

BIBLIOGRAFIA

- a. Sparman Jurg M. "Public Transport and traffic management. Applications of information and communication technologies to urban function. Organization for economic cooperation and development. 1991
- b. Transport and the environment. Organization for economic cooperation and Development. 1988.
- c. Agence Francaise pour la Maitrise de L' energie. "L'efficacite energetique de la regulation du trafic urbain. Fiche n° 7. 1986.
- d. Dickey John W. "Manual del Transporte Urbano" Instituto de Estudios Administracion local. Madrid. 1977.
- e. Wilson A.G. "Inter Regional Commodity flows: Entropy-Maximizing approaches" Geographical Analysis. 1970.
- f. Valdez Antonio "Ingenieria de Trafico" Editorial Dossat. S.A. Madrid.
- g. Transports. "Le editions Techniques et Economiques" n° 360. 1993.
- 1. Perez, Carlota, Conceptos planteados en "Revoluciones Tecnologicas y Transformaciones socio Institucionales" SPRU, University of Sussex. 2º Seminario Jorge Sabato, Venezuela, 1988.
- 2. Fajzinder, "La industrializacion trunca de A. Latina" Centro Editor de A. Latina. 1984.
- 3. Datos propios obtenidos de una encuesta de origen y destino de los viajes en la microregion del Gran La Plata, en junio/noviembre de 1994.

REFERENCIAS

1. INT
El nit
años
llevó
reunido
con l
discue
relaci
renova
ISES a
represe
trabaj
En es
en el
politi
posibi
se pre
y para
2. DES
En tot
trabaj
tales
Arquit
finale
volum
calida
realiz
podemo
valora
Alisac
Fue n
el te
solare
las pé
edific
Fraunh
aplica
aspect
de una
con tr
sur de
a pesa

MODELO DE PREDICCIÓN DE ILUMINANCIA EXTERIOR PARA CIELO CLARO

Alejandro Mermet [#], Andrea Pattini ^{**}, Carlos de Rosa ^{*}.

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda. Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CRICYT- ME).
CC 131 - 5500 - Mendoza.

INTRODUCCION

Predecir la iluminancia de superficies expuestas al sol directo y del cielo en días claros, es esencial para cualquier estudio de estrategias de iluminación natural en edificios. La disponibilidad de luz diurna, para iluminancia exterior, es un campo considerablemente diferente al estudio de la medición y simulación de la radiación solar sobre todo en el aspecto térmico [1], ya que el intervalo de longitudes de onda de la luz visible es solo una franja de todo el espectro de la radiación solar, cuyo comportamiento físico se distingue en cuanto a las longitudes de onda absorbidas y dispersadas por los gases atmosféricos del espectro completo, que incluye radiación infrarroja y ultravioleta además del visible.

Desde hace poco más de dos décadas, la forma tradicional de estudiar la fuente de luz diurna ha sido tomar mediciones "in situ" y luego analizar estos datos para establecer un modelo local específico de iluminancia [1]. Es en este procedimiento donde se funda la principal limitación de estos modelos, pues son aplicables sólo en forma local dado que las mediciones y datos climáticos registrados o calculados sólo describen condiciones atmosféricas particulares. Por otra parte, frecuentemente sólo simulan la iluminancia exterior global para superficie horizontal.

Modelos desarrollados en los últimos años, permiten el cálculo de iluminancia externa haciendo un estudio de los diferentes componentes del recurso de iluminación natural (directa, difusa y reflejada), partiendo de ecuaciones complejas, donde se tiene en cuenta la geometría solar y las condiciones climáticas de la región [2].

Normalmente, los cálculos de iluminancia exterior se basan en datos meteorológicos calculados a partir de datos o valores medidos de radiación solar global, directa y difusa, que luego son convertidos a valores de iluminancia Externa mediante la aplicación de una constante, llamada Eficacia Luminosa, definida como un cociente entre la iluminancia y la radiación solar [1], que determina la eficiencia lumínica del cielo. Estos modelos son relativamente fáciles de formular, pero para el cálculo de las constantes atmosféricas es necesario contar con datos meteorológicos medidos así como de iluminancia. Desafortunadamente en Argentina la red de estaciones meteorológicas dependientes del Servicio Meteorológico Nacional y aquellos de la Red Solarimétrica que cuentan con registros de radiación solar, no proveen datos de iluminancia.

Otro modo para disponer de datos de iluminancia exterior global y difusa para superficie horizontal y vertical, utilizando las relaciones angulares de la geometría solar, es a partir de la estimación de la iluminancia directa normal en base a datos atmosféricos, en forma análoga al tratamiento de la radiación solar.

MODELOS DE ILUMINANCIA

MODELO DE DOGNIAUX:

En el modelo desarrollado por Dogniaux para la CIE en 1967 [1], la iluminancia global horizontal para cielo claro es definida según la siguiente ecuación:

$$E_{Gc} = E_{Dc} + E_{dc} \quad (1)$$

[#] Becario Iniciación (CONICET)

^{**} Becaria Perfeccionamiento (CONICET)

^{*} Investigador Independiente (CONICET)

donde E_{dc} es la componente directa y E_{dc} es la componente difusa de la iluminancia.

$$E_{dc} = E_{sc} e^{-\beta m \Gamma} \quad (2)$$

donde, E_{sc} es la constante solar extraterrestre y se calcula según la siguiente expresión:

$$E_{sc} = 126.820 \cdot E_o \text{ (lux)} \quad (3)$$

E_o es el factor de excentricidad de la órbita terrestre y puede calcularse según Spencer [3] como :

$$E_o = 1.000110 + 0.034 221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos^2 \Gamma + 0.000077 \sin^2 \Gamma \quad (4)$$

donde, $\Gamma = 2 \pi(\text{dia}-1)/365$.

T es el factor de turbidez:

$$T = [(h + 85) / (39.5 \cdot e^{-w} + 47.7) + 0.1] + (16 + 0.22 \cdot w) \beta \quad (5)$$

donde, w es la cantidad de agua precipitable y β es el coeficiente de turbidez, m es la masa relativa del aire calculada a partir de la ecuación de Kasten :

$$m = 1 / (\cos \theta_z + 0.158 + (93.885 - \theta_z))^{-1.253} \quad (6)$$

B es el coeficiente de extinción atmosférico y se calcula según:

$$B = D - f \cdot T \quad (7)$$

donde, D y f son coeficientes propuestos por Dogniaux que dependen del coeficiente de turbidez β .

β	D	f
0.05	0.1512	0.0262
0,1	0.1656	0.0215
0,2	0.2021	0.0193

Tabla II

En este modelo el coeficiente de Extinción Atmosférica (B) deja de ser una constante para pasar a depender de las condiciones atmosféricas de turbidez.

La iluminancia difusa horizontal para cielo claro se calcula a partir de :

$$E_{dHc} = a_0 + a_1 \cdot h^2 + a_2 \cdot h^3 \quad (8)$$

Donde las constantes a están tabuladas para distintos coeficientes de turbidez y diferentes cantidades de agua precipitable en la atmosfera w [4]. Este modelo predice únicamente la iluminancia sobre superficie horizontal.

MODELO DE ROBBINS- HUNTER

Fue desarrollado para obtener la iluminancia exterior en valores mensuales hora-hora, para superficies de cualquier orientación, en función de la localidad, nubosidad, índice de claridad, turbidez, altitud sobre el nivel del mar y una serie de constantes mensuales de iluminancia extraterrestre, [1],[3]. La iluminancia directa para día claro se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_{DC} = E_{DN} \cdot \cos \theta \quad (9)$$

donde, θ es el ángulo de incidencia de los rayos solares, y $\cos \theta$ [4] se calcula a partir de:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & (\text{sen} \phi \cdot \text{cos} \beta - \text{cos} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{cos} \gamma) \text{sen} \delta \\ & + (\text{cos} \phi \cdot \text{cos} \beta + \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{cos} \gamma) \cdot \text{cos} \delta \cdot \text{cos} \omega \\ & + \text{cos} \delta \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} \omega \end{aligned} \quad (10)$$

En la ecuación precedente, ϕ es la latitud, β es la inclinación de la superficie, γ es la orientación de la superficie, δ es la declinación solar, ω es el ángulo horario. Para la declinación solar, se utiliza la ecuación de Spencer [4]:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \text{sen} \Gamma \\ & - 0.006758 \cdot \text{cos}^2 \Gamma + 0.000907 \text{sen}^2 \Gamma \\ & - 0.002697 \text{cos}^3 \Gamma + 0.00148 \text{sen}^3 \Gamma \end{aligned} \quad (11)$$

donde $\Gamma = 2\pi (\text{día} - 1) / 365$.

La iluminancia sobre superficie horizontal se puede calcular como:

$$E_{\text{DHC}} = E_{\text{DN}} \cdot \cos \theta_z \quad (12)$$

donde, θ_z es el ángulo cenital del sol y se obtiene a partir de:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \text{cos} \delta \cdot \text{cos} \phi \cdot \text{cos} \omega \quad (13)$$

En las ecuaciones (9) y (12), E_{DN} es la iluminancia normal:

$$E_{\text{DN}} = E_{\text{SC}} \cdot e^{-\alpha \tau} \quad (14)$$

E_{SC} es la iluminancia extraterrestre aparente, (determinada por Dogniaux en 126.820 lux, y por Gillette en 127.500 lux [1]) tratada aquí como una constante mensual (Tabla I), es un factor de condición atmosférica local que varía con la turbidez, el exponente α se puede distinguir, para baja y alta turbidez (α_1 y α_2 respectivamente).

$$\alpha_1 = \tau / \cos \theta_z \quad (15a)$$

$$\alpha_2 = B \cdot [1 / (\cos \theta_z + 0.158 (93.885 - \theta_z)^{-1.253})] \cdot [[(h + 85) / (39.5 \cdot e^{-w} + 47.4) + 0.1] + (16 + 0.22 w)^* \beta] \quad (15b)$$

Donde τ es la profundidad óptica de la atmósfera, comprende la atenuación atmosférica por dispersión molecular y por dispersión de partículas y aerosoles; B: coeficiente de extinción atmosférica; β es el coeficiente de turbidez; w es la cantidad de agua precipitable y $h = 90^\circ - \theta_z$ altura o altitud solar.

La iluminancia global para superficie horizontal puede calcularse como:

$$E_{\text{GHC}} = E_{\text{DHC}} + E_{\text{dHC}} \quad (16)$$

donde, E_{DHC} es la iluminancia directa vista de la ecuación [3] y E_{dHC} es la iluminancia horizontal difusa, que se puede calcular como:

$$E_{\text{dHC}} = C \cdot E_{\text{DN}} / (\text{CN})^2 \quad (17)$$

donde C es el cociente entre la radiación difusa/global o el cociente entre la iluminancia difusa/global (Tabla I) $(\text{CN})^2$ es índice de claridad para luz natural diurna, y puede considerarse igual al índice de claridad radiativo que se obtiene como el cociente entre la radiación Normal para día claro con la media local de vapor de agua y la radiación Normal, calculada con vapor de agua para atmósfera básica.

Mes	E_{sc} (Lux)	B	C	τ
Enero	134 783	0,142	0,058	0,142
Febrero	134 127	0,144	0,060	0,144
Marzo	132 628	0,154	0,068	0,156
Abril	130 472	0,177	0,092	0,180
Mayo	128 316	0,194	0,118	0,196
Junio	126 629	0,206	0,133	0,205
Julio	126 067	0,207	0,137	0,207
Agosto	126 535	0,203	0,126	0,201
Setiembre	128 129	0,182	0,096	0,177
Octubre	130 284	0,163	0,076	0,160
Noviembre	132 534	0,151	0,064	0,149
Diciembre	134 127	0,143	0,058	0,142

Tabla I

La iluminancia global para superficie vertical se puede calcular como:

$$E_{Gvc} = E_{Dvc} + E_{dvc} + E_{gvc} \quad (18)$$

E_{Dvc} es la iluminancia directa vertical calculada a partir de la ecuación (9) haciendo $\beta=90^\circ$. E_{dvc} es la iluminancia difusa vertical que se obtiene de una ecuación de la forma:

$$E_{dvc} = 0,5 \cdot E_{dHc} \quad (19)$$

E_{gvc} es la componente reflejada por el suelo de la luz natural, en general es:

$$E_{Gvc} = (1 - \cos\beta/2) \rho \cdot E_{GHc} \quad (20)$$

si $\beta=90^\circ$ y ρ es el albedo:

$$E_{Gvc} = 1/2 \rho \cdot E_{GHc} \quad (20a)$$

MODELO PROPUESTO

En el modelo propuesto se calculan los valores de iluminancia directa (E_D), iluminancia global vertical (E_V) y (E_H) para cada hora del día partiendo de la latitud, día juliano del año y del albedo del suelo.

CLASIFICACIÓN DE ATMÓSFERA

Previo a la descripción del modelo en sí, es necesario definir el tipo de atmósfera, estableciendo una clasificación. En el modelo planteado por Robbins-Hunter, se distingue el factor de condición atmosférica, según corresponda a condiciones de turbidez baja o alta, siendo esta clasificación muy general, en el modelo de Dogniaux se distinguen tres atmósferas con distintos coeficientes de turbidez.

Según la fórmula de Ångström [3], el coeficiente de atenuación debido al scattering y la absorción de aerosoles en la atmósfera puede escribirse como:

$$\kappa = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (21)$$

donde, β es el coeficiente de turbidez de Ångström, λ longitud de onda, α distribución del tamaño de partículas (0.5 y 2.5 empleado comunmente $\alpha = 1.3$). La transmitancia de la atmósfera se calcula:

$$\tau_{\alpha} = e^{-\kappa \cdot m}$$

Se puede clasificar la atmósfera según distintos grados de claridad y visibilidad atmosférica:

Atmósfera	β ($\alpha=1.3$)	Visibilidad
Limpia	0	340
Clara	0.1	28
Turbida	0.2	11
Muy Turbida	0.4	< 5

Tabla III

donde β se puede obtener para visibilidades mayores a 5 Km a partir de la fórmula desarrollada por Mc.Catchey y Selby [3]:

$$\beta = (0.55)^{\alpha} (3.912/Vis - 0.01162) \cdot [0.02472 (vis-5) + 1.132] \quad (22)$$

En el modelo alternativo, se propone la siguiente clasificación de la atmósfera:

Tipo de Atmósfera	β ($\alpha=1.3$)
Limpia	0
Clara	0.05
Media	0.1
Turbida	0.2
Otro tipo	---

Tabla IV

Ya que en la región centro-oeste de la Argentina, hay predominio de cielos límpidos y de baja nubosidad, se plantea la posibilidad de tipificarlos para distintos valores de β , existiendo la posibilidad de seleccionar diferentes opciones (adaptadas a nuestras condiciones locales de atmósfera) expuestas en la Tabla IV, en la última opción, se permite trabajar con valores del coeficiente de turbidez calculados a partir de la ecuación (22).

ILUMINANCIA DIRECTA

La iluminancia directa (E_D), es calculada según la ecuación (2) a (5), en este caso el coeficiente de extinción atmosférica (B), es calculado de la siguiente manera:

$$B = D - f \cdot T$$

donde, para $\beta < 0.10$

$$D = 0,1512 + 0,288 - (\beta - 0,05)$$

$$f = 0,0262 - 0,094 - (\beta - 0,05)$$

y, para $\beta > 0.10$

$$D = 0,1656 + 0,365 - (\beta - 0,1)$$

$$f = 0,0215 - 0,22 - (\beta - 0,1)$$

A diferencia del modelo de Dogniaux, en este caso se hace posible el cálculo para amplios rangos de turbidez.

En el desarrollo de este modelo el factor de turbidez (T) , se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$T = 1 + 21.6 \cdot \beta \quad (23)$$

En los cálculos realizados a partir de las ecuaciones (15b), y (6), el factor de turbidez (T), dependía de la cantidad de agua precipitable (w), en forma análoga al cálculo de irradiancia. En este caso no aparece la cantidad de agua precipitable, pues tiene escasa importancia para la iluminancia, ya que las longitudes de onda absorbidas por el vapor de agua, se encuentran predominantemente en el infrarrojo [5].

ILUMINANCIA GLOBAL

Para el cálculo de la iluminancia global horizontal y vertical (E_{GH} y E_{GV} respectivamente), se utilizan las ecuaciones (16) y (18). Resultando en este caso:

iluminancia global horizontal:

$$E_{GH} = E_{DH} + \frac{C \cdot E_{DN}}{(CN)^2}$$

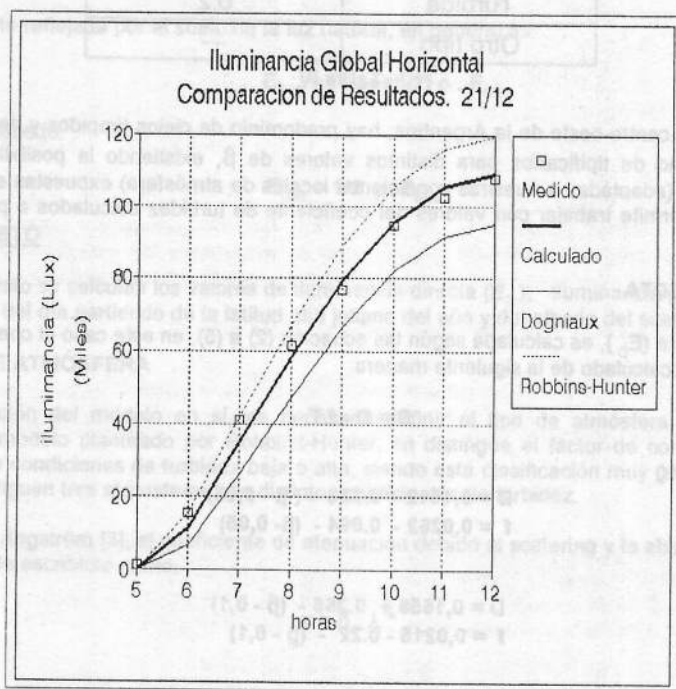
iluminancia global vertical:

$$E_{GV} = E_{DV} + 0,5 \cdot \frac{C \cdot E_{DN}}{(CN)^2} + 0,5 \cdot \rho \cdot E_{GH}$$

donde E_{DN} es la iluminancia directa normal, y el resto de los factores se calculan a partir de las ecuaciones (9) al (13).

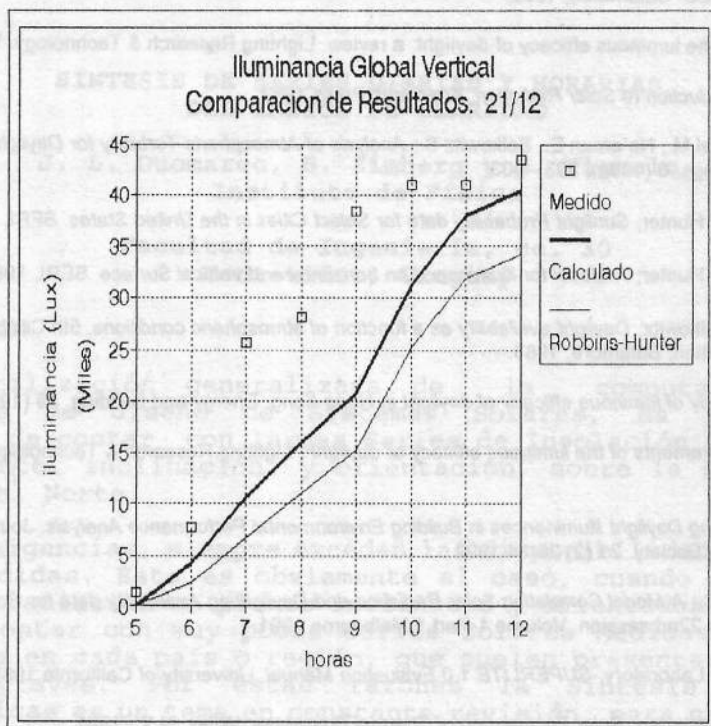
DISCUSION DE RESULTADOS

En la gráfica presentada a continuación, se incluyen valores obtenidos a partir del modelo propuesto, de iluminancia exterior global horizontal para cielo claro desde el amanecer hasta el mediodía.



Se observa que los valores obtenidos con el modelo propuesto mediante un programa computacional diseñado a tal efecto [15], se ajustan a los medidos para el 21 de diciembre, notándose la diferencia con los valores obtenidos a partir de los modelos estudiados.

En la gráfica siguiente se presentan los valores obtenidos con el modelo propuesto, y los valores medidos, (para el 21 de diciembre) de la iluminancia global para superficie vertical. No se logra un buen ajuste entre lo medido y lo calculado, debido a errores de medición, provocados por objetos próximos al lugar de medición con altos coeficientes de reflexión, y a la estimación del albedo para realizar el cálculo con el modelo.



Se estima que las discrepancias entre el modelo y los valores medidos, se deben principalmente a los criterios adoptados en el cálculo de la iluminancia directa y difusa, debiéndose ajustar el modelo con parámetros obtenidos a partir de datos atmosféricos tratados estadísticamente. Dichos datos se obtendrán de una campaña de mediciones ya en marcha, en la cual los datos recogidos son temperaturas, humedad, vientos, radiación solar, y la iluminancia hora a hora, para crear una base de datos atmosféricos. Con los datos obtenidos se corroborará la validez y el alcance del modelo propuesto.

El aporte experimental, se lleva a cabo gracias a un sistema de adquisición de datos desarrollado por personal del IIACE - CRICYT (Instituto de Investigaciones Argentinas de Comunicaciones Espaciales - Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas) especialmente para este fin .

CONCLUSIONES

Puesto que la iluminancia exterior es un dato fundamental y punto de partida del análisis y diseño de estrategias de iluminación natural, se considera importante la posibilidad de predecirla con un buen grado de aproximación.

El estado de avance del presente trabajo nos ha llevado a concluir que la predicción de la iluminancia exterior para Cielo Claro con la mayoría de los modelos estudiados, difiere de los valores esperados para las condiciones de atmosfera y latitud correspondientes a la situación geográfica de la región centro-oeste de Argentina. Con el modelo propuesto se obtiene un buen grado de ajuste de acuerdo a los datos obtenidos de

mediciones. De todas maneras estos resultados son susceptibles de mejoras con el aporte de datos experimentales, que servirán para ajustar constantes y parámetros involucrados en el modelo.

REFERENCIAS:

- [1] - C.L. Robbins; *Daylighting, Design and Analysis*. Van Nostrand Reinhold Co. 1986.
- [2] - A. Mermet, A. Pattini; *Modelo de iluminancia Natural exterior para Superficie horizontal y vertical*. 15ª Reunión de Trabajo de ASADES. Catamarca, 1992.
- [3] - Paul J. Littlefair, The luminous efficacy of daylight: a review. *Lighting Research & Technology*. Vol. 17.
- [4] - M. Iqbal ; *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, 1983.
- [5] - M. Navvab, Karayel M., Ne'eman E., Selkowitz S.; *Analysis of Atmospheric Turbidity for Daylight Calculations*. *Energy and Buildings*, 6 (1984), 293 - 303.
- [6] - C.L. Robbins, K.C. Hunter; *Sunlight Probability data for Select Cities in the United States*. SERI, 1983.
- [7] - C.L. Robbins, K.C. Hunter; *A Model for Illuminance on horizontal and vertical Surface*. SERI, 1983.
- [8] - E. Ne'eman, S. Selkowitz; *Daylight availability as a function of atmospheric conditions*. 5th Conference on Atmospheric Radiation, Baltimore, 1983.
- [9] - T.M. Chung; *A Study of luminous efficacy of daylight in Hong Kong*. *Energy and Building*, 19 (1992) 45-50.
- [10] - P. Littlefair; *Measurements of the luminous efficacy of daylight* *Lighting Research & Technology*, 20 (4) 177-188 (1988).
- [11] - P. Littlefair; *Modeling Daylight Illuminances in Building Environmental Performance Analysis*. *Journal of the Illuminating Engineering Society*. 21 (2) 25-34 1992.
- [12] - R. Kittler, Ruck N.C.; *A Model Correlating Solar Radiation and Daylighting Availability data for Computer Based Design*. CIE Proceedings 22nd session. Volume 1-Part 1 Melbourne 1991.
- [13] - Lawrence Berkeley Laboratory, *SUPERLITE 1.0 Evaluation Manual*, University of California 1985.
- [14] - J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, N.Y., 1991.
- [15] - K. Sorensen; *File formats for luminaire photometric data*. CIE Proceedings of the CIE Seminar on computer programs for light and lighting. Vienna, Austria 1992.