

## **OBTENCIÓN DE DÍAS TÍPICOS, SOBRE LA BASE DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR PROPORCIONADOS POR OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS Y A MODELOS DE CIELOS DE LA CIE. SU APLICACIÓN PARA DATOS DE SAN MIGUEL DE TUCUMÁN**

Arq. Salvador Ingraó, Ing. Leonardo Assaf  
Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional de Tucumán  
Av. Independencia 1800 - (4000) San Miguel de Tucumán, Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 81 4364093 int. 316/176 Fax: +54 81 4361936  
Correo electrónico: singrao@herrera.unt.edu.ar, lassaf@herrera.unt.edu.ar

**RESUMEN:** Con el objetivo de proporcionar los datos del potencial de iluminación natural para la ciudad de San Miguel de Tucumán, se presentan los resultados obtenidos sobre los datos de radiación proporcionado por diferentes estaciones meteorológicas. Para llegar, a obtener valores concretos y útiles, fue necesario integrar la información que se encontraba almacenada en diferentes formatos según el instrumental de registro usado. De esto se obtuvieron las curvas para San Miguel de Tucumán, correspondientes a los días típicos, completamente despejado, completamente cubierto e intermedio, las cuales pueden ser aplicadas directamente, o cargándolas en programas de calculo para el diseño de iluminación natural.

**PALABRAS CLAVE:** Iluminación natural, radiación solar, día típico, datos meteorológicos.

### **INTRODUCCIÓN:**

Desde mediados de los 70', después de la crisis del petróleo, y recientemente con la mayor preocupación por los problemas medioambientales, el ahorro energético y el desarrollo de fuentes alternativas como la luz natural, se han convertido en el foco de muchas investigaciones a escala mundial. Entre varios atributos, la luz natural tiene una mejor calidad, principalmente debido a su reproducción de color, es gratuita, aumenta la productividad del trabajo y genera bienestar en la gente. Desde el punto de vista del diseño, el problema más importante, esta relacionado con la falta de información del recurso disponible en el lugar de implantación del edificio, lo que impide al diseñador evaluar su comportamiento respecto de la luz solar y las posibles maneras de satisfacer los requisitos y necesidades de los futuros ocupantes.

La Argentina no cuenta con estaciones meteorológicas de categoría IDPM (International Daylight Measurement Program) a los efectos de investigar las características fotométricas y radiométricas de la atmósfera, dichas estaciones implican costosas instalaciones y posibilitarían la recopilación de, al menos  $7 \times 10^6$  datos anuales, que servirían para la validación estadística de los modelos de cielos. Este hecho limita la posibilidad de realizar predicciones de precisión aceptables para la estimación del recurso, sin embargo no puede decirse que nuestro país no cuente con ningún tipo de información. Desde hace décadas, y con fines agrícolas diversos, una vasta red de estaciones meteorológicas diseminadas por todo el país, entre ellas las del Servicio Meteorológico Nacional, realizan registros de irradiancia, tanto en forma gráfica desde los años 70, como en forma digital desde mediados de los 90 (Villegas et al., 1997). Estas mediciones de irradiancia global están destinadas fundamentalmente a ser aplicadas en el campo de la agricultura, pero pueden ser utilizadas para un estudio de iluminación natural, y llegar a elevar un modelo de cielos típicos que ayuden al diseñador brindándole mayor precisión que los que se utilizan en la actualidad.

El objetivo del presente trabajo es buscar una metodología simple y efectiva que, basándose en los datos de irradiancia de estaciones meteorológicas, permita formular los cambios en la iluminación natural a lo largo del día y poder, a partir de ellos, hacer un modelo de cielos típicos con el objeto de permitir un mejor uso de las posibilidades que brinda dicho recurso. Los elementos que ayudarían en el proceso de diseño serían: el calculo y obtención de los cielos extremos (tanto el cielo completamente nublado estándar, como el cielo completamente claro estándar) los cielos intermedios y el concepto de día típico.

La elaboración de modelos de cielos ha sido una preocupación por décadas, los cielos completamente nublado y completamente claro estándar (a pesar de la complejidad que causa la presencia del sol y su efecto en los restantes componentes de la bóveda celeste en este ultimo) fueron modelados y aceptado oficialmente por la CIE en 1955 y 1973 respectivamente, y por lo tanto, pueden ser derivados con facilidad. Entre los dos cielos extremos antes mencionados se hallan comprendido los demás cielos denominados intermedios cuyo desarrollo es objeto de diversos estudios. Por ultimo, el *día típico*, desde el punto de vista del alumbrado natural es aquel que resume, con una precisión aceptable, todas las contingencias estadísticas (Kittler et al., 1998).

## MATERIALES Y MÉTODO:

*1- Recopilación de datos:* El paso fundamental para realizar este trabajo es la obtención de los datos de radiación solar global que las estaciones meteorológicas poseen almacenados en diferentes soportes según la antigüedad de los mismos y los diferentes sistemas de medición. Las instituciones dependientes del Servicio Meteorológico Nacional, y los organismos dedicados a la investigación en el campo de la agricultura, son la fuente indicada para conseguir dicha información. En el presente caso se pudo contar con los datos cedidos por la Estación Experimental Agropecuaria INTA Famaillá, Famaillá, Tucumán (Conjuntos de Datos A - EEAIF) y la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes, El Colmenar, Tucumán (Conjuntos de Datos B - EEAOC).

Conjuntos de Datos A - EEAIF:

- Irradiancia (radiación solar global) obtenidas por medio de un actinógrafo de Robitsch, en calorías por centímetro<sup>2</sup> (cal/cm<sup>2</sup>)
- Los datos son registrados en forma gráfica en bandas diarias.
- Abarca el periodo comprendido entre 01/01/96 y 31/12/00.
- Los registros son tomados de forma continua.
- Ubicación lat. 27° 03'; long. 65° 25'
- Registro diario de fecha
- Registro diario de temperatura (9:00, 14:00 y 18:00 hs.)

Conjuntos de Datos B - EEAOC:

- Irradiancia (radiación solar global) obtenidas por medio de un piranómetro, en watts por metro<sup>2</sup> (w/m<sup>2</sup>)
- Los datos son registrados digitalmente y transferidos por medio de una interfaz a un banco de datos en una computadora.
- Abarca el periodo comprendido entre 18/03/98 y 09/04/00.
- Los registros son tomados a intervalos de 30 min.
- Ubicación lat. 26° 47'; long. 65° 11'
- Registro diario de fecha.

*2- Búsqueda de tipologías:* Para clasificar los Datos A se optó por un método gráfico, buscando tipologías fácilmente identificables dentro del conjunto. Estas tipologías debían relevar cuales eran los días mas representativos, llegándose a encontrar 12 tipologías, separadas en dos grupos. En el Grupo 1, las 6 primeras tipologías muestran las variaciones lógicas de radiación solar de forma simétrica a lo largo de todo un día, teniendo como extremos un día completamente despejado y un día absolutamente nublado, que corresponderían a los extremos ya definidos por la CIE (CIE estándar cubierto y CIE estándar despejado) Las restantes tipologías que conforman este grupo son estados intermedios de cielos entre estos dos extremos ( Figura 1).

Tip. N° 1: Día completamente despejado en el que nada obstruye la radiación solar, y por lo tanto la gráfica que se obtiene es la de una curva continua desde la salida a la puesta del sol, con un valor máximo al mediodía alto. En este caso se podría hablar de una ausencia total de nubes a lo largo de todo el día. Este cielo correspondería al estándar completamente despejado definido por la CIE.

Tip. N° 2: Día casi completamente despejado, en el que la mayor parte de la curva sigue el recorrido de la tipología 1, observándose algunas pocas caídas que no modifican la forma general de la gráfica. De esto se concluye que fue un día completamente despejado, solo con la interferencia de una cantidad muy reducida de nubes puntuales que obstruyeron al sol en periodos de tiempo muy cortos.

Tip. N° 3: Día muy despejado, con aparición más frecuente de nubes, pero que no impiden la llegada de radiación solar por periodos de duración considerable, por lo que se podría apreciar en la gráfica un dentado, en el que gran parte de la curva, sigue a la de un tipo 1, con picos de caída en la intensidad mucho más frecuentes.

Tip. N° 4: Día con abundante nubosidad, pero con numerosos picos que muestran algunos momentos de cielo despejado (es el caso inverso a la tipología 3). Los puntos máximos de la cresta coinciden con la curva de una tipología 1, los puntos más bajos con las tipologías 5 a 6, es decir, que las condiciones variarían desde periodos de gran nubosidad a pequeños momentos de cielo despejado.

Tip. N° 5: Día con mucha nubosidad, pero no de una densidad máxima, por lo que las capas continuas de nubes, impiden el paso de solo una porción de la radiación solar, lo que da como resultado la gráfica de una curva bastante chata con algunas variaciones.

Tip. N° 6: Día absolutamente nublado, en el que capas de nubes restringen la llegada de gran parte de la radiación solar al sensor, y por lo tanto la curva que se obtiene es continua pero extremadamente chata y con algunas leves variaciones. Este cielo correspondería al estándar completamente cubierto definido por la CIE.

En el Grupo 2, las 6 tipologías, se seleccionaron basándose en; la repetición que se pudo observar a lo largo de toda la muestra de una determinada gráfica, y la aparición de curvas que podrían dar indicios sobre el comportamiento de la radiación a diferentes horas del día o en periodos, tales como, mañana, mediodía y tarde ( Figura 2).

Tip. N° 7: Día en el que durante toda la mañana se observan condiciones totalmente despejadas del tipo 1 y por la tarde, después del mediodía, se comienzan a notar variaciones del tipo 3 o 4, representando condiciones de nubosidad considerables.

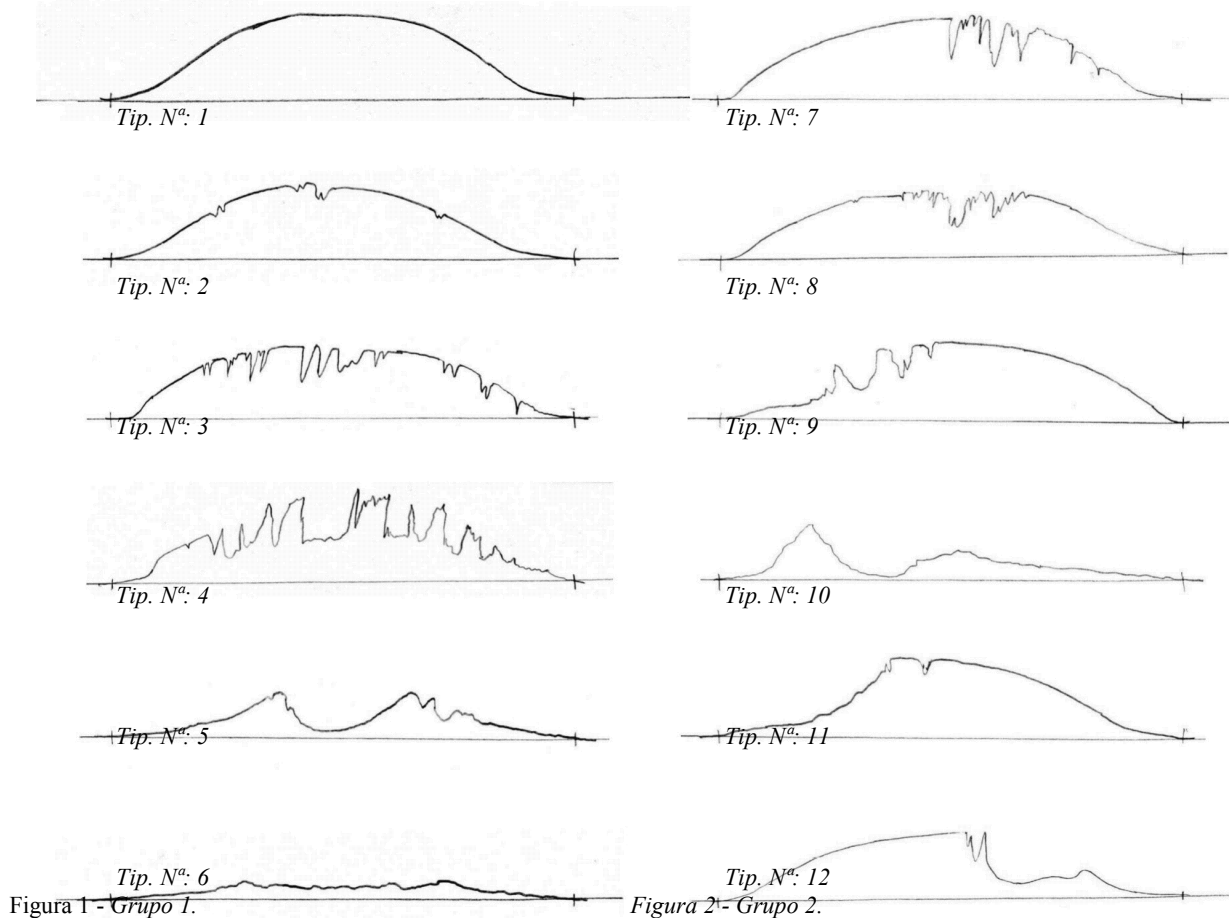
Tip. N° 8: Día en el que durante el primer y tercer tercio de la curva (mañana y tarde) se observa una curva continua del tipo 1 y en el segundo tercio de ella (mediodía) aparecen variaciones del tipo 3 o 4, representando condiciones de nubosidad considerables.

Tip. N° 9: Día en el que durante toda la mañana se observan condiciones variables del tipo 3 o 4, representando una nubosidad considerable, y por la tarde, se describen condiciones totalmente despejadas del tipo 1 (es el caso inverso de la tipología 7).

Tip. N° 10: Día en el que se observa una curva que comienza con una nubosidad alta y pareja del tipo 5 o 6, y que al correr la mañana, marca un pico muy alto y continuo que decae totalmente alrededor del mediodía, y desde ese punto, hasta el atardecer continúa con una curva muy suave y chata del tipo 5 o 6.

Tip. N° 11: Día similar al 9, con nubosidad en la mañana y mediodía corresponden mas a una condición tipo 5 o 6, es decir, abundante y continua nubosidad en la mañana, y condiciones de cielo muy despejadas de tipo 1 durante la tarde.

Tip. N° 12: Día similar al 7, con condiciones de cielo muy despejadas de tipo 1 durante toda la mañana y parte del mediodía, y condiciones de nubosidad de tipo 5 o 6 en el resto del día.



3- *Calculo de días extremos:* Sobre la base de los estándares de la CIE de cielos completamente despejados y completamente cubiertos, ayudado por medio de programas de calculo de iluminación natural que se basan en estos estándares, se obtuvieron tablas con valores de iluminancia para todas las horas del día en las que haya radiación solar, generando con estos las curvas de los dos tipos de días extremos que sirven como referencias limites para las gráficas a estudiar. La comparación entre los datos proporcionados por la EEAOC y los valores obtenidos basándose en las ecuaciones de la CIE, muestran una alta consistencia, ya que las curvas de los datos reales se adaptan tanto a los valores máximos, (cielo completamente claro estándar), como a los mínimos (cielo completamente nublado estándar), coincidiendo también las horas solares en que comienzan y finalizan los registros de radiación solar ( Figura 3).

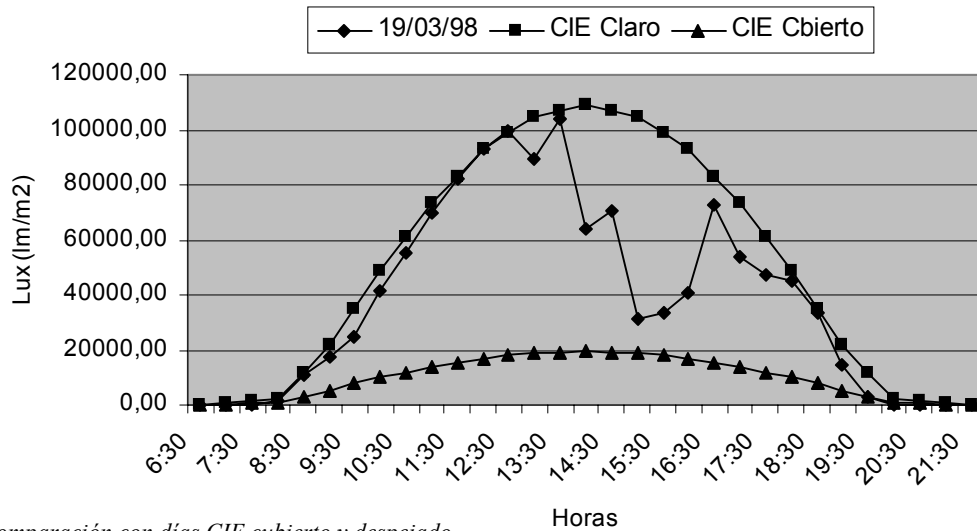


Figura 3 - Comparación con días CIE cubierto y despejado

4- *Análisis de Datos A:* Tanto las curvas que representan a las distintas tipologías, como las que muestran los valores máximos y mínimos promedios para cada mes en base a los estandartes CIE, se graficaron sobre un soporte transparente para poder ser superpuestas con los registros proporcionados por la EEAIF ( Figura 4) y realizar el análisis de la totalidad de la muestra, obteniendo de esta forma una clasificación para cada uno de los días y un valor promedio para cada tipología.

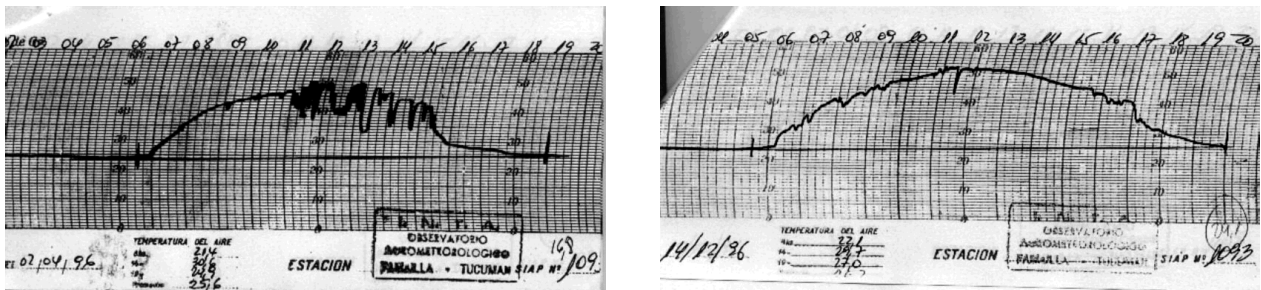


Figura 4 - Ejemplo de registros gráficos correspondientes a dos días, obtenidos por medio de un actinógrafo en la EEAIF.

5- *Análisis de Datos B:* Para poder integrar el conjunto de Datos B, obtenidos de la EEAOC, medido en irradiancia (w/m2), fue necesario calcular los valores correspondientes de iluminancia (lm/m2). Este pasaje se realizó mediante el concepto de eficiencia luminosa, el cual describe la acción efectiva de un iluminante. La eficacia luminosa de la luz natural, depende del modo en el que la energía radiante es repartida entre las partes visibles e invisibles del espectro, esto varía según factores tales como, el estado del cielo (cubierto, despejado, o sus variantes), la altitud del sol y en especial el estado de la atmósfera (Gansland y Hofmann, 1999).

Este coeficiente es diferente si se tiene en cuenta la radiación solar directa o la radiación del cielo, o la combinación de ambas (radiación global). La eficiencia luminosa se expresa en el cociente entre iluminancia (lux) e irradiancia (W/m2) y ha sido determinada para varios lugares por medio de mediciones simultaneas de iluminancia e irradiancia. Se demostró que los cielos cubiertos y despejados, varían muy poco en cuanto a su eficacia luminosa y que con respecto a la altitud solar hay un marcado decrecimiento en la eficacia a altitudes solares menores de 30°. El valor utilizado en el presente análisis para estudiar estos datos, es el proporcionado por Blackwell, que propone una eficiencia luminosa constante de alrededor de 116 lm/w para cielos promedios, que también coincide con el promedio general de las demás mediciones (Muneer y Kinghorn, 1995).

Luego de obtenidos los valores de iluminancia de los Datos B, se le asigno a cada uno de los días la clasificación tipológica que obtuvo el mismo día en el grupo de Datos A al ser analizado visualmente y se calculó el promedio total del que resulta el día

típico. A su vez se realizaron promedios para la tipología N°1, la tipología N°6 y el resto de las tipologías obteniendo de esta manera las curvas correspondientes a días completamente claros, completamente nublados e intermedio respectivamente.

**RESULTADOS:**

En el promedio general de los Datos A, de la EEAIF ( Figura 5), puede apreciarse que las tipologías del grupo 1 (75.07%), tienen mayor frecuencia que las del grupo 2 (24.09%). Se deduce que el comportamiento diario de la bóveda celeste para San Miguel de Tucumán es bastante estable , con cielos que mantienen sus condiciones a lo largo del día. Los mayores valores los obtuvieron las tipologías extremas del grupo 1: cielo completamente despejado y completamente cubierto (n°1 y n°6) con valores de alrededor del 15% cada uno. Estas dos tipologías se encuentran estandarizadas por la CIE, por lo que aproximadamente el 30% de los días podrían ser calculados por este modelo.

En cuanto al grupo 2, se puede apreciar una diferencia importante entre la tipología n°7 (9.24%) y el resto del grupo (15.69%). Si se generara un grupo nuevo acompañando a la tipología n°7 con la n°12, que posee características similares, el valor llegaría al 13.05%. Esta nueva tipología con condiciones totalmente despejadas por la mañana y grandes variaciones por la tarde , se ubicaría en tercer lugar del promedio general siendo bastante representativa de lo que sucede en San Miguel de Tucumán.

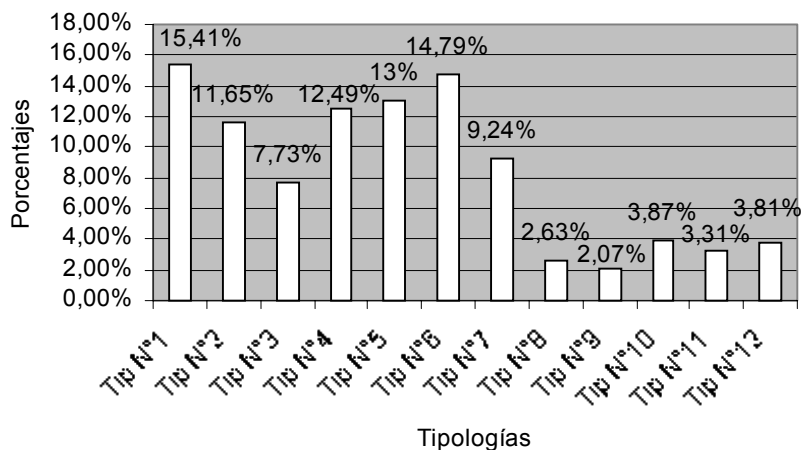


Figura 5 – Promedio general por tipologías.

Al realizar el promedio de la totalidad de la muestra de los datos de la EEAOC, se obtuvo una curva muy pareja y simétrica, que arranca a las 6:00 hs. tiene su punto mas alto a las 12:00 hs. con un valor de 61560,82 Lux, y finaliza a las 18:00 hs. Esta gráfica muestra el día típico para San Miguel de Tucumán, entendiendo como tal, el día en el que las condiciones de iluminación pueden ser representativas para una determinada zona ( Figura 6). Luego se procedió a agrupar los días que correspondían a la tipología N°1, a la N°6 y al resto de los días, para realizar con estos los promedios, obteniéndose los valores de iluminancia para los días completamente claros, completamente nublados e intermedio respectivamente ( Figura 7).

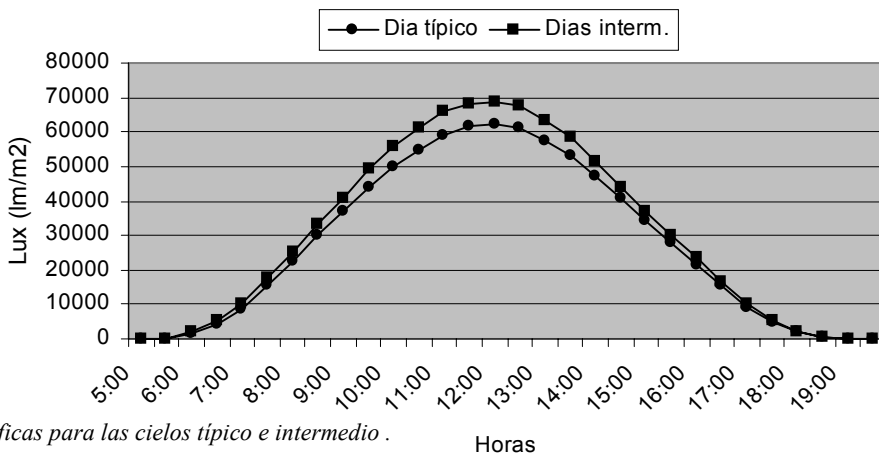


Figura 6 –Gráficas para las cielos típico e intermedio .

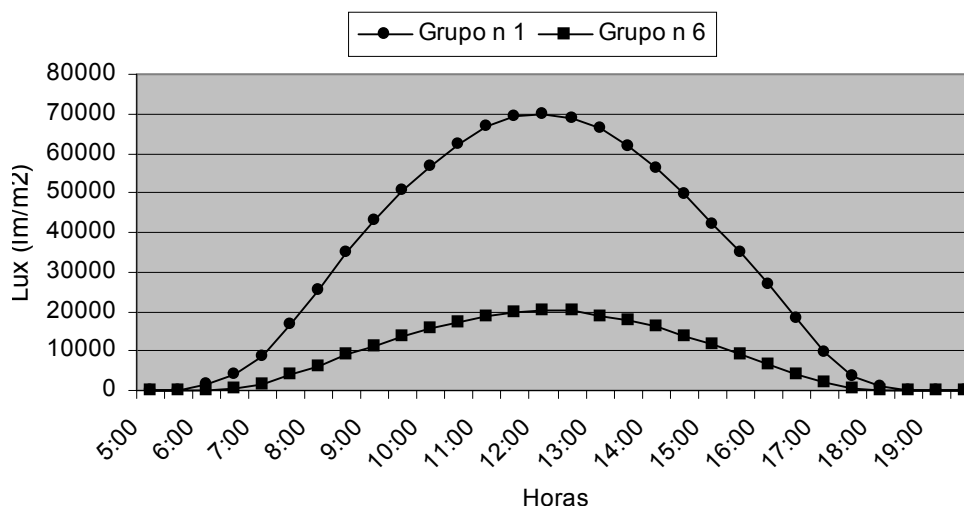


Figura 7 – Graficas para las tipologías 1 y 6.

### CONCLUSIONES:

Se ha presentado una metodología simple e intuitiva, valida para simular la distribución de iluminancia en un día típico para la ciudad de San Miguel de Tucumán, a partir de datos que abundan en nuestro país, obtenidos de estaciones meteorológicas estándar. Es muy importante continuar investigando sobre la forma de hacer servir conjuntos de datos, que actualmente se encuentran acumulados en distintas instituciones, y fuera de uso a los fines del diseño de iluminación natural de edificios.

El concepto de día típico involucra la convalidación de modelos con datos reales, gracias a los recursos actualmente disponible sin necesidad de contar con datos de costosas estaciones meteorológicas IDPM, las cuales para cubrir todo el rango de climas y regiones, en un territorio tan amplio como el argentino, deberían ser por lo menos tres.

Cabe destacar que los datos obtenidos son de validez solo para San Miguel de Tucumán, ya que estos no pueden ser una regla fija, porque la energía solar disponible depende fuertemente de la climatología de las nubes y esta es propia de cada lugar. Un futuro trabajo procurará correlacionar este análisis con datos correspondiente a otras ciudades de nuestro país, ya que la metodología puede ser ajustada para otras latitudes, donde solo será necesario que las estaciones meteorológicas brinden los datos correspondientes.

**ABSTRACT:** The research is aimed to provide the potential of natural illumination for the city of San Miguel de Tucumán, taking into account data of radiation provided by different meteorological stations. To obtain concrete and useful values, it was necessary to integrate the information that was stored in different formats according to instruments. The curves corresponding to the typical days, completely clear, completely overcast and intermediate day for San Miguel de Tucumán, can be applied directly, or loading in calculate programs for natural lighting design.

**KEYWORDS:** Natural illumination, solar radiation, typical day, weather data.

### AGRADECIMIENTOS:

Estación Experimental Agropecuaria INTA Famaillá, Famaillá, Tucumán.

Ing. Lamelas C. M. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, El Colmenar, Tucumán.

### REFERENCIAS:

- H. Grossi Gallegos, A. Robrti Y G. Renzini (1999) Evaluación De Las Bases De Datos De Radiación Global Disponibles En La Argentina. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente Vol. 3, N°2. pp.11.13-15
- R. Kittler, S. Darula y R. Perez (1998) A Set Of Standard Skies: Charactericing Daylight Conditiond For Computer And Energy Consious Design. Final Report. Institute of constructio and architecture, Slova Academi of Sciences, Bratislava, Slovakia.
- R. Gansland, H. Hofmann (1999) Manual -Como Planificar Con Luz. 1ª edición, pp. 36-39. Vieweg, España.
- J. A. Villegas, J. H. Perera y A. Manlla. (1997) Tendencia Creciente De La Radiación Solar En Tucumán. Informe.
- T. Muneer y D. Kinghorn (1995) Luminous Efficacy Of Solar Irradiance: Improved Models. Lighting Res, Technol. 29(4) pp.185-195.