadamente desde el inicio del proceso de diseño. Esta comprensión comienza con el conocimiento adecuado del sol y sus radiaciones luminosas para la obtención de clasificaciones características para las distintas regiones, pues los trabajos de normas y recomendaciones sobre aprovechamiento de luz natural derivan del conocimiento que tienen los países que poseen datos y modelos verificados.

En cuanto al desarrollo preliminar del diseño de un edificio, el criterio visual interior y los requerimientos básicos de iluminación deben ser definidos a priori, teniendo en cuenta disponibilidad de la luz natural regional como un requerimiento para realizar los cálculos de valores absolutos y relativos de luz natural. Es fundamental el conocimiento, tanto de la cantidad como de la duración y características de la luz natural en el Hemisferio Sur, particularmente en nuestro país en donde una gran cantidad de territorio se encuentra en condiciones de cielo claro.

El aprovechamiento de la luz solar ofrece una real oportunidad para el ahorro de energía eléctrica, con los consiguientes beneficios ambientales que ello otorgaría, en espacios creados para el bienestar, en el marco de un desarrollo y utilización responsables de los recursos naturales que aún hoy disponemos.

Bibliografía

Pattini, A., J. Mitchell, C. de Rosa, 1994. "Determinación y Distribución de Luminancias de Cielos para diseños con iluminación natural". *Actas de la 17 Reunión de ASADES. Tomo II*, pp. 521-527.

Robbins, C., 1986. *Daylighting, Design and Analysis*, Van Nostrand Reinhold Co. NY.

Tregenza, P. R., 1987. "The CIE/WMO international daylighting measurement programe". *CIE Journal*, Vol.6, No.2.

Dumortier D., 1997. "Evaluation of luminous efficacy models according to sky types and atmospheric conditions". Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin, France. Proc. Lux Europa '97, Amsterdam.

Pattini, A. et al., 1996. "An exterior illuminance predictive model for clear skies of mid-western Argentina", *Energy and Buildings*, Vol. 24, pp. 85-93.

Gonzalo G.E. et al., 1998. *Manual de Arquitectura Bioclimática*, Capítulo 10, ISBN 950-43-9028-5. Tucumán, Argentina.

Pattini, A., 2000. "Recomendaciones de niveles de iluminación en edificios no residenciales. Una comparación internacional", *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4, N° I, 05.07-05.13.

Fontoynt, M., 1998. *Daylight Perfomance of Buildings*, James and James, UK.

Pattini, A., J. Mitchell y C. de Rosa, 1993. "Evaluación de iluminación natural en aulas mediante simulación y modelos a escala", presentado en la XVI Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, Publicado en Actas ASADES '93.

Moore, F., 1985. *Concepts and Practice of Architectural Daylighting*, Van Nostrand Reinhold Company, NY.