

ILUMINACIÓN NATURAL EN LA ARQUITECTURA:

Dos estudios de caso para la Ciudad de México

Henry Joseph Antoine Cabrolier Sanhueza

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura
2010





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ILUMINACIÓN NATURAL EN LA ARQUITECTURA: Dos estudios de caso para la Ciudad de México

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA
PRESENTA:
HENRY JOSEPH ANTOINE CABROLIER SANHUEZA

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

2010

Director de tesis: M. en Arq. Leonardo Zeevaert Alcántara

Sinodales:

Dr. Álvaro Sánchez González
Dr. Hermilo Sálas Espíndola
M. en Arq. Francisco Reyna Gómez
M. en Arq. Javier Velasco Sánchez

Dedicatorias

Al Dr. Agustín Muhlia (), con su gran amor a la ciencia, generosidad y calidad humana, me ayudó a recorrer el trecho necesario por el imbricado camino de la astronomía, que sentó las bases de mi estudio.

Al Mtro. Leonardo Zeevaert por mostrarme una manera diferente de ver la arquitectura.

A Gabriela y Tomás por todas las horas que estuve ausente.

Sol iluminaste mi sendero y haz sido la esencia de este trabajo.

Café de México que alargaste los días para concluir esta investigación, con tu gran sabor y aroma.

Al pueblo de México por generar las condiciones materiales para llevar a cabo mi formación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi Alma Mater, por su cobijo y por darme un lugar en su seno.

Bibliografía consultada

- **Arias Orozco, Silvia y Ávila Ramírez, David**, *La iluminación natural en la arquitectura, en climas semitemplados*, Universidad de Guadalajara, Centro de Investigaciones en Ergonomía, Guadalajara, 2004.
- **Barral i Altet, Xavier**, *Las vidrieras medievales en Europa*, Ed. Lumweg, 2003.
- **Becerril Naranjo, Sergio**, *Del sol a la arquitectura*, Ed. Gustavo Gili, México, 1987.
- **Beltrán, Virgilio**, *Para atrapar un fotón*, p. VII las ondas electromagnéticas, FCE, 1995.
- **Bertrán de Quintana, Miguel**, *El sol en la mano, estudios de iluminación, orientación y relojes solares*, Ed. UNAM, Escuela Nacional de Arquitectura, 1982.
- **Castillo Martínez De Locos, Ignacio Javier**, *El Sentido De La Luz, Ideas, mitos y evolución de las artes y los espectáculos de luz hasta el cine*. Tesis doctoral dirigida por Dr. Carles Ameller Ferretjans, Barcelona, 21 de junio de 2005.
- **Diario Oficial de la Federación, Decreto Presidencial 2002**, México, D. F., Viernes 1 de marzo de 2002.
- **Documento Básico HE, Ahorro de energía**, Texto modificado por RD 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores (BOE 25/01/2008).
- **Enríquez, Raúl**, *Introducción al estudio de la arquitectura occidental*, UNAM, 1988.
- **Ernst Danz**, *La arquitectura y el sol, protección solar de los edificios*, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1967.
- **Gala, Antonio**, *El manuscrito carmesí*, Col. Autores Españoles e Hispanoamericanos, Ed. Planeta, 1994.
- **G. de Long, David**, *Frank Lloyd Wright y la ciudad viviente*, Vitra Design Museum, Valencia, 2000.
- **G. Z. Brown**, *Sol, luz y viento, estrategias para el diseño arquitectónico*, Ed. Trillas, México, 1994.
- **Govén, Laike, Pendse & Sjöberg**, *The background luminance and colour temperatures influence on alertness and the mental health*. Balkan Light 2008 the 4th Balkan Conference on Lighting 2008.

- **Gregg D., Ander,** *Daylighting performance and design*, Ed. John Wiley & sons, USA, 2003.
- **Heschong, Lisa, Project Director,** *Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment*, Heschong Mahone Group, Inc. Fair Oaks, California, 2003.
- **Iqbal, Muhammad,** *An introduction to solar radiation*, Academic press, Toronto, 1983.
- **Le Corbusier,** *Principios de urbanismo (La carta de Atenas)*, Obras maestras del pensamiento contemporáneo, Ed Planeta-Agostini, Bs. Aires 1993.
- **Libbey Owens Ford Company.** *How to Predict Interior Daylight Illumination*. Toledo, OH: Libbey Owens Ford Company, 1976.
- **Mc Guinness, Stein & Reynolds,** *Mechanical and electrical equipment for buildings*, John Wiley & sons, USA 2003.
- **Muhlia V., Agustín,** *Notas del curso: Solarimetría*, 30 Semana Nacional de Energía Solar, Asociación Nacional de Energía Solar, Veracruz, 2006.
- **Mochizuki, Iwata & Itoh.** *Effects on discomfort glare of contrast between luminance of sky and that of ground*, Balkan Light 2008 the 4th Balkan Conference on Lighting.
- **Moore, Fuller,** *Concept and practice of architectural daylighting*, Ed. Van Nostrand Reinhold, Ontario 1981.
- **Muneer, T.** *Solar Radiation and daylight models*, Ed. Elsevier, Oxford, 2004.
- **Nieto Alcaide, Victor,** *La luz, símbolo y sistema visual*, Cuadernos de arte, Ed. Cátedra, Madrid 1989.
- **Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico**, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de octubre de 2004.
- **Ordax, Andrés,** *Cáceres Patrimonio de la Humanidad*. S. Lunweg Editores, S. A. Barcelona, 1987.
- **Organización meteorológica mundial,** *Atlas Internacional de Nubes*, Volumen I - Manual de observación de nubes y otros meteoros, 1993.

- **Paul Hills**, *La luz en la pintura de los antiguos italianos*, traducción de Isabel Bennasar, Ed. Akal, Madrid, 1995.
- **Perry, M. J.**, *Lighting and applied vision section*, *Lighting Research and Technology*, Vol. 22, No. 3, 159-160 (1990).
- **Phillips, Derek**, *Lighting modern buildings*, Architectural Press, 2000.
- **Real Academia Española**, *Diccionario de la lengua española*, Vigésimo segunda edición, 2001.
- **Robertson, D. S.**, *Arquitectura griega y romana*, Ed. Cátedra, Madrid, 1979.
- **Rolf Toman**, *El románico, arquitectura, escultura, pintura*, p. 21, Ed. Köneman, Barcelona, 2004.
- **Schlulz, Regine y Seidel, Matias**, *Egipto, el mundo de los faraones*, Ed. Könnemann, Colonia, 1997.
- **Seeley, Rod y otros**, *Essentials of anatomy & physiology*. Mc Graw Hill, Higher education, New York, 2005.
- **Statutory Instrument No.3004** The Workplace (Health, Safety and Welfare) Regulations Lighting, 1992.
- **Szokolay, S. V.**, *Environmental science handbook for architects and builders*, The Construction Press Ltd., USA. 1980.
- **Spencer, J. W.**, *Fourier Series Representation of the Position of the Sun. Search*, **2**, 172, 1971.
- **Sprajc, Ivan**, *La astronomía, en Historia antigua de México*, Vol IV, coords. Linda Manzanilla y Leonardo López Luján, INAH-UNAM, 2001.
- U.S. Patent 4,329,021, may 11, 1982, Passive solar lighting system, David J. Bennett y David A. Eijadi.
- **Vera Mella, Nelson**, *Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA*, Aplicación a la península Ibérica, tesis doctoral dirigida por el Dr. José María Baldasano Recio, Universidad politécnica de Cataluña, 2005.
- **Vitruvio Polión**, *Los diez libros de arquitectura*, Traducción de Joseph Ortiz y Sanz, Ed. Akal, Madrid, 1992.
- **W.J.M. van Bommel, G.J. van den Beld**, *Lighting for work: visual and biological effects*, Philips Lighting, The Netherlands, April 2004.
- **Zajonc, Arthur**, *Atrapando la luz, historia de la luz y de la mente*, Ed. Andrés Bello/Ensayos, Santiago, 1996.

Páginas de internet consultadas

- http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/act_permanentes/geografia/cenit/machuint5.htm, es una amplia biblioteca de temas científicos, con publicaciones digitalizadas de excelente calidad
- <http://www.astro-digital.com/3/stone.html>, Revista digital de la Agrupación Astronómica de Gran Canaria (AAGC), dedicada a la astronomía, con artículos de importantes personalidades científicas.
- http://www.santiagoapostol.net/latin/casa_antigua.html Espacio del Departamento de Latín del Instituto Superior de Enseñanza Santiago Apóstol, con historia y esquemas acerca de la vivienda de diferentes culturas antiguas.
- <http://www.arqcon.com.ar/pprof/ppilusalud.htm>, Recurso del despacho de arquitectura, ARQcon.com que incluye diferentes temas, tales como el artículo “Influencia de la iluminación en la salubridad”.
- <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion>, Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, U.T.N. – Argentina, dedicado al correcto uso de la iluminación, contiene el “Manual de Iluminación Eficiente”.
- <http://www.simcli-iluminacion.com/>, Laboratorio de Luminotecnia del Instituto Tecnológico de Puebla
- <http://www.saint-gobain-glass.com.mx>, Importante industria de vidrio para arquitectura, de origen francés, principal competencia de grupo Vitro, con una amplia gama de productos.
- http://www.vitro.com/vidrio_plano_arquitectonico, Es el más grande y antiguo productor de vidrio plano en México, ofrece una gama de productos muy extensa, tanto para arquitectura como otros mercados.
- <http://www.diputados.gob.mx/> Estudio del servicio de investigación y análisis de la Biblioteca del Congreso de la Unión, Cámara de Diputados. Espacio dedicado al análisis de información así como el acceso a diferentes documentos generados en el Palacio Legislativo.
- <http://search.opsi.gov.uk>, Página de la Oficina de Información al Sector Público, del Reino Unido, donde es posible consultar documentos legislativos de dicha Nación.
- <http://www.boe.es>, Página del Boletín Oficial del Estado español, con la publicación permanente de leyes y decretos reales.
- <http://radsite.lbl.gov/radiance>, Sitio del programa de cálculo de iluminación natural por medio de computadoras, denominado RADIANCE, que se puede obtener de forma gratuita.

⚙️ Capítulo IV, “Estudios de iluminación natural en un modelo real “	90
Introducción	91
4.1.- Estudio de campo en un modelo real.	92
4.1.1.- Día despejado, salón en condiciones normales; 21 de marzo de 2008.	98
4.1.2.- Día despejado con nubosidad leve, salón en condiciones normales; 22 de marzo de 2008.	106
4.1.3.- Día con gran nubosidad, salón en condiciones normales; 23 de marzo de 2008.	110
4.1.4.- Día despejado con nubosidad leve, salón en condiciones alteradas, ventanas reducidas; 4 de abril de 2008.	113
4.1.5.- Día despejado con nubosidad leve, salón en condiciones alteradas, ventanas reducidas y plafón de hule a 2.75m; 11 de abril de 2008.	116
4.1.6.- Día muy nublado, salón en condiciones alteradas, ventanas reducidas y plafón a 3.05 m; 14 de mayo de 2008.	118
4.1.7.- Días parcialmente nublados, ventana B con deflectores de luz, con plafón a 3.05 m y sin plafón, 24 y 25 de mayo de 2008.	122
⚙️ Capítulo V, “Estudios de iluminación natural en un modelo a escala”	126
5.1.- Estudio de campo en modelo a escala.	127
5.2.- Presentación de los datos y análisis de resultados.	131
⚙️ Conclusiones	146
⚙️ Anexos	150
⚙️ Glosario	154
⚙️ Crédito de imágenes, cuadros y gráficas	156
⚙️ Bibliografía	160

Introducción

Desde tiempos inmemoriales la humanidad ha utilizado la luz natural para desarrollar la mayor parte de sus actividades y podríamos decir que el campesino tradicional representa el prototipo de lo que se afirma aquí, pues se levanta al alba y se recoge al caer la noche para recobrar fuerzas y retomar así el ciclo que da motivo a su existencia. Sin embargo al modificarse y diversificarse la vida de los seres humanos, la iluminación artificial extiende la jornada, tanto laboral como de esparcimiento, pero no es hasta la aparición de la bombilla eléctrica, patentada en 1879 por Tomás Alva Edison, que la actividad nocturna cobra fuerza, pero a su vez, también se amplía su uso durante el día para mejorar la visión al interior de los espacios habitables, aunque fundamentalmente esto se hace en los centros de trabajo, lo que se debe en gran medida a la pérdida de la capacidad de diseñar los edificios pensando en la luz como una parte integral de la arquitectura. Este elemento que debería ser de importancia vital es muy poco considerado y en el mejor de los casos pasa a ser un requisito de la legislación, la que ni siquiera responde a estudios serios realizados en el país, sino que es una copia sin sentido de leyes aplicadas en el extranjero.

Solo desde algunos años atrás, se ha comenzado a cuestionar el uso de la luz artificial durante el día, a partir de la creciente escasez de la energía, con el consiguiente incremento de sus costos y mas recientemente, de nuevos conceptos de salud¹, la correcta utilización de la iluminación natural pasa a ser un problema urgente de resolver, especialmente si se aplica al ámbito laboral para mejorar tanto la calidad de la visión, como el confort que una adecuada iluminación produce, que a la postre se traducen en mayores rendimientos de los trabajadores. También es importante devolver a los arquitectos un elemento de diseño fundamental, pues no se puede seguir proyectando sin pensar en el entorno y especialmente en la ubicación y orientación de los nuevos desarrollos arquitectónicos, pues la luz que nos da el sol es fuera de toda duda, la que nos proporciona las mejores condiciones para desempeñar casi todo tipo de actividades que requieren ver, excepto la televisión y aquellos elementos similares que poseen luz propia, así como labores muy especializadas.

Este trabajo pretende ser un aporte a la arquitectura actual a través del estudio de la iluminación natural, con la cual se pueden lograr importantes ahorros energéticos y subsecuentemente un menor impacto ecológico, dado que especialmente en el ámbito laboral es donde mas se usa la iluminación artificial que consume gran cantidad de electricidad y en México, una parte importante de ésta se produce por la quema de hidrocarburos, la que podría ser minimizada usando la luz provista por nuestro astro rey, si los edificios fueran pensados y construidos para lograr la eficiencia lumínica.

¹ Ver Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment, California Energy Commission, Technical Report October 2003

Si nos remontamos a una frase pronunciada por Winston Churchill, "Los pueblos que olvidan su historia ... están condenados a repetir los mismos errores" y esto lo llevamos al campo de la arquitectura, podríamos decir que los arquitectos que se olvidan del pasado, están condenados a cometer no solo los mismos errores sino además crear nuevos, puesto que los grandes maestros de esta disciplina siempre se han apoyado en el conocimiento de sus antecesores y a partir de ellos han logrado generar las obras colosales, propias de su tiempo, que los han coronado de gloria, pero muchos otros se han dejado llevar por su propia fanfarronería basados en los adelantos tecnológicos, dejando de lado el entorno, buscando solo el reconocimiento, el lucro y la solución fácil. Y es así que en los inicios del siglo 21, comenzamos a enfrentar las consecuencias del despilfarro energético que en los últimos 50 años ha conocido su máximo apogeo. Pero si antes de proyectar esos monstruos llamados edificios, sedientos de electricidad para ser enfriados, calentados o iluminados, en algunos casos permanentemente, se hubieran detenido a escuchar lo que Vitruvio hace mas de dos mil años enseñaba: "...con la óptica se toman en los edificios las mejores luces y de mejor parte..."², seguramente las cosas serían diferentes, puesto que proyectar no es solo elevar paredes con losas, puertas y ventanas, ni siquiera se puede pensar y menos aún hoy, que la casa es una máquina de habitar, como dijera Le Corbusier, sin considerar lo que habitar significa en su sentido mas amplio, así, en este nuevo siglo, del que ya hemos consumido la primera década, las edificaciones deben necesariamente llegar a ser elementos que no agredan ni a sus ocupantes ni al entorno.

Vitruvio también nos enseñó que " Necesita el arquitecto... conocer las variedades de cielo...las cualidades del aire de las regiones...y el uso de las aguas: porque sin estas precauciones no puede haber habitaciones sanas....Por la astrología, finalmente se conoce el oriente, occidente, mediodía y septentrión: como la constitución celeste, a saber, los equinoccios, solsticios..."³, es decir el entorno, porque la arquitectura no puede ser pensada sin atender a lo que la rodea. Tal vez ha llegado la hora en que los humanos debamos aceptar que no somos dioses, sino una parte mas de un ecosistema complejo al que dimos el nombre de tierra, al que debemos respetar y honrar con humildad, como los pueblos originarios de todo el mundo, que de una u otra forma lo comprendieron y han vivido en armonía con su hábitat.

La necesidad de hacer eficiente el uso de los energéticos dada su creciente escasez, es imperativa, debido a la disminución de los recursos no renovables (o renovables a muy largo plazo, -tanto que quedan fuera de la escala humana-), por ello, resulta interesante abordar el tema desde el punto de vista económico, pues sin lugar a dudas, los costos de los energéticos serán cada vez mayores y una vez más los principales afectados serán aquellos que carecen de recursos económicos, dado que seguramente "en el futuro cercano quien domine la energía será quien detente el poder y qué mejor si se quiere alcanzar una sociedad realmente democrática, que cada

² Vitruvio Polión, Los diez libros de arquitectura, Traducción de Joseph Ortiz y Sanz, Ed. Akal, Madrid, 1992, p. 2

³ Vitruvio Polión, Op Cit p. 5

individuo sea capaz de generar sus consumos energéticos básicos”⁴ o al menos aprovechar los que aún están libremente disponibles, como el que se plantea en este estudio, es decir, la iluminación natural. Sin embargo, dada la escasez de datos confiables a la que nos hemos enfrentado, dicho tema queda planteado para futuras investigaciones.

El presente trabajo es resultado tanto de la investigación bibliográfica como de la experiencia práctica. La primera ha sido realizada consultando aquellos textos que nos han llevado a conocer el estado en que se encuentra en México y en diferentes partes del mundo el conocimiento de la iluminación natural, respecto de lo cual se debe mencionar que en el país existen escasos trabajos prácticos, y los que hallamos en su mayoría se han publicado fuera de nuestras fronteras⁵ o se basan en estudios desarrollados en el extranjero⁶, que si bien son un avance, por representar una guía para las nuevas investigaciones, no reflejan la situación real por las distintas condiciones de luz que se dan en otras latitudes e incluso, en los diferentes Estados de la República Mexicana. La mayor parte de la bibliografía a nuestro alcance ha sido generada en los Estados Unidos de América, donde la investigación comenzó por los años 70 del siglo pasado. En Inglaterra, donde se generó el método del día claro y en Austria donde reside la sede de la Comisión Internacional de Iluminación, CIE, indudablemente debe existir mucha investigación, sin embargo, los recursos a nuestro alcance solo nos permitieron conocer lo descrito y algunos escuetos artículos obtenidos por medio de la red global.

Por estas razones a resultado de gran interés, realizar el estudio en condiciones reales de iluminación natural, lo que constituye la otra parte de nuestro trabajo y dado que el alcance de esta investigación ha sido la Ciudad de México, como tal pretende ser un aporte hacia un mayor conocimiento de las formas de iluminar las edificaciones durante el día o las horas de mayor uso diurno, evitando al máximo el uso de luz artificial,. Esta tarea que resultó ardua y muy extensa, tanto en el periodo de recolección de datos como en el trabajo de gabinete, ha sido a nuestro juicio, pródiga en experiencias, pero también en la apertura de múltiples caminos para desarrollar otras investigaciones.

Para alcanzar el fin propuesto, realizamos además, una revisión bibliográfica y con los medios a nuestro alcance nos dimos a la tarea de explorar los diferentes temas que intervienen de manera directa con el fenómeno luminoso, abarcándolo desde diversos ángulos para obtener un panorama general y su problemática, asistiendo a cursos específicos para conocer las condicionantes que se dan en la Ciudad de México.

⁴ Hotel eco-eficiente en la Ciudad de México, Tesis presentada por Henry J. A. Cabroler Sanhueza, Fac. de Arquitectura, UNAM, Febrero de 2005

⁵En Latinoamérica existen avances importantes en Cuba y Argentina, Andrea Pattini, Iluminación Natural, Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - <http://www.cricyt.edu.ar/lahv/xoops/html/modules/freecontent/index.php?id=10#3>, INCIHUSA – CRICYT, Mendoza, Argentina.

⁶ Arias Orozco, Silvia y Ávila Ramírez, David Carlos, La iluminación natural en la arquitectura, Universidad de Guadalajara, CUUAD, Guadalajara, 2004

Otra prioridad ha sido el adquirir una mejor formación técnica en lo concerniente a tecnologías eco-ambientales; ya que al conocer y aplicar el diseño bioclimático podemos comprender de una manera mas eficiente lo relativo a la iluminación natural, pues como hemos mencionado, la arquitectura es algo integral y si bien estudiamos los efectos lumínicos, aún cuando no son parte esencial de nuestra investigación, debemos tener presentes las ganancias y pérdidas de calor, así como otras condicionantes, dadas las particulares características de la Ciudad de México.

El trabajo escrito inicia con una breve revisión de la influencia que el sol y su luz han tenido en la historia de algunos pueblos antiguos y la forma en que estos los han aprovechado, acercarnos en el tiempo a la época actual, nos ha permitido conocer el deterioro de la relación del género humano con su entorno, lo que explica a nuestro juicio, las graves consecuencias del presente.

La comprensión del elemento esencial de este trabajo, es decir, la luz natural, fue la tarea que desarrollamos en el segundo capítulo y para ello la estudiamos desde aspectos físicos, biológicos, sicológicos, así como las maneras en que es tratada por la legislación y la arquitectura, además de algunos elementos que consideramos relevantes para su control y buen uso.

En el tercer capítulo procuramos identificar los diferentes factores que se requiere conocer para una aplicación práctica de la incidencia solar en la arquitectura, desarrollando algunas estrategias para la Ciudad de México.

Los experimentos de campo desarrollados en el modelo real, son tratados en el capítulo cuarto, para lo cual se han estudiado combinaciones de diversos factores, tales como la existencia del plafón, relacionándola con su altura, la presencia de deflectores y el tamaño de la ventana, lo que nos ha permitido apreciar su influencia en la iluminación al interior del espacio habitable, dado que en cada etapa se realizaron mediciones que arrojaron datos cuantificables.

En el capítulo final se presentan los experimentos de campo realizados en el modelo a escala; en esta fase se combinaron diferentes tipos de deflectores de luz con vidrios para determinar las respectivas afectaciones o contribuciones, los datos fueron meticulosamente registradas mediante los equipos de captura, lo que ha permitido el análisis de la información, mediante la producción de gráficas, basadas en planillas de cálculo.,

Tanto para el modelo real como para el modelo a escala, se realizó una selección de días cuyas características los hacían particulares y dignos de ser presentados y comparados con otros de similar relevancia. Por esto, los que se muestran son una mínima parte del total de días registrados y analizados.

Una de las prioridades para el desarrollo de esta tesis fue encontrar parámetros lumínicos que sirvieran como base para diseñar, usando

la luz de la bóveda celeste, pero dada la escasez de trabajos prácticos, debimos apoyarnos en experimentos realizados en laboratorio, que nos arrojaron datos confiables y consistentes, de los que seleccionamos algunos días que consideramos característicos, que nos sirvieron para obtener una muestra representativa, de lo que sucede en algunos periodos del año con la iluminación natural. Siendo muy rigurosos debimos definir los días críticos y para ello haber realizado un análisis estadístico basándonos en datos históricos de iluminación, radiación, nubosidad, contaminación y otros que debían ser definidos en el curso de la investigación, sin embargo, al adentrarnos en el tema la meta trazada se nos mostró demasiado ambiciosa, por lo que la realidad se impuso con todos sus costos de tiempo, dinero y esfuerzo, por lo que el trabajo quedó acotado a las experiencias de los capítulos 4 y 5.

Cuestionar el método del día claro por ser exógeno y por ende alejado de la realidad propia de una ciudad ubicada en la región tropical a una altura superior a los 2000 metros, se tornó algo casi natural y creemos que nuestras sospechas se han convertido en certeza, sin embargo, debemos confesar que no hemos sido capaces de sentar las bases de un método propio y solo alcanzamos a llegar al planteamiento de las investigaciones que sería preciso realizar para tal fin. En todo caso y a modo de descargo, podemos decir que dicha tarea es monumental y rebasa con creces las posibilidades de un trabajo de maestría. No obstante, creemos que el resultado ha sido al menos satisfactorio, pues nos ha permitido comprender de mejor forma el fenómeno luminoso, tener un conocimiento mayor sobre la incidencia solar en las edificaciones y la manera de operar algunos aditamentos comúnmente utilizados en la arquitectura, entre otras, pero fundamentalmente nos ha mostrado la gran dimensión de nuestra ignorancia y el arduo sendero que es preciso recorrer para alcanzar la erudición en el tema, pero si bien nos encontramos al inicio, al menos hemos comenzado a caminar.

Capitulo I

Aproximación a una historia de la luz solar

"Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras que el género humano no escucha"

(VICTOR HUGO)

1.1.- Antecedentes históricos de la utilización de la luz solar

Estudiar las culturas antiguas o lo que otros seres humanos han realizado con anterioridad a nosotros, debe ser siempre el punto de inicio para comprender el presente, ya que nuestra era no está desligada de su pasado y mas aún, sabemos que somos el resultado de los múltiples factores que han intervenido a lo largo de la historia, para dar origen a la sociedad en la que hoy habitamos y la arquitectura que es proyectada en la actualidad no está exenta de esto, lo que consideramos una razón importante para incluir este trabajo.

AMÉRICA PREHISPÁNICA

Desde los orígenes de la humanidad, el sol ha sido el gran rector de la vida, lo que ha quedado como un legado permanente en las fabulosas construcciones que desarrollaron nuestros antepasados prehispánicos y de acuerdo con investigaciones recientes “podemos afirmar que las estructuras cívico-ceremoniales fueron, por regla general, orientadas con base en consideraciones astronómicas”¹ en sitios como la pirámide 'del sol' en Teotihuacan, o en el 'Observatorio' de Chichén Itzá, que está claramente desviado con respecto a la alineación de la plataforma sobre la cual se yergue de modo que las cuatro puertas que posee están orientadas según los puntos cardinales, mientras sus ventanas coinciden con el paso del sol en los equinoccios. Fecha ésta última en la cual acuden miles de personas para observar el espectáculo que produce la sombra de los escalones en la pirámide de Kukulcán, que asemeja el movimiento de una serpiente que baja por la misma. El grado de conocimiento del ciclo solar que alcanzó la civilización maya era tan elevado que su calendario tenía mayor precisión que el usado en la edad media europea, es decir el calendario gregoriano.

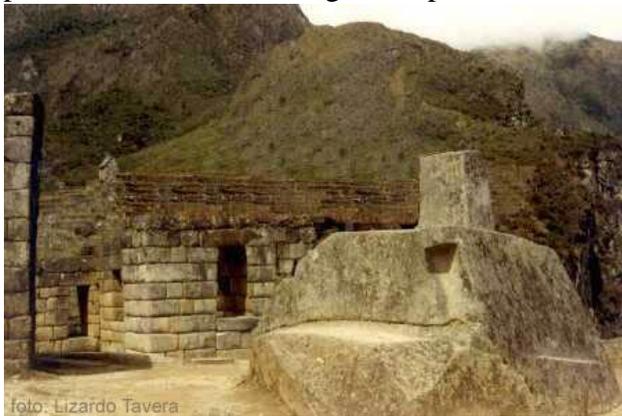


Imagen N°2 Intihuatana

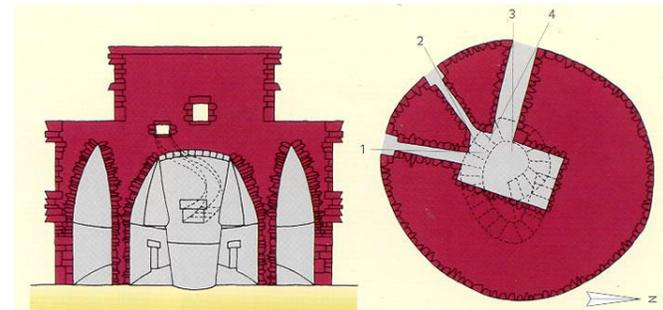


Imagen N° 1 observatoria Chichen Itzá

En las alturas del Cuzco en Perú otra cultura también confería gran importancia a los fenómenos celestes, llamada 'Machu Pichu', conoció el esplendor en la época de la llegada de los conquistadores al continente y sirvió como último bastión de refugio para el Inca. Su conocimiento del movimiento solar les permitió edificar o esculpir monumentos como el Intihuatana o "lugar donde se amarra al sol" que es una piedra tallada destinada a conocer, por medio de la sombra proyectada, los solsticios y

¹ La astronomía, Ivan Sprajc, en Historia antigua de México, Vol IV, p. 294, coords. Linda Manzanilla y Leonardo López Luján, INAH-UNAM, 2001.

equinoccios, tan necesarios para una sociedad agrícola.² Todo esto además de demostrar el gran conocimiento astronómico de los primeros constructores americanos³, muestra la importancia, ya fuera religiosa o de otra índole que estos centros atribuían al astro rey. En el llamado viejo mundo, también existen innumerables ejemplos del conocimiento de la trayectoria solar en relación a la tierra; así



Imagen N° 3 Stonehenge

podemos encontrar sitios como Stonehenge, que es un monumento megalítico, tipo Cromlech, (formado por piedras o menhires clavados en el suelo de forma circular o elíptica, cercando un terreno), perteneciente a la Edad del Bronce del período Neolítico y está situado cerca de Amesbury en Wiltshire, Gran Bretaña, este monumento tenía funciones astronómicas evidentes, dado que en ciertas posiciones se puede visualizar las salidas y puestas de sol en los solsticios de invierno y verano.⁴ Sin lugar a dudas estos conocimientos daban a sus poseedores poder sobre sus semejantes, dado que como está demostrado en diversas culturas, eran signos utilizados para iniciar siembras o cosechas, que aseguraban la continuidad material de los habitantes.

EGIPTO

El día del solsticio de verano los egipcios celebraban la fiesta de su dios, al amanecer el faraón levantaba una pieza ritual en el preciso instante en que el sol hacía su aparición inundándola de luz, esto significaba que Osiris renacía para regocijo de toda la sociedad y también del faraón, dado que de esta forma reafirmaba su divinidad.

En el templo Egipcio la luz solar es usada para realizar una transición, se pasa escalonadamente de un espacio lleno de luz a una zona en penumbra que está iluminada sólo por una lámpara de aceite. Este efecto de menor a mayor privatización se refleja en los espacios sucesivos del templo, donde el acceso al

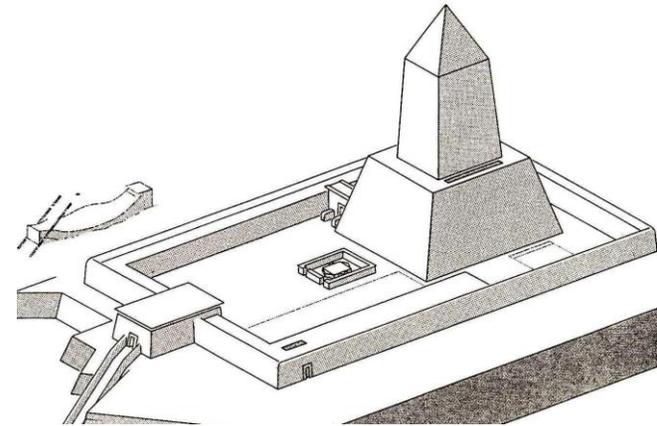


Imagen N° 4 Reconstrucción del Templo solar de Niuserra

² Ver http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/act_permanentes/geografia/cenit/machuint5.htm

³ El entrecomillado es debido a que los nombres dados a estas construcciones son contemporáneos a nuestra época y no corresponden al nombre original que les pueden haber dado quienes las realizaron

⁴ Ver <http://www.astro-digital.com/3/stone.html>



Imagen N° 5 casa patio árabe

santuario se acompaña arquitectónicamente con gradaciones de mayor a menor luz, es decir, de menor a mayor misterio, en lo que constituye un impresionante despliegue de poder⁵. Es una arquitectura que podríamos llamar histriónica, cuya finalidad es producir una impresión. Al menos en la V dinastía se desarrolló un importante culto al sol, ya que los faraones de este período mandaron construir templos solares que eran recintos funerarios dedicados a la puesta del dios-sol, en los cuales se construyeron obeliscos asentados sobre pedestales de mampostería en lugar de pirámides⁶. Por los relieves que contenían se sabe que estas esbeltas construcciones servían para mantener el orden universal por medio de las ofrendas, pero también es claro que por medio de ellos se conocían los movimientos del sol respecto de la tierra, y servían como relojes de sol para medir el tiempo por medio de la sombra que proyectan. Además de orientar “sus edificios para aprovechar la sombra de manera que los bajos relieves tuvieran mejor visión con luz rasgada o lateral, lo que se puede apreciar claramente en el texto erudito *Laus Umbrae* elogio de la sombra”,⁷ de Janus Dousa, que entrega información sobre los claroscuros de las pirámides.

Estos conocimientos también se trasladaron al ámbito cotidiano y así, la vivienda egipcia se articula en torno a un patio central, al rededor del cual se realiza la vida doméstica. La casa está compuesta por recámaras, cuartos, bodegas y la cocina además de una escalera que permite ascender a la azotea, la estancia tiene dimensiones considerables y es de mayor altura que el resto de las habitaciones, está sostenida por una columnata que le permite ser iluminada y ventilada⁸. De manera mas amplia, la casa árabe, que llegó hasta nosotros como una herencia cultural de España, conserva el patio central, que tenía el fin específico de proteger a sus moradores del sol abrasador del desierto, como nos narra Boabdil, último sultán de la Alhambra "... en la ciudad hace un calor muy grande. Sin embargo, dentro de la antigua residencia califal apenas si se nota. Sus amplias estancias están protegidas y refrescadas por los gruesos muros, los altos techos, las luces veladas y los surtidores de los patios..."⁹ De este modo la arquitectura

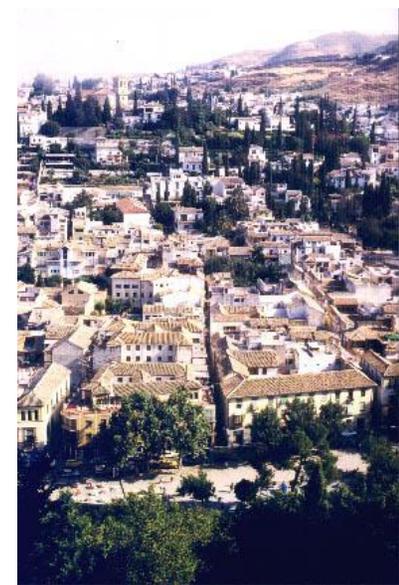


Imagen N° 6 barrio del Albaycín

⁵ **El Sentido De La Luz**, Ideas, mitos y evolución de las artes y los espectáculos de luz hasta el cine. Pag. 12, Tesis doctoral presentada por: Ignacio Javier Castillo Martínez De Locos, Dirigida por Dr. Carles Ameller Ferretjans, Barcelona, 21 de junio de 2005 p 119

⁶ **Egipto, el mundo de los faraones**, editado por Regine Schlulz y Matias Seidel, Ed. Könemann, Colonia, 1997, p. 82

⁷ **El Sentido De La Luz**, Op. cit. p 120

⁸ **Introducción al estudio de la arquitectura occidental**, Raúl Enríquez, UNAM, 1988, p. 34

⁹ **El manuscrito carmesí**, Antonio Gala, Col. Autores Españoles e Hispanoamericanos, Ed. Planeta, 1994, p. 334.

islámica está orientada hacia el espacio interior, como opuesta al exterior o la fachada, donde la expresión mas sublime de este enfoque hacia lo íntimo es la casa musulmana, por esto el patio resulta un elemento fundamental para realizar las funciones básicas de iluminar, ventilar y con la adición de las fuentes y surtidores, humedecer el aire del espacio interior, logrando el confort de los moradores

GRECIA

La sociedad minoica, considerada prehelénica floreció en la isla de Creta y ejerció una intensa actividad comercial en todo el Mediterráneo, por lo que no es extraño que adoptara la tipología de vivienda egipcia, que se adaptaba plenamente a sus condiciones climáticas, pero llevando la arquitectura a un nivel de profundización mayor, dando como resultado sistemas como los pozos de luz, que permitían llevar a las diferentes plantas la claridad tan necesaria, esto queda magistralmente manifiesto en el gran palacio de Cnosos¹⁰. Posteriormente la sociedad griega que estuvo siempre rebosante de estudiosos no podía ignorar los fenómenos naturales y se preocupó de su estudio y así nos dejó testimonios escritos que como el de Vitruvio titulado "las diez lámparas de la arquitectura" donde nos dice; "Explicaremos ahora

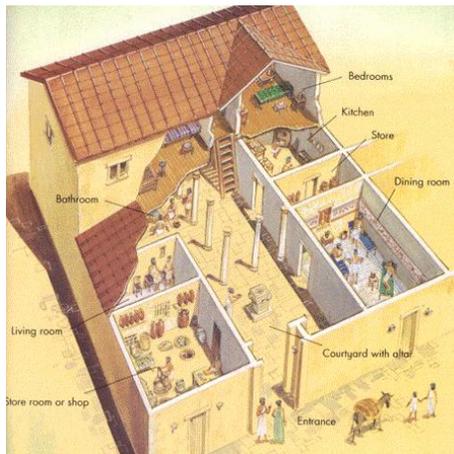


Imagen N° 8 casa griega

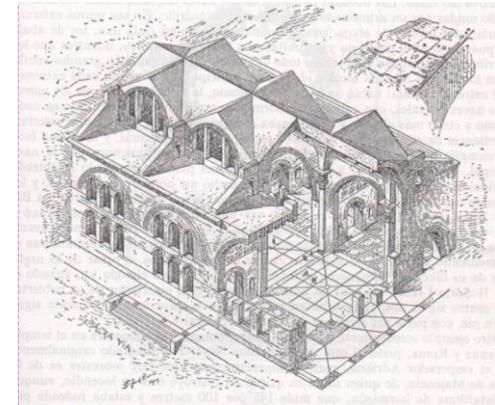


Imagen N° 7 Palacio de Cnosos

los aspectos celestes a que debe mirar cada género de edificios para su mejor uso. Los triclinios de invierno y los baños deben mirar al poniente hibernal, por necesitar la luz a las horas de la tarde y también porque el sol junto al ocaso, despidiendo su calor y rayos directamente, conserva tibias aquellas regiones a tales horas... con la óptica se toman en los edificios las mejores luces y de mejor parte... conocer las variedades de cielo... las cualidades del aire de las regiones... y el uso de las aguas: porque sin estas precauciones no puede haber habitaciones sanas..."¹¹. Por su parte Hipócrates, considerado el padre de la medicina, señala la necesidad de orientar al sur las fachadas de las viviendas,¹² lo que demuestra su conocimiento del movimiento aparente del sol y de la mejor forma de utilizar las condiciones ambientales. Y es en la casa patio donde mejor se puede percibir como "las habitaciones se abren a dicho espacio para recibir su luz y se cierran con una cortina. La luz que recibe la casa griega es reflejada por el suelo del patiouna luz que viene de abajo que rebota en

¹⁰ **Arquitectura griega y romana**, D. S. Robertson, Ed. Cátedra, Madrid, 1979. p. 40

¹¹ **Los Diez Libros de Arquitectura**, Vitruvio Polión, Marco. Traducción de José Ortiz y Sanz, Ed. Akal, S. A. Madrid 1992

¹² HIPÓCRATES de Cos (460 a C -- 377 a C) Estudioso Griego, impuso la escuela médica de Cos y su tendencia basada en la observación clínica, orientada hacia la curación y la salud del enfermo, con lo que fue separada definitivamente la medicina de las practicas religiosas.

el techo de la galería y se difunde por todo el espacio".¹³ De esta forma logran iluminar sin irradiar de manera considerable, las habitaciones que dan al patio, utilizando la luz difusa que éste refleja, así pueden mantener una temperatura adecuada en el interior en una zona de intenso calor en la época estival.

ROMA



Imagen N° 9 Casa romana

Originalmente la casa romana tenía planta circular y techumbre cónica y era denominada *tugurium*, la que fue sustituida por el modelo de planta rectangular y una abertura en el tejado para que saliera el humo y entrara la luz y el aire.¹⁴ Posteriormente los romanos pudientes ampliaron sus casas, adosando una segunda vivienda de características griegas, en la que cada habitación estaba destinada a un uso concreto, así la casa quedó conformada por un primer núcleo más público alrededor de un espacio al aire libre o patio central, que además de servir para iluminar las habitaciones, por su abertura superior entraba el agua de lluvia que caía en un pequeño estanque comunicado con una cisterna subterránea. A través de un salón destinado a recibir visitas se comunicaba con el segundo patio interior el que era muy amplio, estaba porticado y adornado con toda

clase de plantas, flores, estatuas y surtidores. A su alrededor se estructuraban las habitaciones mejor iluminadas y más bellas de la casa.

Si bien desde Egipto y Mesopotamia el uso de arcos, columnas y bóvedas de cañón corrido eran conocidos, fue en Roma donde se logró apreciar de mejor forma su utilización, los que permitieron en gran medida la articulación de espacios con una mayor riqueza como queda manifiesto en la Basílica Nova de Majencio, donde las naves colaterales son más bajas que la central para permitir la iluminación del espacio central interior.¹⁵



Imagen N° 10 tugurium

¹³ **El sentido de la luz...**Op. Cit pp121-122

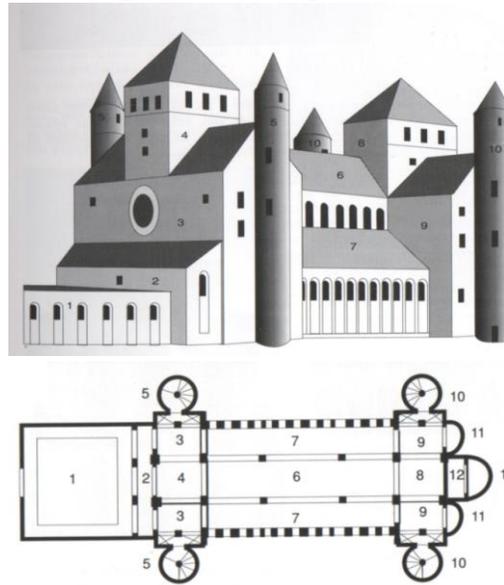
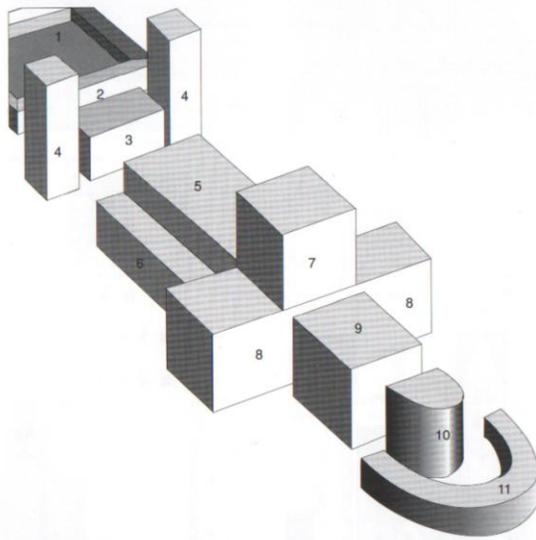
¹⁴ http://www.santiagoapostol.net/latin/casa_antigua.html

¹⁵ Arquitectura griega y romana, Op. Cit. p.220 y 249

ROMÁNICO

La luz, que es el concepto religioso asociado a Dios por excelencia, introducido por San Agustín.(354-430) en la concepción teológica occidental, es un mecanismo central en la arquitectura románica, de hecho, "se trata de utilizar la luz como un elemento al que se subordinan los elementos decorativos y por el que se define un espacio aislado...el ventanal románico cumplía funciones de vano abierto al exterior: de foco de luz, en sentido estricto."¹⁶ Es decir, que en esta época, la luz no solo tiene una función práctica, como es la de iluminar, sino una fundamentalmente simbólica. "Las iglesias románicas están orientadas con el ábside al Este y la puerta principal al Oeste, entre otras razones para favorecer un tipo de luz y una acción simbólica con el fin de llevar a los fieles en una translación de Oeste a Este y transportarlos así en el camino hacia a luz"¹⁷. De este modo "la comprensión que se tenía en el siglo XIII de la fisiología de la visión y de la fisiología de la luz estaba incluida dentro de un armazón filosófico y se debía distinguir entre dos principios de la metafísica de la luz; el poder de un cuerpo de hacerse patente a sí mismo e iluminar a otros y la consustancialidad e

indivisibilidad del rayo de luz y de su fuente...la luz era vista como una fuente de metáforas¹⁸"



- 1.- Atrio
- 2.- Nártex
- 3.- Fachada occidental
- 4.- Torre del crucero oeste
- 5.- Torres laterales del oeste
- 6.- Nave central
- 7.- Nave lateral
- 8.- Torre del crucero
- 9.- Nave transversal o transepto
- 10.- Torres del transepto
- 11.- Ábsides laterales
- 12.- Coro
- 13.- Ábside

Imagen N° 11 Componentes de la construcción sacro románica¹

¹⁶ Victor Nieto Alcaide, La luz, símbolo y sistema visual, Cuadernos de arte, Ed. Cátedra, Madrid 1989, p. 20

¹⁷ **El Sentido De La Luz**, Op Cit, p. 12

¹⁸ Paul Hills, La luz en la pintura de los antiguos italianos, traducción de Isabel Bannasar, Ed. Akal, Madrid, 1995, p. 21

GÓTICO

En esta época, que viene a ser en gran medida la culminación superlativa del románico, se sigue manteniendo la concepción divina de la luz, pero al introducirse el arco ojival se permite aumentar los claros y la producción de enormes vitrales, -que conocidos ya desde el período anterior, cobran mayor fuerza en el gótico- al elevarse los muros, las vidrieras se alejan del espectador produciendo una hermosa contradicción, por una parte el pequeño detalle que aquel no puede percibir y por otra la visión de conjunto, que sin el detalle no revelaría la cromaticidad que poseen. Así, en la catedral gótica el "muro translúcido, creó un espacio determinado por una luz coloreada y cambiante...el control de la luz, en relación con el espacio arquitectónico, fue el punto de partida para convertir el interior en un ámbito desprovisto de relaciones materiales y similitudes con el espacio natural. La idea



Imagen N° 13 crucero de la catedral de Notre Dame de París

de una atmósfera no natural... fue el desarrollo de un simbolismo que relacionaba la luz con lo divino",¹⁹ por lo que podemos afirmar que la catedral gótica es un libro luminoso, "La luz coloreada y su valor simbólico son el principio de la significación del espacio gótico"²⁰, que al ir revelando pasajes de las enseñanzas cristianas se convierte en un recurso didáctico, "una teología de la luz",²¹ y es en el crucero donde se revela con mayor vigor, dando unidad espacial al conjunto a través de la cohesión lumínica, así el interior es un "símbolo de creación mística...(la luz) procede de una única fuente que se propaga gradualmente siguiendo una cadena jerárquica...la divinidad se expresa a partir de una claridad sobrenatural."²²

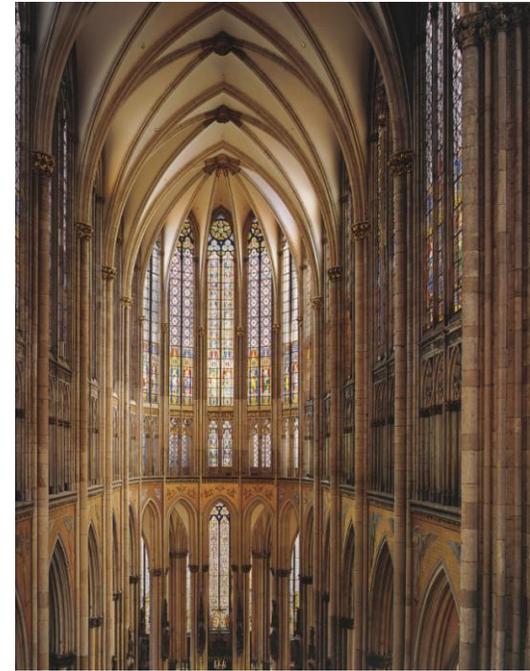


Imagen N° 12 Vitrales Catedral de Colonia

¹⁹ Victor Nieto Alcaide, Op Cit, p. 14

²⁰ Victor Nieto Alcaide, Op Cit, p. 27

²¹ Xavier Barral i Altet, Las vidrieras medievales en Europa, Ed. Lumweg, p. 11

²² Xavier Barral i Altet, Op Cit p. 11

RENACIMIENTO

Italia nunca logró asimilar en forma manifiesta los postulados del gótico, debido en gran medida a su convivencia permanente con los clásicos, además, la decadencia moral a la que había conducido la etapa final de la edad media, hacía necesaria una nueva búsqueda de la espiritualidad, encontrando en los valores griegos de la antigüedad la fuerza que requería, es por estas entre otras razones, que el renacimiento se inicia en Florencia, donde una clase poderosa de burgueses había alcanzado enorme riqueza por lo que necesitaba distanciarse del poder religioso, para ejercer el propio. Esto trae consigo un nuevo pensamiento centrado en la razón, así el ser humano y la naturaleza pasan a ser elementos centrales de la vida, el artista deseaba dejar de "ser el vehículo plástico y casi impersonal de las creencias e ideas metafísicas de la comunidad cristiana"²³, para resurgir con una individualidad propia. Bajo estas circunstancias no es extraño que Brunelleschi perfeccionara la perspectiva geométrica que dominaría toda la época renacentista hasta nuestros días, la que se basaba en los conceptos euclidianos del rayo y cono visual.

En la arquitectura doméstica no se aprecian grandes cambios respecto de épocas anteriores, pues el patio "constituye un espacio semipúblico del palacio en torno al cual se organizan las habitaciones"²⁴, modelo que da seguridad y proporciona el ya mencionado acondicionamiento natural, por lo que las mayores transformaciones se dan en las fachadas, donde se establece una regularidad y alineamiento de ventanas y puertas.

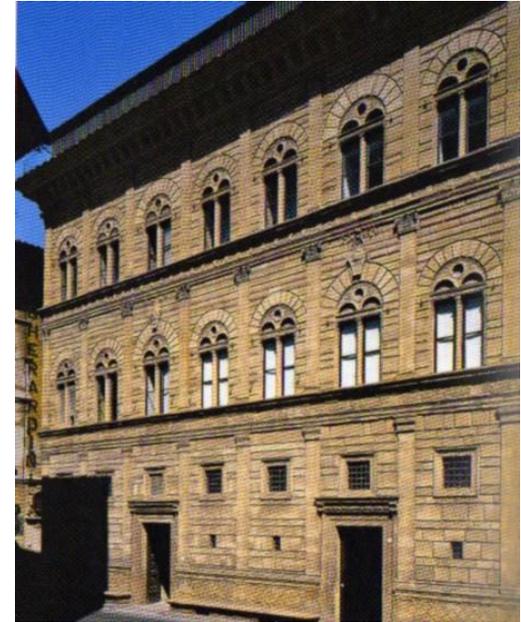


Imagen N° 14 Palazzo Rucellai

LOS TIEMPOS MODERNOS

Dado que en historia se entiende por moderno al espacio de tiempo que abarca desde la llegada de Colón a América - hecho ocurrido en 1492 - pleno apogeo del Renacimiento, hasta nuestros días (a pesar que hay quienes afirman que esta época acabó en una fecha que no han terminado de acordar) además, considerando que en términos de la interacción con el medio y mas específicamente en la iluminación, desde esta época no hubo grandes propuestas, excepto probablemente el movimiento generado por el jardinero Joseph Paxton, con su estructura de hierro y cristal diseñada para la exposición universal de 1851, que le valió el ser nombrado caballero, la

²³ Introducción al estudio de la arquitectura occidental, Op. Cit. p. 160

²⁴ Cáceres Patrimonio de la Humanidad. Andrés Ordax, S. Lunweg Editores, S. A. Barcelona, 1987, p. 77.

que si bien introdujo un estilo completamente nuevo y tal vez se le podría atribuir el quiebre definitivo con la arquitectura historicista, tiene el inconveniente de persistir en la separación de la arquitectura y las condicionantes ambientales.

En este lapso de 5 siglos, en que la arquitectura fue centrándose cada vez mas en el interior y la decoración, muchas de las consideraciones que se tenían de los elementos climáticos fueron siendo paulatinamente abandonas, al punto de llegar a condiciones manifiestamente adversas a la habitabilidad. Esto motivó que a fines del siglo XVIII surgieran propuestas como las de los llamados socialistas utópicos, que si bien estaban preocupados por una mejor calidad de vida para los obreros, sus propuestas se atenían a satisfacer necesidades básicas, es decir, comer, dormir y en algunos casos estudiar y recrearse, pero la influencia de las condicionantes ambientales, era algo que aún no se asimilaba. Fue recién en las primeras décadas



Imagen N° 15 Palacio de cristal

del siglo XX cuando esto se hace patente y al acercarse la segunda mitad de este podemos observar cómo en la carta de Atenas, confiada a Charles-Edouard Jeanneret-Gris, mas conocido como Le Coubusier, se hace evidente la precariedad de la habitación popular "...las condiciones de vida son nefastas por falta de espacio suficiente para el alojamiento...Casitas mal construidas, barracas de planchas, cobertizos en los que se mezclan mejor o peor los mas imprevisos materiales...eso es el suburbio. Su fealdad y tristeza es la vergüenza de la ciudad a la que rodea."²⁵. Y a partir de estas consideraciones se plantea, incorporando las variables climáticas, lo que tendría que suceder con la ciudad, "El sol, que preside todo proceso de crecimiento, debería penetrar en el interior de cada vivienda para esparcir en ella sus rayos, sin los cuales la vida se marchita...(así) El análisis revela que, en las ciudades, la proporción de las fachadas no soleadas varía entre la mitad y las tres cuartas partes del total...El sol es el señor de la vida. La medicina ha demostrado que donde no entra el sol, se instala la tuberculosis"²⁶

Sin embargo, es preciso hacer notar que en estas consideraciones, la luz se entiende como un anexo al proceso funguicida de los rayos solares. Evidentemente no se puede soslayar la labor en pos de una mejor habitabilidad emprendida por el CIAM²⁷, pero lo que no puede ser negado es el evidente retroceso en que incurrió la arquitectura hasta llegar a esta época, al olvidar casi por completo las condiciones ambientales y de habitación, relegándolas o lisa y llanamente no considerándolas.

²⁵ le Corbusier, Principios de urbanismo (La carta de Atenas), Obras maestras del pensamiento contemporáneo, Ed Planeta-Agostini, Bs. Aires 1993, pp 39 y 54.

²⁶ le Corbusier, Principios de urbanismo, Ibid. pp. 42, 48 y 59

²⁷ Congreso Internacional de Arquitectura Moderna

Con una visión muy diferente, ya 10 años antes Frank Lloyd Wright, había detectado esta problemática, él veía en la 'modernidad' la solución a los problemas de la ciudad, avizoraba que "la arquitectura moderna simplemente reinterpretará nuestro propio ideal de libertad humana y naturalmente buscará espaciosidad, apertura, luminosidad y fuerza, tan completamente lógicas que en el proceso, erradicarán un humanismo enfermo". Aunque Wright partía de una concepción en la que asignaba al automóvil un papel preponderante e incluso rector de la vida de la ciudad, de manera no menos utópica que los idealistas del siglo XVIII, proponía que la densidad para la vivienda se debía fijar asignando "un acre de tierra por persona, mas que por familia"

Lloyd Wright de igual forma que Le Corbusier estaba preocupado por una mejor habitabilidad de los espacios y asignaba a la utilización de los elementos naturales un papel fundamental en el diseño, acuñando el término 'arquitectura orgánica', para enfatizar la necesidad de integrar la arquitectura y el entorno natural. Concebía el trabajo "comunitario en espíritu y de naturaleza productiva..."²⁸, por lo que consideraba (al igual que Robert Owen), que se debía brindar las mejores condiciones para realizarlo, esto se refleja claramente en sus proyectos donde siempre buscó proveer luz difusa y ventilación natural como en la sala de trabajo del edificio administrativo de la compañía *S. C. Johnson and son* o en el museo Guggenheim de Nueva York.

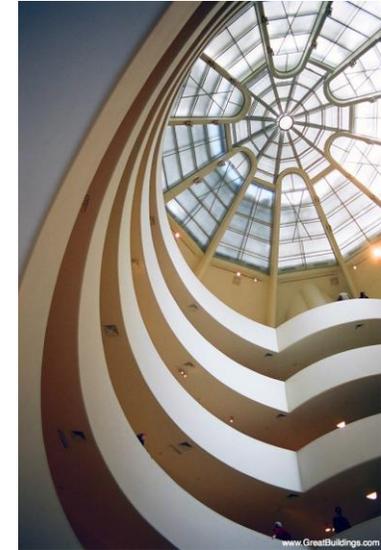


Imagen N° 16 Museo Guggenheim, Nueva York

A partir de estos y muchos otros pioneros conocidos o anónimos, lentamente hemos comenzado a retomar el camino hacia una arquitectura mas humana y natural, el que nunca debimos abandonar. Aunque sea por una necesidad urgente, siempre mas vale tarde que nunca, hoy por hoy, es cada vez mayor el contingente de personas que comienzan al menos a preocuparse por estos temas, por esta razón cualquier contribución no es despreciable y debe ser bienvenida.

De este modo hemos visto a través de las precedentes líneas, la manera cómo los constructores desde los tiempos mas remotos han mirado la naturaleza y mas específicamente la relación con nuestra gran estrella, el sol, adorándolo como Dios o simplemente como el gran articulador de la vida al que es preciso respetar y por lo tanto, ceñirse a sus dictados. Pero también hemos podido observar el fuerte sentimiento homocentrista impuesto especialmente durante el siglo XX, que ha dejado las consecuencias ya expuestas. Si la historia ha de servirnos, es precisamente para aprender de ella y no volver a cometer los errores del pasado, reencontrarnos con la naturaleza debe ser la conclusión inequívoca en la búsqueda de mayor bienestar para la humanidad.

²⁸ **Frank Lloyd Wright y la ciudad viviente**, David G. de Long, Vitra Design Museum, Valencia, 2000, p. 52

Capítulo II

Iluminación natural

"Durante el resto de mi vida me preguntaré qué es la luz"

Albert Einstein

2.1- Naturaleza de la luz

Como hemos visto en el texto precedente, el sol ha sido nuestro sustento y el principal potenciador de la vida en nuestro planeta, sin embargo, trabajar con los medios que nos provee, es decir luz y calor, requiere poseer conocimientos e imaginación al momento de aplicarlos, pero dado que nuestro interés reside en la *iluminación natural*, el presente capítulo estará dedicado a estudiar los factores que inciden en el comportamiento de ésta en el interior de los espacios habitables, así como la percepción que de ella tienen los seres humanos, además de la influencia que la luz solar ejerce sobre los individuos. Para lograr esto, necesitaremos a su vez conocer el entorno, puesto que ya hemos hecho énfasis en la relación de la arquitectura y el medio en el cuál se circunscribe y dado que la *iluminación natural* siempre proviene de una fuente externa, no podría ser de otra forma. Por último exploraremos el estado en que se encuentra el estudio de la *iluminación natural* en México y en diferentes partes del planeta, así como la normatividad que reglamenta su uso.

2.1.1.- El factor de luz diurna

Cuando en arquitectura hablamos de espacio edificado, nos estamos refiriendo a un volumen confinado, del cual el símil más burdo sería una caja, la que para ser considerada como tal debe poseer una base, pared(es) y una cubierta, pero si queremos lograr su habitabilidad requerimos una comunicación con el interior, esto se logra por medio de aberturas, las que pueden ser permanentes como pórticos y domos o temporales como puertas y ventanas, las que a su vez pueden ser opacas o translúcidas. Puesto que nuestro interés reside en introducir *iluminación natural* en los edificios, necesitaremos estudiar la forma como ésta penetra en los espacios a través de aquellas aberturas, denominadas vanos.

La luz que llega al interior de un inmueble es una suma de componentes producidas por el flujo luminoso que proviene directamente del sol, al que denominaremos componente directa, pero en su camino desde el astro a la tierra este chorro de fotones colisiona con las partículas suspendidas en la atmósfera de nuestro planeta, produciéndose el fenómeno de la *refracción* que ilumina la *bóveda celeste*, esto sucede porque los haces de luz son enviados en todas direcciones por los elementos que componen la atmósfera. Estos rayos constituyen la parte mas importante en lo que a *iluminación natural* se refiere porque nos brindan niveles de luz con pocas variaciones y los conocemos como luz difusa. Tanto la parte directa como la difusa iluminarán también el entorno que a su vez produce otras reflexiones, algunas de las cuales igualmente penetrarán en nuestro espacio. Estas tres vertientes que iluminarán el local, originan una cuarta debida a las reflexiones ocurridas en el interior del mismo. Así podemos hablar de componentes de la luz solar, que clasificaremos como:

Directa; los rayos solares que sin interferencia se dirigen a un punto determinado en el interior de un inmueble.

Indirecta; aquellos haces que son reflejados por superficies aledañas incidiendo en el punto mencionado y puede ser exterior o interior, dependiendo donde se ubiquen los planos que producen el reflejo.

Difusa; la parte de la luz que llega de la atmósfera y que es refractada desde toda la bóveda celeste, siendo visible para nuestro objeto de estudio, en el punto estudiado.

Para conocer la cantidad de luz que penetra al interior de los espacios construidos se ha definido el *factor de luz diurna*, FLD, que se determina expresando la iluminación en un punto dado de la habitación como un porcentaje de la luz en el exterior, lo que se manifiesta en la siguiente fórmula:

$$\text{FLD} = \frac{E \text{ int}}{E \text{ ext}} \cdot 100 \%$$

Donde FLD: Factor de luz diurna

E int: es la cantidad de luz medida en luxes en el interior de la habitación en un plano horizontal

E ext: cantidad de luz medida en luxes en el exterior de la habitación en un plano horizontal

Para propósitos de cálculo, este valor solo puede ser usado de acuerdo a los parámetros establecidos por la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), es decir para un cielo totalmente cubierto y para cielos despejados con una distribución fija, puesto que el método se desarrolló en Inglaterra donde la condición de días nublados permanentes es algo común¹. Dada la condición cambiante de los cielos de la República Mexicana, este método no resulta adecuado como pretendemos demostrar en el curso de esta investigación, por este motivo es necesario estudiar el comportamiento de la luz al interior de los espacios arquitectónicos, pero también necesitamos conocer la condición de iluminación exterior que define la primera, para esto deberíamos estudiar los tipos de cielos y específicamente las nubes. Si bien existe una clasificación de diez géneros de nubes, dada por la Organización meteorológica mundial², estas a su vez se subdividen para cada uno de los géneros, pero aún si con estas subclasificaciones fuera suficiente, no sería fácil encontrar relaciones que nos permitieran establecer parámetros para su

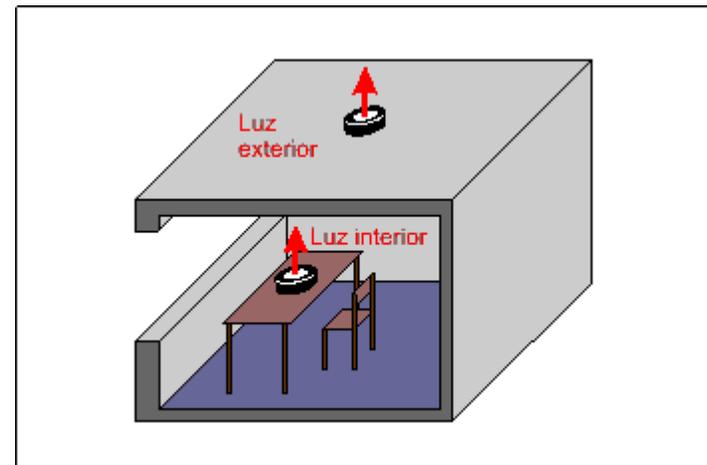


Imagen 17 Factor de luz diurna

¹ Mc Guinness, Stein & Reynolds, Mechanical and electrical equipment for buildings, John Wiley & sons, USA 2003, p. 1120.

² Organización meteorológica mundial, Atlas Internacional de Nubes, Volumen I - Manual de observación de nubes y otros meteoros, 1993

aplicación en nuestro tema de estudio, razón por la cual, para encontrar algún tipo de relación sería necesario estudiarlas de manera heurística, profundizando en campos como el estudio de la teoría del caos o los fractales, lo cual está muy alejado de nuestro interés por el momento, por todo esto no ahondaremos en este tema, que si bien es de gran importancia, puede ser motivo por si solo para una tesis de maestría e incluso de doctorado. En el quinto capítulo regresaremos sobre el tema del Factor de Luz Diurna para dilucidar la factibilidad de su aplicación en la Ciudad de México.

2.1.2 - Comprendiendo la *iluminación natural*

La luz ingresa al interior de los inmuebles por las aberturas, pero dado que las más usadas son las ventanas, serán estos elementos los que concentrarán nuestra atención, sin embargo, cabe señalar que las observaciones que para ellas realicemos podrán ser aplicadas solo a dispositivos que posean las mismas características en igualdad de condiciones. Sabemos que para ingresar a un espacio arquitectónico, la luz debe superar obstáculos, que en el medio urbano se incrementan de manera considerable, entre los cuales podemos citar edificios, árboles, carteles, montañas, etc., pero la barrera más importante será la propia ventana que por sus características requiere un trato especial y será analizada en el apartado número 3 de este capítulo.

Para entender cómo nos ilumina la luz, antes debemos aclarar algunos conceptos, que si bien están definidos en el glosario, necesitamos conocer mejor; comenzaremos diciendo que la luz se propaga de manera esférica, por lo que para ser medida se utiliza el *estereorradián* y la *candela*, con los cuales se puede definir un *lumen*, como la cantidad de luz igual a una candela con la que una fuente ilumina de manera constante y uniforme, una superficie de un estereorradián.

Dado que la luz continúa su camino, al alejarse de su emisor abarca cada vez una mayor superficie esférica, esto quiere decir de acuerdo con la teoría que se ha desarrollado por diversos autores³, que la luz se

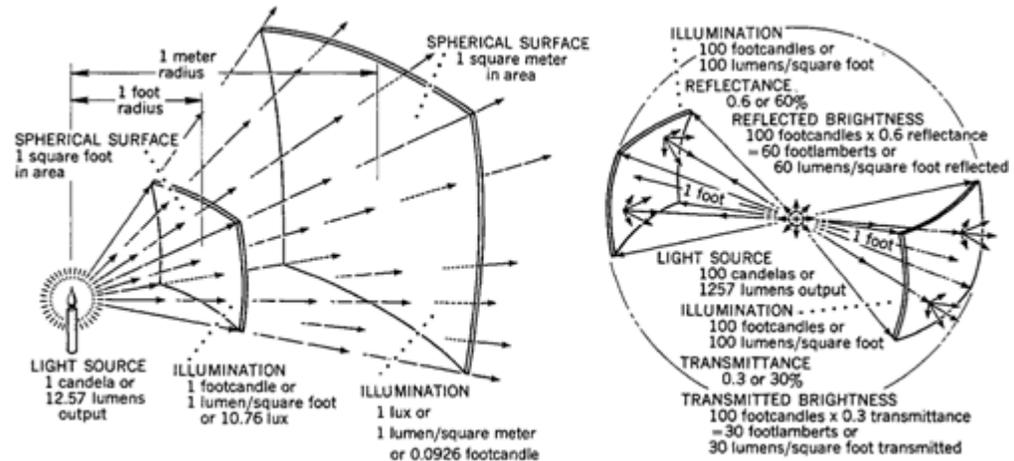


Imagen N° 18 desplazamiento de la luz

³ Concept and practice of architectural daylighting, Fuller Moore, Ed. Van Nostrand Reinhold, Ontario 1981, p. 19

disgrega de manera cuadrática, esto es que decrece a razón del cuadrado de su distancia a la fuente luminosa, en la práctica, lo que sucede es que el haz abarca cada vez más espacio a medida que se aleja de la fuente, pero al ser la misma cantidad de luz en un área mayor su valor luminoso decrece, esto significa que la *iluminación natural* disminuirá muy rápidamente en los interiores, a medida que el punto de medición se aleja de la fuente luminosa, es decir, la ventana.

Por la razón antes descrita, resulta de utilidad estudiar las diversas formas de introducir la luz, pero también es importante considerar el deslumbramiento, ya que un exceso de luz en la ventana producirá molestia a los ocupantes, entonces lo importante es conjugar los factores para producir un óptimo que proporcione luz al interior de los espacios habitables sin molestias adicionales, producidas por los elementos que transportan los haces luminosos.

Existen brillos que producen discomfort, sin que necesariamente impidan la visibilidad, zonas de alto contraste producidas por fuentes de luz directa y áreas oscuras, así como pantallas que pueden recibir una gran cantidad de luz y muchos elementos que inducen una molestia, todos ellos se conocen como deslumbramiento, éste puede ser medido por medio de un índice, que si bien es complejo de calcular, requiere algunos parámetros, de los cuales las variables más importantes son:

- La luminosidad del cielo que ve la ventana.
- El área de ventana que ve al cielo.
- La posición del cielo visible que queda dentro del campo visual.
- El promedio de la *iluminancia* dentro de la habitación excluyendo el cielo visible

En lo que a *iluminación natural* se refiere, existen diferentes formas de calcular de manera teórica la luz que ingresaría en un espacio según las condicionantes del entorno, aunque la mayoría

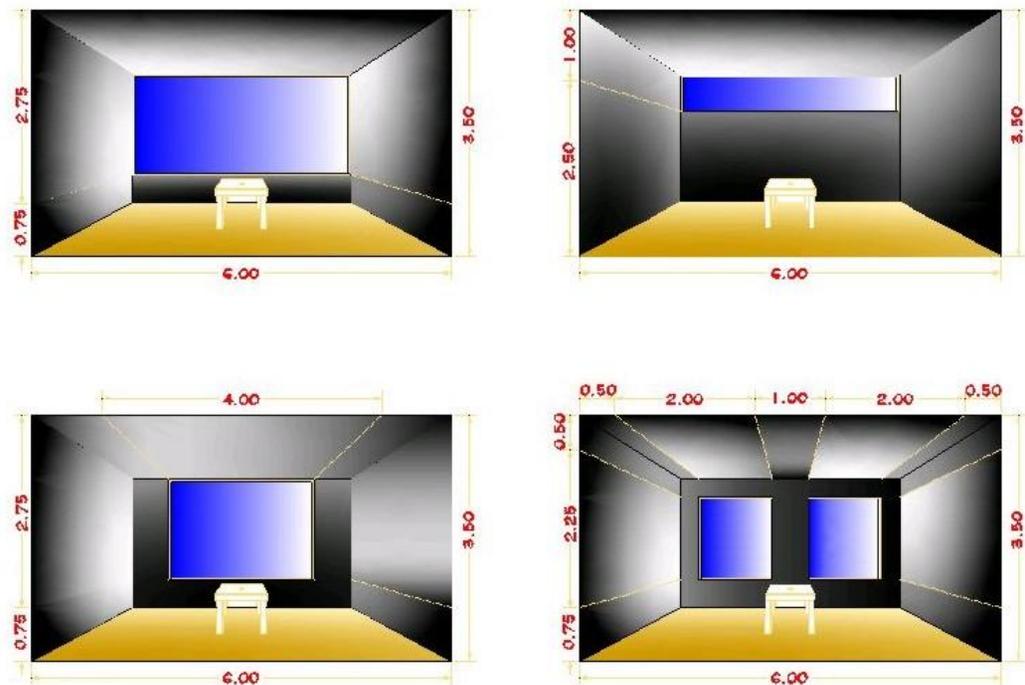


Imagen N° 19 Nivel de iluminación con respecto a la ventana

coincide en fijar un punto en el interior a una altura igual a la superficie de trabajo, que por lo general se considera de 75 cm, refiriendo todas las operaciones matemáticas a este punto. Así tendremos una colección infinita de combinaciones, (imagen N° 19), donde la más sencilla se refiere a una sola ventana de forma rectangular cuyo antepecho se ubica a la altura de la superficie de trabajo y su dintel en el nivel bajo de la losa que sirve de techo o entrepiso, con un ancho de muro a muro, luego se puede variar ya sea la altura y/o el ancho de la abertura, así como hacer desplazamientos de la misma respecto del punto observado y todas las medidas obtenidas en cada caso son llevadas a tablas que nos proporcionan la parte de cielo que "vería" nuestra ventana. Pero hasta aquí no se han considerado más que las variables de posición del punto observado y la posición y tamaño de la ventana, por lo que necesitamos contemplar tanto el tipo como el color de los materiales interiores que también intervienen como variables, ya que indudablemente las *reflexiones* o *refracciones* producidas modificarán el alcance luminoso, también es preciso conocer las obstrucciones del exterior, que reducirán el flujo lumínico que llegue a la ventana, por último debemos agregar la forma como llega la luz, puesto que según la orientación del espacio variará la cantidad que será recibida en su interior a lo largo del día y del año. A todo esto podemos sumar que un objeto arquitectónico puede tener aberturas en todo su perímetro e incluso en la cubierta, lo cual incrementa el problema a tal grado que sería muy largo y engorroso realizar el cálculo por medios manuales⁴, mencionando además que no hemos considerado, las obstrucciones o contribuciones exteriores, la altitud del lugar y las variaciones estacionales entre otras, razones mas que suficientes para que en la actualidad exista una cantidad importante de programas computacionales que intentan resolver dicho problema⁵, pero que siempre estarán limitados a la obtención de datos reales del sitio que se quiera estudiar, lo que hace casi imposible una predicción precisa, sin embargo, se debe mencionar que se pueden conseguir muy buenas aproximaciones, si los procesos se llevan a cabo con rigurosidad.

Dado que en la Ciudad de México sólo existen datos sistemáticos de iluminación relativamente recientes y existen pocos trabajos publicados sobre el tema, no es posible ni siquiera comprobar o refutar la metodología adoptada que se tiene para el cálculo de dicha importante componente de la arquitectura, es por este motivo que nuestra investigación parte de la recolección de datos y como se mencionó anteriormente, la aplicación del método del día claro en la Ciudad de México, está en discusión, por lo que nos propondremos aquí verificar mediante nuestra investigación la validez de dicho método. Lo anterior nos lleva a plantear el trabajo considerando los elementos que están a nuestro alcance, es decir, las mediciones de iluminación que podemos realizar y en las que es posible contar con las componentes global y difusa de la luz natural, además de mediciones específicas en determinados puntos al interior y exterior de nuestros objetos de estudio, para poder inferir a partir de los datos obtenidos, los criterios y estrategias para mejorar la iluminación interior, sin embargo, se debe aclarar que los resultados que se obtengan solo podrán ser aplicados a condiciones similares de iluminación exterior, dado que por no contar con datos de periodos de larga duración y con esto queremos

⁴ Para un mayor conocimiento de un método de cálculo se recomienda revisar el texto "How to Predict Interior Daylight Illumination". Toledo, OH: Libbey Owens Ford Company, 1976.

⁵ Para obtener un programa para cálculos de iluminación ver Radiance en <http://radsite.lbl.gov/radiance/>

decir años, que avalen de manera irrefutable nuestras aseveraciones, no podríamos ser categóricos en términos absolutos y solo podremos realizar afirmaciones referidas a las condiciones presentadas en el momento de nuestra investigación.

Ya hemos referido que la *iluminación natural* decrece hacia el interior de un espacio confinado por elementos verticales y horizontales, más, en condiciones exteriores de luz cambiante, conocer la distancia máxima a la que se puede llegar, cumpliendo con el nivel mínimo de iluminación requerido, será una de nuestras prioridades y aún cuando de acuerdo con la norma mexicana NOM-025-STPS-1999⁶, se establece un nivel de 300 lx como mínimo para actividades de talleres, áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas, las que involucran una cantidad importante de las actividades que se realizan en los edificios, sin embargo éste valor, es apto sólo para personas con una buena agudeza visual⁷, lo que desplaza a todos aquellos individuos que han perdido esta capacidad, ya sea por padecimientos visuales o por la edad, razón por la que adoptaremos como cota inferior para nuestros análisis 500 luxes, dado que este es un nivel de calidad óptimo, como se verá en el apartado 5, de acuerdo con la mayoría de las instituciones dedicadas al estudio de la iluminación, para una buena parte de los trabajos ejecutados en las oficinas, dejando las tareas visuales mas especializadas fuera de nuestras consideraciones.



Imagen N° 20 amplitud y longitud de onda

2.1.3.- El fenómeno físico de la luz y su geometría

Para entender lo que sucede en nuestra masa encefálica al momento de producir las imágenes debemos enfocar nuestra atención en las ondas electromagnéticas, dentro de las cuales existe una

Valores de onda de los colores.			
Color	Frecuencia	Amplitud	Long onda
Rojo	4,6 x 10 ¹⁴ cs/seg	6.500 A	620 a 1000 nm
Naranja	5,0 x 10 ¹⁴ cs/seg	6.000 A	590 a 620 nm
Amarillo	5,2 x 10 ¹⁴ cs/seg	5.800 A	550 a 590 nm
Verde	5,7 x 10 ¹⁴ p/seg	5.200 A	490 a 550 nm
Azul	6,4 x 10 ¹⁴ cs/seg	4.700 A	430 a 490 nm
Violeta	7,3 x 10 ¹⁴ cs/seg	4.100 A	390 a 430 nm

A = "Angstrom" = 0,0001 micra.

Cuadro N° 1

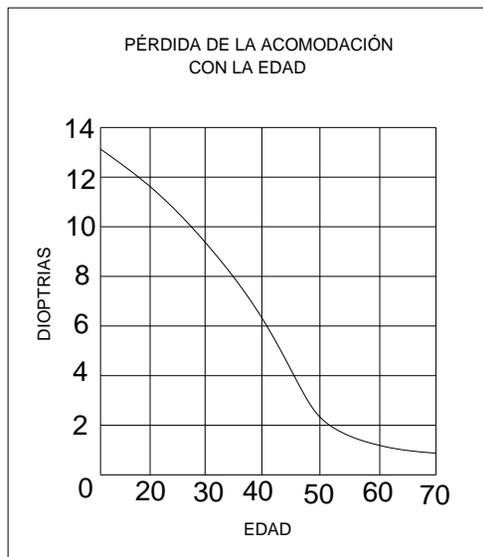
⁶ Ver cuadro N° 3 en página 37 de este capítulo

⁷ Lighting for work: visual and biological effects, W.J.M. van Bommel, G.J. van den Beld, Philips Lighting, The Netherlands, April 2004

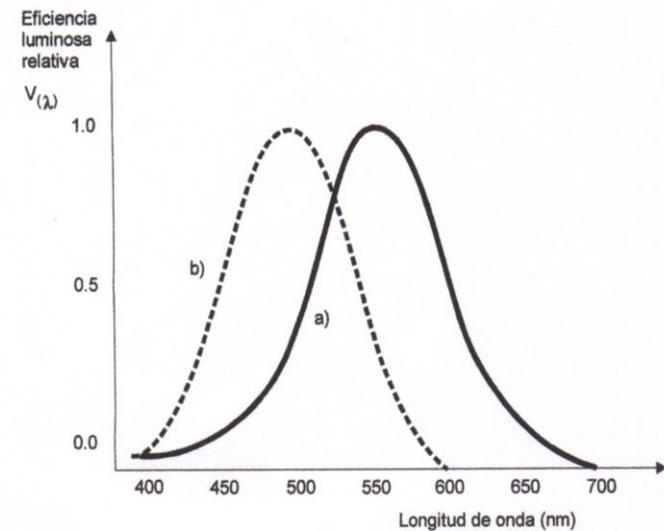
amplia gama, pero nos centraremos en el espectro visible puesto que es en este rango donde se ubica lo que podemos llamar "luz natural"

De todo el espectro luminoso, nuestro sistema visual es capaz de detectar una pequeña parte, dado que la retina humana sólo puede captar longitudes de onda comprendidas entre los 400 y 700 nm. Como fue demostrado por Isaac Newton (1642-1726) en la primera mitad del siglo XVIII, la mezcla de la totalidad de longitudes de onda emitidas por el sol dentro de este rango, corresponde al color que percibimos como blanco y cuando la luz posee sólo una determinada longitud de onda la vemos como uno de los colores del arco iris. Es interesante destacar que un color

de los que denominamos 'cálidos' como el rojo o el naranja, esta formado por radiaciones de longitud de onda larga y por tanto posee menor energía que colores que son considerados 'fríos' como el azul o el violeta (ver cuadro N° 1).



Gráfica N° 2



Curvas de sensibilidad espectral para (a) el observador CIE en condiciones fotópicas (b) el observador CIE en condiciones escotópicas (CIE, 1970, 1978)

Gráfica N° 1

Así cuando realizamos cualquier actividad que involucra la visión, lo que en realidad estamos percibiendo son longitudes de onda que llegan traducidas a nuestro cerebro, por lo que para realizar nuestras tareas cotidianas necesitamos que los objetos con los cuales interactuamos sean correctamente "iluminados", lo que en otras palabras significa que las longitudes de onda que estos emiten posean los niveles requeridos por nuestra vista para poder apreciarlos de manera adecuada. Esto nos lleva a un problema relacionado directamente con la diversidad de individuos, dado que cada persona es diferente a las demás y por lo tanto teóricamente requerirá otros niveles de luminosidad. Sin embargo es importante tener en cuenta el trabajo

realizado por los investigadores Fortuin y Weston⁸, según la cual "Los niveles luminosos para iguales condiciones de reflexión, tamaño y posición de una lectura con buena impresión (tamaño de los caracteres 3' y contraste del 95%) son los siguientes:

- Edad: 10 años; nivel luminoso requerido 175 lux
- Edad: 40 años; nivel luminoso requerido 500 lux
- Edad: 60 años; nivel luminoso requerido 2500 lux

En la gráfica N° 2 desarrollada por Szokolay se refuerza lo anterior al apreciar la disminución de la acomodación con el avance de la edad en las personas, dado que con el paso del tiempo, se da una pérdida de la adaptación y se deteriora la transparencia de la córnea.⁹ También existe una mengua en la capacidad de ver en ausencia parcial de luz, puesto que de acuerdo con lo mostrado en la gráfica N° 1, hay un desplazamiento negativo de la curva al pasar de condiciones fotópicas (presencia de luz) a condiciones escotópicas (ausencia de luz).

Por estos motivos se ha establecido un observador estándar a nivel internacional y ha sido la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) el organismo encargado de su administración., que en 1970 y 1978 respectivamente adoptó estas dos curvas de sensibilidad espectral relativa. Sin embargo, al momento de diseñar un sistema de iluminación, de acuerdo con el Manual de la Asociación Argentina de Luminotecnia¹⁰ existen tres aspectos a considerar para determinar la mejor solución (ver imagen N° 21), donde el desempeño humano contempla lo relativo a los usuarios, en todos sus aspectos, dado que es esencial considerar la tarea que se realiza, pues, como ya se ha dicho, para diversos trabajos se requieren diferentes niveles de iluminación, pero la especialización puede hacer incosteable un sistema, por lo que necesitamos recurrir a la estandarización según el estudio de todos estos factores para establecer los luxes requeridos en cada ambiente.



Imagen N° 21 Componentes para determinar la calidad de la iluminación

⁸ a la que hace referencia el Ingeniero Electricista Especialista en Higiene y Seguridad en el Trabajo, Gabriel A. de la Riva en la página de internet <http://www.arqcon.com.ar/pprof/ppilusalud.htm>

⁹ Szokolay, S. V. Environmental Science handbook for architects and builders, The construction press ltd. USA, 1980.

¹⁰ **Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional**, U.T.N. – Argentina. Manual de Iluminación Eficiente, en <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/>

El ingeniero Humberto García Flores del Instituto Tecnológico de Puebla nos entrega una larga lista con los valores de la Sociedad Mexicana de Ingenieros en Iluminación (SMII) y de la Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norte América (IESNA)¹¹ para actividades laborales. Como se puede apreciar existe una gama amplísima que va desde los 30 luxes en alumbrado de emergencia a 25000 luxes en una mesa de autopsia, por lo que no es posible ni práctico pretender abarcar un rango que involucre todos los niveles de iluminación y es aquí donde interviene el diseño arquitectónico y el conocimiento que se tenga del comportamiento de la *iluminación natural*, puesto que tampoco es viable lograr los niveles mas altos en el interior de los edificios dada la naturaleza y comportamiento de la luz, especialmente de manera prolongada y considerando además que estos niveles decrecen a medida que nos adentramos hacia el interior de los edificios, alejándonos de las fachadas.

En términos estrictos la luz se mueve en forma de ondas electromagnéticas, pero para fines prácticos podemos considerar que lo hace en línea recta que es la manera como se desplazan las ondas y dado que nuestro interés es la iluminación, a menos que sea de manera explícita, al referirnos a los rayos solares estaremos hablando de la parte del espectro comprendida ente 400 y 700 nm, es decir, la luz visible, que como sabemos no incluye la parte del calor.

En su recorrido, la luz se comporta de forma relativamente sencilla, dado que podemos aplicar a ella las leyes de la geometría. Es así que al incidir en una superficie de color blanco 100% puro, con un determinado ángulo, medido desde ésta, el haz será totalmente reflejado con la misma medida angular. En términos vectoriales el sentido de la componente perpendicular al plano cambiará, conservando la misma magnitud, mientras la componente paralela al plano se mantendrá imperturbable (ver imagen N° 22).

Sin embargo, las superficies muy rara vez son de color blanco 100% puro (existe una imposibilidad lógica de afirmar que es siempre así, dado que esto es posible solo en laboratorio y de ser factible en el exterior, por los aspectos ambientales como la contaminación, el polvo y otros, su vida sería muy corta), esto motiva que haya una disminución de *iluminancia* en la *reflexión*, que se conoce como refracción de la luz y no es

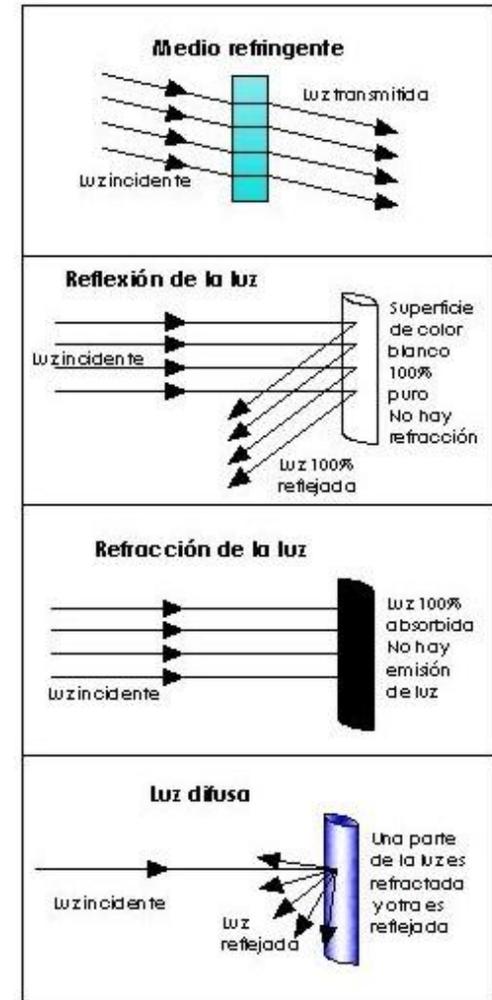


Imagen N° 22 Luz y superficies

¹¹ Ver artículo publicado en <http://www.simcli-iluminacion.com/>

otra cosa que la duplicidad del rayo luminoso, en una parte de absorción que el material ejerce sobre el flujo de fotones y otra de reflexión, la que en su máxima expresión correspondería a una superficie de color negro 100% mate, donde la reflexión sería nula y la refracción sería máxima. Entre los dos extremos, existe toda la gama que va de uno al otro, en la cual una parte será reflejada y la otra absorbida. Además existe la posibilidad en el caso de las superficies translúcidas, llamadas refringentes, de que una parte de la luz atraviese el cuerpo y continúe su camino, es el caso del agua, otros líquidos y un material a estas alturas imprescindible en la construcción, como es el vidrio. La única salvedad es que mientras la luz se desplaza por el interior del medio cambiará la dirección del rayo, pero al salir de este recuperará el ángulo de incidencia original, pero con un pequeño desplazamiento que depende de su composición. Esta última característica permite aplicar el comportamiento geométrico de la luz, sin considerar la variación al interior del material si este no tiene un espesor considerable. Además en el caso de los prismas, permite realizar la conducción de la luz a voluntad mediante la variación de los ángulos de los mismos.

2.1.4.- La percepción visual de los objetos

En un mundo donde la luz rige nuestra vida y considerando que la arquitectura, debe tener como fin último dar confort a sus usuarios, el estudio de la iluminación en la arquitectura debe estar intrínsecamente ligado a la percepción de los sujetos y a las actividades que se desarrollarán en los inmuebles, las que en su inmensa mayoría requieren del proceso visual para ser ejecutadas. Si a esto sumamos la creciente demanda y por ende el encarecimiento de los energéticos, estudiar el aprovechamiento al máximo de la *iluminación natural* se hace un imperativo de nuestro tiempo.

El mundo que nos hemos forjado, (o el que hemos permitido que se forje), es cada vez mas visual, las imágenes que desde las cavernas de Lascaux, han maravillado a la humanidad, son hoy por hoy, elementos fundamentales de la vida cotidiana, necesitamos ver, porque "una imagen dice mas que cien palabras", televisión, computadoras, revistas, la publicidad que ha explotado este recurso hasta la saciedad ya no nos permite circular un mínimo trecho por una calle citadina y aún en las áreas rurales, sin encontrar algún anuncio que de manera gráfica, nos incita con vehemencia a realizar lo que promueve.

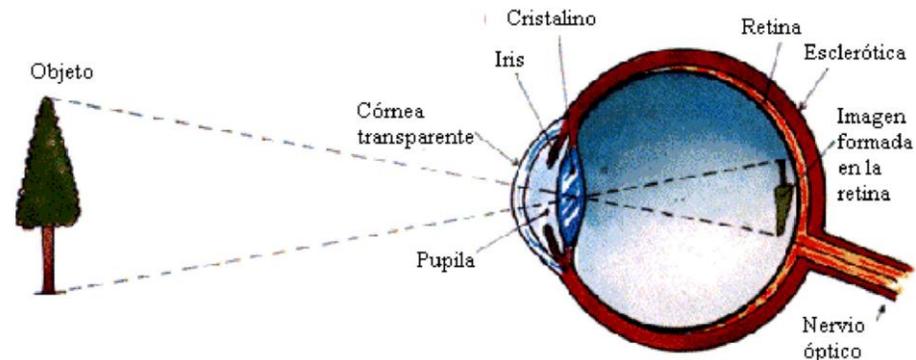


Imagen N° 23 Formación de imágenes en la retina

Pero el fenómeno de la visión puede ocurrir si y solo si, concurren dos elementos fundamentales, por un lado, nuestro aparato visual, integrado por el ojo, el cerebro y todas sus conexiones, por otro, la luz, si falta uno de los dos, no existe, en nuestros días al menos, la posibilidad de ver, dado que existen investigaciones en relación a la implantación de chips en pacientes que perdieron la visión para que puedan recuperarla, esto significa que en un futuro cercano la realidad virtual podría ser algo cotidiano y no se requeriría de la vista para apreciar imágenes. Aunque en disputa con lo anterior y de acuerdo a lo afirmado por el profesor de física teórica Arthur Zajonc, ganador del premio Fulbright en 1992, se podría agregar un tercer elemento al proceso visual y es el referido al aprendizaje, ya que según investigaciones llevadas a cabo con personas ciegas de nacimiento, a las que se les practicaron operaciones quirúrgicas para otorgarles visión, se descubrió que los pacientes debían aprender a ver superando muchas dificultades, a tal grado de provocarles crisis psicológicas, lo "que puede terminar en el rechazo de la vista...Algunos deciden que es mejor ser ciegos en su propio mundo que videntes en un mundo extraño"¹², así tal como aprendemos a caminar, también debemos aprender a entender lo que se proyecta en nuestra mente y que se traduce finalmente en la visión.

Pero ¿Qué es la luz?, ¿Por qué podemos ver?, ¿Cómo se forman los colores?, son todas preguntas que parecen sencillas, sin embargo, para responderlas a cabalidad es necesario adentrarnos en los fenómenos físicos que deben ocurrir para que la interacción de la luz, los objetos y nuestro sentido de la vista, logren producir en nuestro cerebro lo que denominamos imágenes.

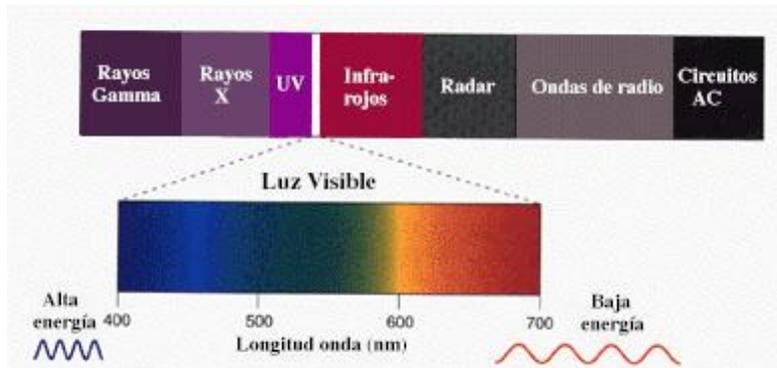


Imagen N° 24 Espectro visible

De manera técnica, podemos decir que para realizar el enfoque de un objeto nuestro sistema visual cuenta con el cristalino, que se aplana o se comba, en un proceso denominado acomodación, aunque a menudo el ojo es denominado el órgano de la visión, en realidad, el que efectúa el proceso es el cerebro; la función del ojo es traducir las ondas electromagnéticas de la luz en un determinado tipo de impulsos nerviosos que se transmiten al cerebro a través del nervio óptico.¹³

Sin embargo, esto no siempre fue visto así, durante mucho tiempo se creyó que la luz y la vista eran lo mismo, debido a una teoría denominada de los rayos táctiles, que se atribuye a Pitágoras según la cual "el ojo emite rayos rectos infinitamente tenues que al ser interrumpidos por los objetos producen la sensación de ver". Fue en los

¹² Atrapando la luz, historia de la luz y de la mente, Arthur Zajonc, Ed. Andrés Bello/Ensayos, Santiago, 1996 p.4

¹³ Essentials of anatomy & physiology. Rod Seeley y otros, Mc Graw Hill, Higher education, New York, 2005, p. 249

inicios del primer milenio cuando un científico árabe denominado Alhazán derrumbó aquella teoría, demostrando que eran cosas independientes, con experimentos que hoy nos pueden parecer obvios, como quemar un papel con una lupa o la caja de luz con un pequeño orificio que proyecta imágenes invertidas, desarrollando la teoría de la óptica geométrica que prevaleció por largo tiempo hasta que fue reemplazada por una nueva teoría denominada de la óptica ondulatoria, la que a su vez durante cerca de 200 años se mantuvo vigente hasta que fue sustituida cuando el físico escocés James Clerk Maxwell en 1865, descubrió que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas era la misma que la de la luz, concluyendo así que este fenómeno era "una perturbación electromagnética en forma de ondas" ¹⁴.

2.1.5.- Influencia de la luz natural en la vida cotidiana

Para realizar nuestra vida cotidiana, la luz es un elemento esencial, a tal grado que descansamos durante la noche y realizamos nuestras actividades en el día, esto que se denomina ciclo circadiano, ha sido comprendido de mejor forma a partir de las investigaciones del Dr. David Berson de la Universidad Brown, quien descubrió un tercer fotoreceptor en la retina y que explica la forma como la luz afecta la salud de los mamíferos dado que "influencia diferentes hormonas en el cerebro, donde la glándula pineal juega un importante rol en el control de la hormona del sueño (melatonina), que es provista al cuerpo a través de la sangre, cuando existen bajos niveles de iluminación u oscuridad. Al existir altos niveles de iluminación la hormona del estrés, cortisol es producida por la corteza adrenal que contribuye a estar despierto". ¹⁵

Existen innumerables investigaciones que avalan el uso de *iluminación natural*, ya que por sus cualidades, este tipo de luz favorece la productividad en las empresas y el rendimiento escolar, así como un mejor comportamiento y ánimo. Como ejemplo podemos mencionar los trabajos realizados por el Grupo Heschong Mahone Daylighting para la Comisión de Energía de California, que incluye un estudio sobre la afectación de la luz natural en las ventas de una cadena de tiendas de características similares, otro sobre la forma como se asocian las condiciones de confort físico en el salón de clases con el aprendizaje en escuelas primarias y un tercero de cómo las ventanas y las condiciones de confortabilidad física se relacionan con la productividad de los oficinistas ¹⁶.

En relación a las escuelas, este grupo ha realizado varios estudios, el primero en 1999 en tres estados; Seattle, Washington y Fort

¹⁴ Para atrapar un fotón, Virgilio Beltrán, FCE, 1995, p. VII las ondas electromagnéticas. Ver en <http://omega.ilce.edu.mx>.

¹⁵ The background luminance and colour temperatures influence on alertness and the mental health.g. Balkan Light 2008 the 4th Balkan Conference on Lighting T Govén, T. Laike, B. Pendse, K. Sjöberg 2008 (Traducción del autor)

¹⁶ **Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment**, Heschong Mahone Group, Inc. Lisa Heschong, Project Director Fair Oaks, California

Collins, Colorado donde se comprobó que en los resultados de los exámenes finales, los alumnos con mejor *iluminación natural* estuvieron de 7 a 18 % por encima de los que tenían menos luz solar y donde fue posible estudiar los resultados de otoño y primavera, se encontró que los primeros progresaban 20% más rápido en matemáticas y 26 % en escritura que el segundo grupo.

En el año 2001 se realizó otro estudio en el distrito de San Juan Capistrano, donde se investigó la relación de la *iluminación natural* con los buenos maestros, que no arrojó diferencias, sin embargo, se identificó una tendencia en las tasas de aprendizaje, 21% mayor en los alumnos que recibían más luz diurna que aquellos con menos.

El tercer estudio realizado en 450 salones de clase comprendió un total de 8000 alumnos de educación primaria, que se encontraban cursando de 3^{er} a 6^o grado en el Distrito Escolar Unificado de Fresno en el Valle Central de California, si bien el estudio no arrojó conclusiones tajantes, mostró que el entorno visual es extremadamente importante para el aprendizaje, por lo que tener acceso a un gran ventanal por donde se puede ver vegetación o actividad humana en la distancia produce mejores resultados educativos. Sin embargo se determinó que colocar interruptores dentro de los salones de clase produce un ahorro potencial de energía por iluminación de 62%, si estos son de escalera de 74% y con los dimmers se incrementa a 84%.

En el caso de la cadena de tiendas, la motivación para el uso de luz diurna fue la reducción en el gasto por energía, mediante el uso de fotosensores que interrumpen el flujo eléctrico cuando se detecta un nivel de *iluminación natural* adecuado, que fue satisfactoriamente probado con una reducción de 24 centavos de dólar por pie cuadrado con un ahorro potencial de 66 centavos de dólar por pie cuadrado, pero la aplicación de este tipo de iluminación produjo un incremento en las ventas 19 veces mayor a la reducción en el gasto eléctrico, en una estimación conservadora y siendo optimistas entre 45% y 100%. Además durante la crisis de energía sufrida en California en el año 2001, cuando la mayoría de los negocios operaban con la mitad de la luz artificial, las tiendas iluminadas por medios naturales experimentaron un incremento en sus ventas en promedio de 5.5%, respecto de los otros, aún cuando todos incrementaron sus ventas en comparación con el periodo anterior. Por su parte los empleados de las tiendas entrevistados mostraron satisfacción con las condiciones de iluminación más uniforme tanto horizontal como verticalmente.

En otro estudio se determinó que los trabajadores de una central telefónica con una gran vista al exterior, procesaban las llamadas de 6 a 12 % más rápido que aquellos sin comunicación visual hacia fuera, aún si estos contaban con mucha vegetación. Además al resolver un test, los primeros aparecían mejor calificados entre 10 y 25 % en funciones mentales y memoria, que los del segundo grupo, los que a su vez reportaban mayores problemas de salud y fatiga que aquellos con mejores posibilidades de vistas al exterior. También se encontró que el deslumbramiento producía efectos negativos en tres de cinco funciones mentales evaluadas, las que se reducían de 15 a 21 % en relación a condiciones similares sin molestias visuales.

Si bien, pensar en prescindir de la luz eléctrica sería una gran aberración, descartar la luz natural como se hace habitualmente en la mayoría de la arquitectura actual también lo es, pero la parte buena del encarecimiento de los energéticos es que invariablemente resulta más económico iluminar por medios naturales y esto contribuye a mejorar las condiciones de vida, con el consecuente beneficio a nuestro ambiente.

El sol siempre estará ahí, si aceptamos lo que nos regala es nuestra decisión pero como nos dice Ignacio Castillo "El apagón que se produjo en New York el 14 de agosto de 2003 nos demostró que una ciudad no existe sin luz eléctrica. La ciudad es una gran máquina que funciona, que vive, gracias a la energía eléctrica. Aquella noche reinó la sombra, el hombre perdió la comunicación con la ciudad máquina, no pudo regresar a su apartamento, no pudo comer ni dormirse en el hipnótico discurso de la lámpara televisiva, se quedó atrapado en un ascensor o se encontró caminando a ciegas por una ciudad muerta, descontrolada. En ella el animal de la ciudad transgredió todas las leyes de la sociedad de la luz. Al amanecer el sol salió como cada día."¹⁷

2.1.6 - Iluminación natural y artificial

Diversos autores han demostrado que los objetos se sienten mucho menos brillantes con la luz de una fuente con una pequeña variación en su distribución (como una pantalla de ventana), que de una fuente luminosa con una distribución uniforme¹⁸, lo que puede ser atribuido a la forma como están acostumbrados nuestro ojos a ver en el exterior la mayor parte del tiempo, donde la luz evidentemente no es uniforme, (al respecto cabe mencionar el trabajo realizado por la maestra Ana Aranda Molina titulado "Diseño de sistemas de iluminación Biológico-dinámica en áreas de oficinas en México" desarrollado en 2009 para su tesis de maestría en el Posgrado de la Facultad de Arquitectura de la UNAM), especialmente si consideramos que normalmente las jornadas laborales se prolongan más allá del crepúsculo.

Todo lo anterior nos lleva a pensar en cómo lograr al interior de un local, niveles de iluminación relativamente

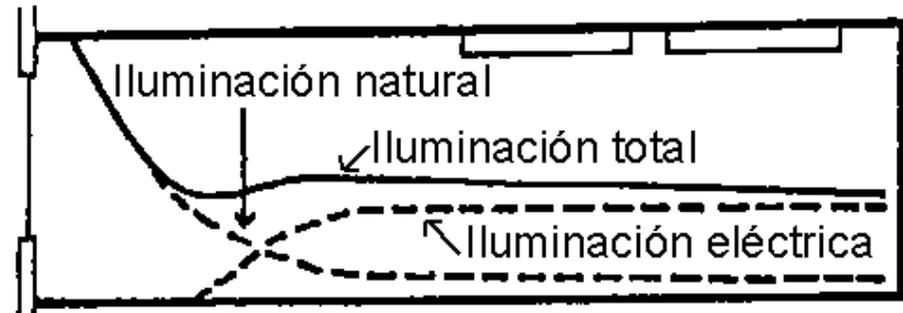


Imagen N° 25 Combinación de luz natural y eléctrica. Psali

¹⁷ El sentido de la luz...Op. Cit. P. 118

¹⁸ Effects on discomfort glare of contrast between luminance of sky and that of ground, Etsuko Mochizuki, Toshie Iwata, Daisuke Itoh. Balkan Light 2008 the 4th Balkan Conference on Lighting.

agradables, sabiendo que en términos prácticos, la luz difusa penetra en un espacio arquitectónico una distancia aproximada a dos y media veces la altura de la ventana¹⁹, en el atardecer y en especial en cuartos profundos o muy profundos, será necesario apoyarse en sistemas de iluminación artificial, pero si se quiere conseguir un rendimiento óptimo se puede utilizar los sistemas denominados PSALI²⁰ (Permanent Supplementary Artificial Lighting Interiors), por sus siglas en inglés, en los que por medio de sensores de luz se encienden las lámparas donde se percibe que los niveles de iluminación están por debajo de los requerimientos pero regulando la intensidad por medio de mecanismos llamados “dimers”, para compensar sólo la parte que falta para llegar al nivel de luz estipulado según la necesidad. Con estos sistemas se puede lograr un importante ahorro de energía al evitar iluminar artificialmente aquellos lugares que no lo necesitan, con el beneficio que esto significa para las personas, que no necesitan realizar esfuerzos visuales adicionales. Si además se permite cierta manipulación por parte de los usuarios por medios manuales se obtiene un sistema óptimo, que en términos laborales puede significar un aumento en la productividad²¹, dado que las lámparas utilizadas procuran igualar la luz natural mediante lo que se denomina temperatura corregida de color, utilizando tubos fluorescentes en un rango de 4000 a 6500 K y en el presente las investigaciones están enfocadas al uso de leds (light emitting diodes).

Para una mayor eficiencia del sistema se debe considerar la distribución de lámparas y su agrupación en bloques de encendido, ya sea que el sistema eléctrico funcione de manera automatizada o manual, debe tener la versatilidad suficiente para iluminar sólo aquellos lugares que por condiciones ambientales u horarias requieran más luz., esto evidentemente implica un estudio acucioso para evitar gasto innecesario de energía eléctrica y aunque sin lugar a dudas será más costoso que uno tradicional al momento de su implementación por contar con mayor número de interruptores y cables, además de los reguladores de intensidad y los fotosensores, la reducción en el consumo eléctrico producto de la optimización lumínica a lo largo de la vida útil de la obra, hace que esta sea una estrategia rentable a largo plazo. Si bien es necesario apuntar que el subsidio que se da a la electricidad en México no ayuda al desarrollo de esta tecnología, el elevado costo de los energéticos presionará para que estas distorsiones de la economía desaparezcan.

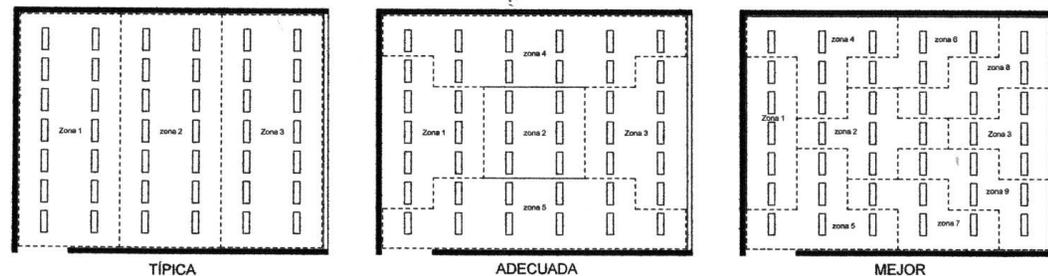


Imagen N° 26 Esquemas de encendido de luz eléctrica, Psali

¹⁹ Daylighting performance and design, Ander, Gregg D., Ed. John Wiley & sons, USA, 2003

²⁰ Lighting and applied vision section, M. J. Perry, Lighting Research and Technology, Vol. 22, No. 3, 159-160 (1990)

²¹ **Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment**, Heschong Mahone Group, Inc. Lisa Heschong, Project Director Fair Oaks, California

Un problema esencial que afortunadamente está siendo superado, es el de las lámparas llamadas “ahorradoras” que hasta hace poco tiempo atrás no eran compatibles con los sistemas reguladores de intensidad, por lo que diversas empresas se han preocupado de lanzar al mercado productos de luz fría que permitan el ajuste gradual del nivel lumínico.

En la imagen N° 26 podemos observar tres esquemas de distribución de la iluminación eléctrica, en los que se pone énfasis en la separación del encendido de lámparas, agrupándolas por zonas, considerándose que la mejor solución es aquella donde hay mayor versatilidad, es decir, el sistema permite iluminar las diferentes áreas de manera independiente, lo que se puede realizar de forma manual o automatizada.

Un sistema alternativo al uso de dimmers es el que controla el encendido de lámparas dentro de un mismo gabinete de manera separada, así la luminaria puede constar de tres lámparas que pueden ser encendidas de manera independiente, permitiendo el uso de una, dos o las tres dependiendo de la necesidad, lo que se puede realizar de forma manual, automatizada o la combinación de ambas.²²

2.2 - Luz natural y legislación

En México la legislación destinada a proveer *iluminación natural* a los inmuebles es bastante escasa y se limita a aspectos de orden general, sin tener claridad de la función que cumplen las ventanas. Así el **Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal** solo contiene dos alusiones al tema, que en el Capítulo III, denominado “De la higiene, servicios y acondicionamiento ambiental” dice en su Artículo 87, “La *iluminación natural* y la artificial para todas las edificaciones deben cumplir con lo dispuesto en las Normas y/o Normas Oficiales Mexicanas.” Y en el Capítulo V, “De la integración al contexto e imagen urbana” menciona en el Artículo 123 que “Las fachadas de colindancia de las edificaciones de cinco niveles o más que formen parte de los paramentos de patios de iluminación y ventilación de edificaciones vecinas deben tener acabados de color claro.”

Por su parte las **Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico** ahondan levemente en el tema, dedicando un apartado a la iluminación, pero no de manera específica, sino que la tratan de manera general junto con la ventilación y en el punto 3.4.1 generalidades, nos dice “Los locales habitables y complementarios deben tener iluminación diurna natural por medio de ventanas que den directamente a la vía pública, azoteas, superficies descubiertas o patios que satisfagan lo establecido en el inciso 3.4.2.2” y más adelante se señala; se “permite que los locales habitables y los complementarios tengan iluminación y ventilación artificial de conformidad a los puntos 3.4.3 y 3.4.4 de estas Normas, excepto las recámaras, salas, comedores”, y menciona una serie de espacios

²² Lighting modern buildings, Derek Phillips, Architectural Press, 2000, p. 89

que no pueden ser iluminados artificialmente entre los que no figuran las oficinas, es decir, la legislación permite que espacios laborales que involucran a un número muy importante de trabajadores en la Ciudad de México no reciban luz solar.

El punto 3.4.2 dedicado a la Iluminación y ventilación naturales es dividido en dos dedicando una parte a las ventanas y otra a los patios de iluminación, de esta forma la parte dedicada a las fenestras comienza mencionando las siguientes reglas para su dimensionamiento:

“I. El área de las ventanas para iluminación no será inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones a excepción de los locales complementarios donde este porcentaje no será inferior al 15%”. Dado que se marcan porcentajes mínimos, se puede argüir que un constructor puede aumentar estos tamaños, pero entendiendo que las normas son para dar habitabilidad a los espacios arquitectónicos, no se puede dejar un aspecto tan importante a la buena voluntad de las personas, por lo que podemos decir que no se

consideran aquí la forma, ni en planta ni en alzado de la obra, ni tampoco la posición de la ventana y menos aún la orientación, todos estos, factores que alteran el ingreso de luz natural.

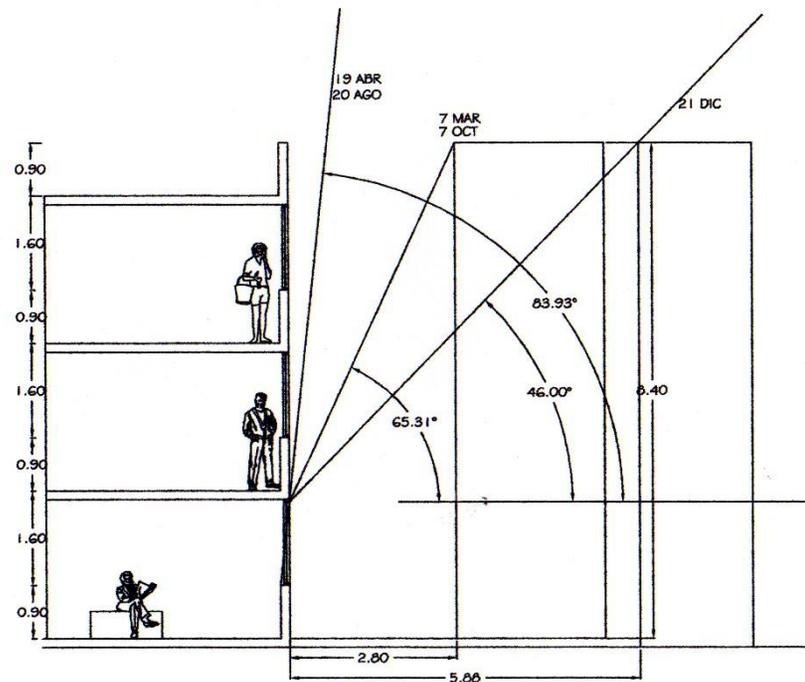


Imagen N° 27 Patio de luz

En el inciso III se dice lo siguiente: “Los locales cuyas ventanas estén ubicadas bajo marquesinas, techumbres, balcones, pórticos o volados, se considerarán iluminadas y ventiladas naturalmente cuando dichas ventanas se encuentren remetidas como máximo lo equivalente a la altura de piso a techo del local”, es decir podemos construir de manera absolutamente apegados a la norma, ventanas que jamás recibirán el rayo solar o que en el mejor de los casos lo captarán muy pocos minutos durante el día. Esto que térmicamente hablando puede ser benéfico en zonas cálidas, pasa a ser una fatalidad en lugares donde existen largas e intensas épocas de frío, como por ejemplo, las partes altas de la Ciudad de México, donde en ocasiones se han producido nevadas, pero en términos de luz, el perjuicio se produce en todo el orbe, condenando a quienes habitarán semejantes espacios a la oscuridad o la luz eléctrica de manera permanente.

En el inciso V dice “No se permite la iluminación y ventilación a través de fachadas de colindancia, el uso de bloques prismáticos

no se considera para efectos de *iluminación natural*”, esto nos parece positivo puesto que elimina la posibilidad de perder la luz que se podría conseguir a través de una colindancia en la que se edificara un edificio vecino y obliga a adoptar soluciones acordes con el terreno propio, además impide que se techen los patios de luz con bloques de vidrio pues reducen ostensiblemente el ingreso de luz natural.

En el inciso 3.4.2.2 destinado a patios de iluminación y ventilación natural se establece la forma para estos, que debe ser cuadrada o rectangular, mientras que cualquier otra debe considerar un área equivalente, teniendo como mínimo un lado de 2.50 m o 1/3 de la altura del paramento medida perpendicularmente al plano de la ventana sin considerar remetimientos, para los locales habitables. Si consideramos las dimensiones mínimas para uno de estos patios, podríamos hablar de un edificio de tres niveles, con entresijos de 2.50 m, más un pretil de 0.90 m, obtenemos 8.4 m de altura total, por lo que de acuerdo con el Reglamento de Construcciones necesitamos un ancho igual a 2.80 m para el patio. Si cada nivel cuenta con una ventana ubicada a 0.90 m del nivel de piso terminado, orientada exactamente hacia el sur, que sería la posición más favorable, podemos ver en la imagen N° 27 que el ángulo vertical de sombra que permite la entrada de luz solar es de 65.31°, lo que ocurre desde el 7 de marzo

al 19 de abril y del 20 de agosto al 7 de octubre, es decir, la planta baja durante todo el invierno nunca recibirá el más mínimo rayo de sol y en dicho periodo sólo podrá recibir luz difusa y reflejada por los paramentos del patio al igual que en la temporada del 20 de abril al 19 de agosto. Evidentemente sería necesario estudiar en un caso práctico la recepción de *iluminación natural*, pero podemos afirmar sin temor a equivocarnos, que el cubo referido acorde con la normatividad vigente, no cumplirá con su cometido lumínico la mayor parte del tiempo.

Oficinas privadas y públicas	Cuando sea preciso apreciar detalles	100 luxes
	Cuando sea preciso apreciar detalles :	
	Toscos o burdos	200 luxes
	Medianos	300 luxes
	Muy finos	500 luxes

Cuadro N° 2 Requisitos mínimos de iluminación en el Distrito Federal, México¹

Por si lo anterior fuera poco, en el punto IV se permite la reducción hasta de una quinta parte en la dimensión mínima del patio, en cualquier orientación, aún cuando se argumenta que esto se puede hacer “siempre y cuando la dimensión ortogonal tenga por lo menos una quinta parte más de la dimensión mínima correspondiente”, en la práctica significa reducir en mayor medida aún la posibilidad de asoleamiento.

Sin embargo, si apreciamos los valores mínimos de iluminación que exigen las Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico (cuadro N° 2), podemos entender por qué casi no se consideran los niveles de luz que puedan proveerse de manera

natural a los espacios habitables, ya que según los legisladores para apreciar detalles muy finos basta con 500 luxes, mientras para el Comité Europeo Normalizador a partir de 1000 luxes es el mínimo para tareas como el grabado o inspección de tejidos.

Y como si de eliminar totalmente el ingreso de luz natural se tratara, en el punto VII se permite que los patios estén techados por domos, cubiertas transparentes o traslúcidas con una transmisibilidad mínima del 85% del espectro solar, que de por sí lo reducirá en este porcentaje, pero dado que en la Ciudad de México existen graves problemas de contaminación por partículas, en la práctica, la reducción será mucho mayor a lo largo del tiempo.

La Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, denominada “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales”, no contempla la *iluminación natural* como un elemento que permite favorecer la eficiencia energética y sin mencionar que estudio es el que avala lo que afirma, en la introducción señala que: “En México, el mayor consumo de energía en las edificaciones es por concepto de acondicionamiento de aire, durante las épocas de mayor calor, principalmente en las zonas norte y costera del país, La ganancia por radiación solar es la fuente más importante a controlar”, más adelante puntualiza, “...esta

TAREA VISUAL DEL PUESTO DE TRABAJO	ÁREA DE TRABAJO	NIVELES MÍNIMOS DE ILUMINACIÓN (LUX)
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Áreas generales exteriores: patios y estacionamientos.	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Áreas generales interiores: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, labores en minas subterráneas, iluminación de emergencia.	50
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Áreas de servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailería.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble e inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipo de laboratorio.	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500
Distinción fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies, y laboratorios de control de calidad.	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas y acabado con pulidos finos.	Áreas de proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados con pulido fino.	1,000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Áreas de proceso de gran exactitud.	2,000

Fuente NOM-025-STPS-1999

Cuadro N° 3 Requisitos mínimos de iluminación en centros de trabajo STPS



Cada tipo de actividad descrita abarca tres valores LUX

- Iluminación general en zonas de poco tráfico o de requisitos visuales sencillos
- Iluminación general para trabajo en interiores
- Iluminación adicional para tareas visuales exigentes

Cuadro N° 4 Iluminación recomendada (CENTC 169).

Norma optimiza el diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envolvente...”. Pero no habla del incremento del gasto energético que se produce por utilizar la iluminación artificial en horario diurno (que además ayudará a incrementar en mayor o menor medida según el tipo de lámparas la carga térmica), cuando en la Ciudad de México se tiene en el exterior cantidades superiores a 40000 luxes, un mínimo de 6 horas diarias durante todo el año.

Si bien la **Norma Oficial Mexicana NOM – 025 - STPS-1999** denominada “**Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.**” establece niveles de iluminación mínimos, (ver cuadro N° 3), cabe destacar que estos valores difieren considerablemente de los estándares internacionales, situándose muy por debajo de las exigencias de la CIE, mientras el Comité Europeo Normalizador (CENTC 169) establece los niveles que podemos apreciar en el cuadro N° 4, e indica de 500 a 1000 luxes para el trabajo de oficina. En tanto, el Reino Unido que a pesar de pertenecer a la Unión Europea, no se rige por ésta, solo tiene un estatuto que no marca niveles cuantificables mencionando que un puesto de trabajo debe poseer “iluminación adecuada y suficiente” y la *iluminación natural*, debería penetrar tan profundo como sea posible.²³ Sin embargo, no podemos descartar que existan otras regulaciones dado el avance en la materia en este país.

En lo que a las leyes españolas se refiere, éstas se norman por decreto real y para la optimización de la iluminación en edificaciones se aprobó el Documento Básico HE²⁴ para el ahorro de energía que en la “Exigencia básica HE 3: Eficiencia energética de las instalaciones de

²³ Statutory Instrument 1992 No.3004 **The Workplace (Health, Safety and Welfare) Regulations 1992 Lighting**, <http://search.opsi.gov.uk>. Trad. del autor

²⁴ Documento Básico HE, Ahorro de energía, Texto modificado por RD 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores (BOE 25/01/2008), ver <http://www.boe.es>

iluminación”, plantea: “Los *edificios* dispondrán de instalaciones de iluminación adecuadas a las necesidades de sus *usuarios* y a la vez eficaces energéticamente disponiendo de un sistema de control que permita ajustar el encendido a la ocupación real de la zona, así como de un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural, en las zonas que reúnan unas determinadas condiciones.”

En el apartado denominado Generalidades, establece el ámbito de aplicación, mencionando que:
 “Esta sección es de aplicación a las instalaciones de iluminación interior en:

- 1) edificios de nueva construcción;
- 2) rehabilitación de edificios existentes con una superficie útil superior a 1000 m², donde se renueve más del 25% de la superficie iluminada.
- 3) reformas de locales comerciales y de edificios de uso administrativo en los que se renueve la instalación de iluminación.”

Por su parte la Sección HE 3 sobre Eficiencia Energética de las Instalaciones de iluminación contempla la luz natural de forma muy somera, en el apartado “2.2 Sistemas de control y regulación” establece que:

Las instalaciones de iluminación dispondrán, para cada zona, de un sistema de regulación y control con las siguientes condiciones:

- a) toda zona dispondrá al menos de un sistema de encendido y apagado manual, cuando no disponga de otro sistema de control, no aceptándose los sistemas de encendido y apagado en cuadros eléctricos como único sistema de control. Las zonas de uso esporádico

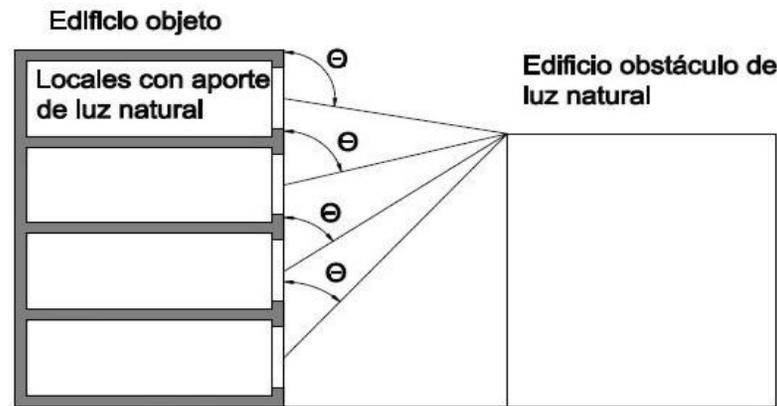


Imagen N° 28

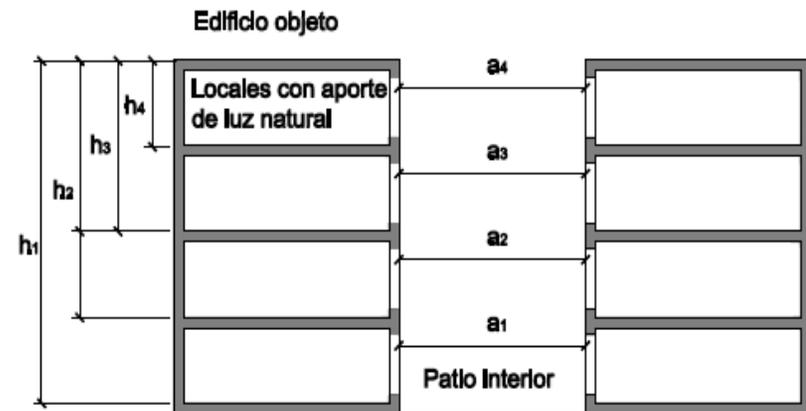


Imagen N° 29

dispondrán de un control de encendido y apagado por sistema de detección de presencia o sistema de temporización;

b) se instalarán sistemas de aprovechamiento de la luz natural, que regulen el nivel de iluminación en función del aporte de luz natural, en la primera línea paralela de luminarias situadas a una distancia inferior a 3 metros de la ventana, y en todas las situadas bajo un lucernario, en los siguientes casos;

i) en las zonas de los grupos 1 y 2 que cuenten con cerramientos acristalados al exterior, cuando éstas cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:

- que el ángulo θ sea superior a 65° ($\theta > 65^\circ$), siendo θ el ángulo desde el punto medio del acristalamiento hasta la cota máxima del edificio obstáculo, medido en grados sexagesimales;
- que se cumpla la expresión: $T(A_w/A) > 0,11$ siendo:
T: coeficiente de transmisión luminosa del vidrio de la ventana del local en tanto por uno.
A_w: área de acristalamiento de la ventana de la zona [m²].
A: área total de las fachadas de la zona, con ventanas al exterior o al patio interior o al atrio [m²].

ii) en todas las zonas de los grupos 1 y 2 que cuenten con cerramientos acristalados a patios o atrios, cuando éstas cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:

- en el caso de patios no cubiertos cuando éstos tengan una anchura (a_i) superior a 2 veces la distancia (h_i), siendo h_i la distancia entre el suelo de la planta donde se encuentre la zona en estudio, y la cubierta del edificio;

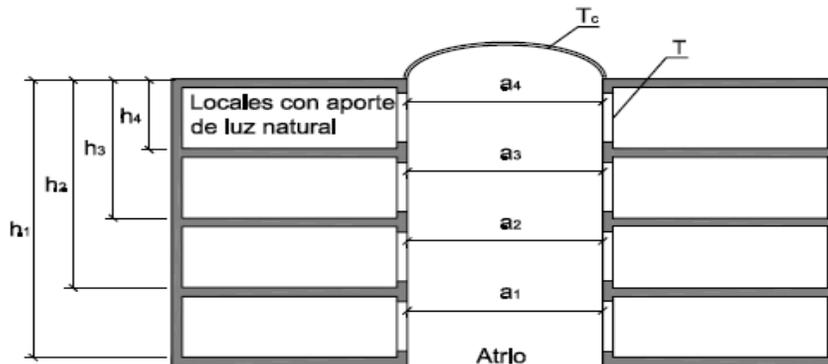


Imagen N° 30

En el caso de patios cubiertos por acristalamientos cuando su anchura (a_i) sea superior a $2/T_c$ veces la distancia (h_i), siendo h_i la distancia entre la planta donde se encuentre el local en estudio y la cubierta del edificio, y siendo T_c el coeficiente de transmisión luminosa del vidrio de cerramiento del patio, expresado en %. que se cumpla la expresión $T(A_w/A) > 0,11$ siendo:

T: coeficiente de transmisión luminosa del vidrio de la ventana del local en tanto por uno.
A_w: área de acristalamiento de la ventana de la zona (m²).
A: área total de las fachadas de la zona, con ventanas al exterior o al patio interior o al atrio (m²).

En otros países de Iberoamérica existen legislaciones muy dispares, algunas como la chilena que se rige por la Ley General de Urbanismo y Construcciones que en su artículo 105, señala que el diseño de las obras de urbanización y edificación debe cumplir con los estándares que establece la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones en lo relativo a condiciones de salubridad, iluminación y ventilación, en el Título IV Capítulo I “de las condiciones de habitabilidad” señala en su artículo 4.1.2. “Los locales habitables deberán tener, al menos, una ventana que permita la entrada de aire y luz del exterior, con una distancia mínima libre horizontal de 1,5 m medida en forma perpendicular a la ventana cuando se trate de dormitorios” y en el Capítulo 5, Artículo 4.5.5 menciona que “Con el objeto de asegurar a los alumnos adecuados niveles de iluminación y ventilación natural, los recintos docentes correspondientes a salas de actividades, de clases, talleres y laboratorios, como asimismo el recinto destinado a estar-comedor-estudio y los dormitorios en hogares estudiantiles, deberán consultar vanos cuyas superficies mínimas corresponderán al porcentaje de la superficie interior del respectivo recinto que se indica en la ... tabla (1)” y a continuación señala “En los locales de Educación Superior y de Adultos se autorizará, como complemento, el uso de sistemas mecánicos de ventilación e iluminación artificial, cuando los niveles mínimos establecidos no se logren con ventilación e *iluminación natural*. En los recintos docentes, el estándar de iluminación deberá provenir de ventanas ubicadas en las paredes y se podrá complementar con iluminación cenital.

‡ SUPERFICIE DEL RECINTO

Regiones	ILUMINACION		VENTILACION	
	Recintos Docentes	Recintos Hogar Estudiantil	Recintos Docentes	Recintos Hogar Estudiantil
I a IV y XV	14	6	8	6
V a VII y RM	17	7	8	6
VIII a XII y XIV	20	8	8	6

Cuadro N° 5 Requisitos mínimos de iluminación y ventilación en Chile

Si analizamos el cuadro N° 5 tenemos que para las regiones I a IV y XV, correspondientes a latitudes entre 18° y 32° sur se exige un 14% de área de ventana en relación al área del recinto para actividades docentes, mientras para hogares estudiantiles se considera suficiente 6%, de 32° a 36° (regiones V a VII y RM), el porcentaje aumenta a 17 y 7% y a partir de los 36° de latitud, en la que se encuentran las regiones XII y XIV, se incrementa a 20 y 8%, si bien el aumento progresivo está justificado, por la menor incidencia solar al aumentar la latitud, en ningún caso se considera la orientación de la ventana, al igual que en el caso de la Ciudad de México, lo cual revela un desconocimiento o apatía absolutos de las formas como se modifica la luz solar con estas variables. Por otra parte, permitir que en aulas para adultos se complemente con medios mecánicos, abre la puerta para todo tipo de soluciones de pésima calidad, pues se podría diseñar con 1% de luz natural y 99% de luz artificial, aduciendo que el complemento es mayor, puesto que no fue posible lograr mayores niveles con la fuente natural, dado que al no existir una norma clara, se deja la responsabilidad al criterio del constructor,

el que muchas veces está dominado por aspectos económicos, mas que de ética. Respecto de los hogares estudiantiles, es claro que no se resuelve con los porcentajes asignados para cada región los problemas de iluminación, si bien en la región más cercana al Ecuador se pueda disminuir la ganancia de calor.

No obstante lo anterior, es preciso mencionar que en la normatividad chilena existe un concepto denominado “rasante”, que tiene la función de regular la penetración solar, puesto que corresponde a un ángulo que va de 60° a 80° respecto de la horizontal, dependiendo de la zona del país, que es trazado desde la colindancia o el centro de la línea de la(s) calle(s) que enfrenta la construcción, obligando a realizar remetimientos en los pisos superiores acorde con el trazo mencionado, con lo que se evita que un edificio limite el asoleamiento a los que quedan en la acera opuesta.

En cuanto a la República Argentina existe una normatividad bastante más elaborada, lo que queda patente si analizamos el “Código de Edificación de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires”, que revela un avance importante en los estudios sobre la materia. De esta forma podemos ver que en el punto denominado Iluminación y ventilación natural de locales nos comenta en el apartado de Generalidades;

a) El dintel de los vanos para la iluminación y la ventilación se colocará a no menos que 2,00 m del solado del local. El vano puede situarse junto al cielo raso;

Ubicación del vano	Vano que da a Espacio Urbano
Lateral, bajo parte cubierta	12
Lateral, libre de parte cubierta	15

Cuadro N° 6

de locales para los que establece la siguiente diferenciación:

a) Locales de primera clase: Dormitorio, comedor, sala, sala común (living room), biblioteca, estudio, consultorio, escritorio, oficina y todo otro local habitable no clasificado de otro modo en este Código.

b) Locales de segunda clase: Cocina; cuarto de baño; retrete; orinal; lavadero; guardarropa o vestuario colectivo; cuarto de costura; cuarto de planchar; local de descanso para personas con discapacidad o con circunstancias discapacitantes, como complemento de servicio de salubridad público de uso determinado.

c) Locales de tercera clase: Local para comercio y/o trabajo, depósito comercial y/o industrial, vestuario colectivo en club y/o asociación, gimnasios y demás locales usados para practicar deporte, cocina de hotel, restaurante, casa de comida, comedor colectivo y similares;

b) Sólo se computa la superficie de ventilación situada en la mitad superior de los vanos, salvo el caso de vanos junto al cielo raso que son los ubicados dentro del tercio superior de la altura del local;

c) Las salientes que cubran los vanos de iluminación y ventilación tendrán las limitaciones establecidas en "Iluminación y ventilación natural de locales a través de partes cubiertas".

Posteriormente establece una categorización de la iluminación que si bien trata a la par de la ventilación la separa de esta, de acuerdo con los tipos

- d) Locales de cuarta clase: Pasaje, corredor, vestíbulo, salita de espera anexa a oficina o consultorio, guardarropa, cuarto de roperos y/o vestir anexo a dormitorio, tocador, despensa, antecomedor, espacio para cocinar, depósito no comercial ni industrial, depósito de no más de 250 m² de área anexo o dependiente de local siempre que forme con este una sola unidad de uso y no tenga acceso directo desde la vía pública; pequeño comercio sin acceso de público a su interior; sala de cirugía, sala de rayos X; sala de micrófonos para grabación de discos o cintas magnéticas, laboratorio para procesos fotográficos;
- e) Locales de quinta clase: Locales auxiliares para servicios generales del edificio, como ser: portería, administración, cuarto de máquinas, dependencias del personal de servicio, salas comunes de juegos infantiles. Estos locales tendrán medios de salida entre pasajes y corredores generales o públicos y no directos sobre la vía pública.

De esta forma el código nos entrega los lineamientos para los locales de primera clase

- a) Un local de primera clase recibirá luz del día y ventilación del Espacio Urbano;
 b) Vanos:

1) Iluminación: El área mínima de los vanos de iluminación será:

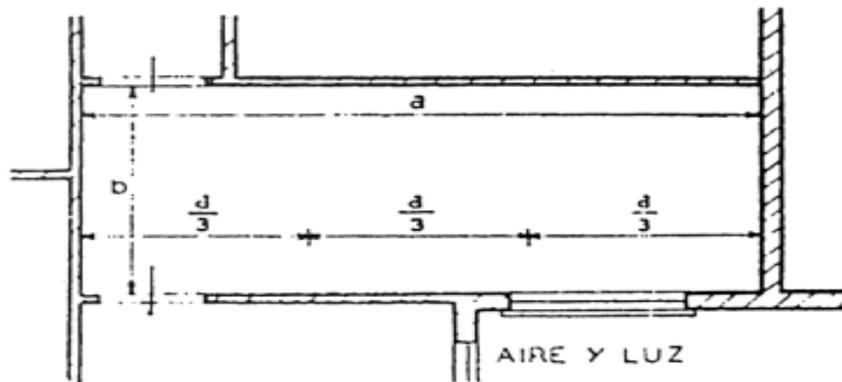
donde i = área mínima del total de los vanos de iluminación;

A = área libre de la planta del local;

X = valor dependiente de la ubicación del vano, según lo expresado en la imagen N° 31:

$$i = \frac{A}{X}$$

$$i = \frac{A}{x} (r - 1) \quad \text{donde: } r = \frac{a}{b}$$



F. 4.6.4.2 b)

Imagen N° 31

Cuando el largo A de la planta de un local rectangular sea mayor que 2 veces el ancho b (ver figura) y además el vano se ubique en el lado menor, o próximo a éste, dentro del tercio lateral del lado mayor, se aplica la fórmula.

Cuando la planta del local no sea rectangular se aplica el mismo criterio por analogía;

3) Iluminación en Vivienda Permanente: $i = 0,2$ de superficie piso local

Para los locales de segunda clase y escaleras principales se fijan los siguientes procedimientos en relación a la Iluminación:

- a) Un local de segunda clase y una escalera principal puede recibir luz del día y ventilación por vano o claraboya (domo) que dé por lo menos a patio auxiliar;

b) Vanos: el área mínima de los vanos de iluminación y ventilación de los locales de segunda clase y de una escalera principal se proyectará con la misma exigencia que para los de primera clase, con las limitaciones que siguen:

1) Cocinas y lavaderos:

Iluminación $i = 0,50 \text{ m}^2$

2) Numeral dedicado a ventilación

3) Cocina, baño, retrete y lavadero-secadero en vivienda permanente:

Iluminación $i = 0,2$ superficie piso local

4) Escaleras principales:

I. El área de iluminación lateral en cada piso será $1/8$ de la planta de la caja; de esta área por lo menos $1/3$ será para la ventilación y con mecanismos de abrir regulables de fácil acceso y que disten como mínimo $10,00 \text{ m}$ al frente de muros circunvecinos;

II. Cuando una caja de escalera principal reciba luz del día y ventilación mediante claraboya, el área de iluminación cenital se mide por la abertura de la azotea y será no menor que $0,75 \text{ m}^2$ por cada piso, excluido el del arranque, con un mínimo de $1/8$ del área de la planta de la caja. En este caso no se permite colocar ascensor u otra instalación en el ojo de la escalera, el que tendrá un lado mínimo igual al ancho de la escalera y un área no menor que la requerida para la iluminación cenital. Puede reducirse al lado menor del ojo de la escalera hasta un 25% , siempre que el otro lado se aumente de modo que el área no sea inferior al cuadrado del ancho de la escalera. Las barandillas permitirán el paso de la luz. Para la ventilación habrá por lo menos $1/3$ del área exigida de iluminación; los vanos de ventilación distarán como mínimo $1,00 \text{ m}$ de muros circunvecinos.

III. Cuando una vivienda colectiva o casa de escritorios u oficinas tenga ascensor que sirva a todos los pisos, la escalera principal, los pasillos y/o vestíbulos generales o públicos a ella conectados, pueden carecer de la iluminación y ventilación prescriptas en los

Respecto de la Iluminación de locales de tercera clase nos expresa lo siguiente:

a) Un local de tercera clase recibirá luz del día y ventilación del espacio urbano.

Las áreas de los vanos para la iluminación y la ventilación, laterales o cenitales, serán en lo posible uniformemente distribuidas.

La iluminación cenital será permitida por claraboya o por vidrios de piso que den al exterior;

b) Vanos:

1) Iluminación: El área mínima de los vanos de iluminación será:

donde i = área mínima del total de los vanos de iluminación;

$$i = \frac{A}{X}$$

A = área libre de la planta del local;

X = valor dependiente de la ubicación del vano según el siguiente cuadro:

Ubicación del vano	Vano que da a espacio urbano	Claraboya o vidrio de piso*	Vidrio de piso al nivel del solado transitable
Lateral, bajo parte cubierta	8	---	---
Lateral, libre de parte cubierta	10	---	---
Cenital	---	10	6

Cuadro N° 7

En los vanos de iluminación sobre la vía pública de un local en piso bajo, se computan las partes situadas por encima de los 2,00 m del respectivo solado, salvo las puertas de entrada de ese local que se computan totalmente;

c) Claraboya: El área de iluminación corresponde a la abertura del entrepiso o azotea. El área neta i de la abertura de la claraboya puede ser virtualmente aumentada a los efectos de intervenir en el cómputo de la iluminación exigida, sin rebasar de $2,5 i$. Sea:

i = área neta de la abertura en proyección horizontal;

p = perímetro total de la proyección de la abertura;

p' = la parte de p que resulta de excluir los lados que coincidan con el parámetro de muros divisorios o de muros llenos de cerramiento separativos de locales independientes;

h = altura del local iluminado;

j = área virtual en ningún caso mayor que $2,5 i$;

1) Cuando la abertura i satisfaga el área mínima y el lado mínimo del espacio urbano el área virtual será: $j' = \frac{3}{4} p' h$;

2) Cuando no se cumpla alguna de las condiciones establecidas en el ítem 1), sin exceder de j' , se computa: $j'' = \frac{3}{4} \frac{p'}{p} i h$;

3) Cuando el resultado de aplicar los criterios precedentes produzca un área virtual menor que i , se adopta: $j''' = i$

Para la iluminación de locales de cuarta clase y escalera secundarias establece que:

a) Un local de cuarta clase no requiere, en general, recibir luz del día y ventilación por patio auxiliar;

b) literal dedicado a ventilación

c) Iluminación de pasajes y corredores generales o públicos: los pasajes y corredores generales o públicos deben recibir luz de día por vanos laterales o cenitales distanciados entre sí no más que 15,00 m; esta luz del día puede ser indirecta a satisfacción de la Dirección, teniéndose en cuenta lo dispuesto en el Apartado III) del ítem 3) del inciso b) de "Iluminación y ventilación de locales de segunda clase y escaleras principales".

d) literal dedicado a ventilación

e) Iluminación y ventilación de escaleras secundarias: las escaleras secundarias que conectan más de dos pisos se iluminarán y ventilarán como si fueran escaleras principales. Las que conecten sólo dos pisos cumplirán la mitad de las exigencias establecidas para las escaleras principales, y los vanos laterales pueden recibir luz del día en forma indirecta a satisfacción de la Dirección.

Finalmente para la iluminación y ventilación de locales de quinta clase define que:

a) Un local de quinta clase habitable con altura menor que 3,00 m sólo recibirá luz del día y ventilación del espacio urbano. Para los demás locales de quinta clase se aplicarán las exigencias de iluminación y ventilación por analogía, según el uso o destino de cada uno.

b) Vanos: Cuando un local de quinta clase sea habitable tendrá vanos de iluminación y ventilación como si fuese de primera clase. Los demás locales cumplirán las exigencias de este Código por analogía, según el uso o destino de ellos.

Por último establece normas para la iluminación y ventilación natural de locales a través de partes cubiertas que si bien son interesantes no abordaremos por ser bastante extensas y no aportar a nuestro fin de incrementar el flujo luminoso al interior de los espacios habitables.

2.3 - Elementos para el control de la luz solar

Los elementos para el control de la luz solar son todos aquellos dispositivos, sistemas o partes de una construcción que nos permiten modificar la forma en que son recibidos los rayos luminosos en el interior de los espacios arquitectónicos, ya sea para aumentar su ingreso o disminuirlo y pueden ser fijos, en cuyo caso las variaciones en la iluminación interior serán producidas por el paso del sol a lo largo del día y el año, o móviles que otorgan la posibilidad de modificar las condiciones lumínicas a voluntad ya sea por medios manuales, mecánicos, ópticos o automatizados.

Aleros; son elementos horizontales fijos, que tienen por objetivo evitar la radiación directa, sin embargo, a pesar de que por lo general se diseñan de forma rectangular, esto no tiene que ser así y podrían tener formas diferentes para un mejor control solar, siguiendo las trayectorias de luz del sol. Aunque esto plantea problemas de construcción y elevación de costos.



Imagen N° 33 Parteluces

Parteluces; se llama así a elementos verticales, generalmente de forma rectangular, que pueden ser gruesos o delgados, ubicados todos en la misma posición, con una separación conveniente, según los fines perseguidos de evitar la radiación solar directa. Los parteluces pueden ser fijos o móviles y estos últimos, pueden ser manuales, mecanizados e incluso automatizados mediante el uso de computadoras, para girarlos a medida que va cambiando la luz solar a lo largo del año.

En el caso de que sean fijos, es conveniente estudiar la posibilidad de dejar una pequeña separación con respecto al edificio, para que se pueda permitir la circulación de aire, esto incluso puede servir para mejorar la climatización natural.

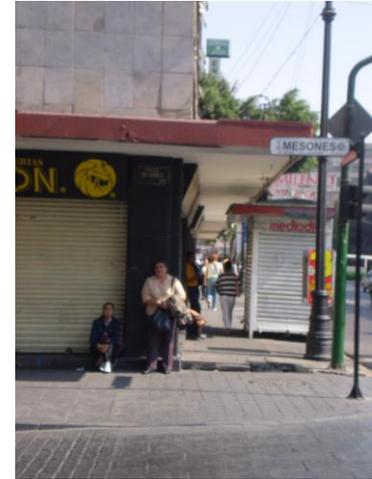


Imagen N° 32 Alero

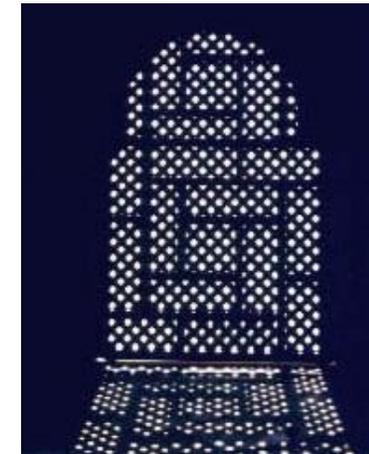


Imagen N° 34 Celosía



Imagen N° 35 Deflectores de luz (Light shelves)



Imagen N° 37 Pérgolas

Celosías; son una combinación de elementos usualmente con un diseño repetitivo que dejan pasar la visión de manera parcial, por lo general son fijos, pero en un diseño ortogonal sencillo pueden tener una de las dos componentes móviles, dado que mover las dos sería un trabajo bastante engorroso. Según su posición, forma y espesor podrán evitar los rayos solares verticales tanto como los horizontales o dejar pasar el rayo directo de manera tamizada (imagen N° 34)



Imagen N° 36 Repisas de luz

Deflectores, light shelves; se llama así a uno o varios elementos horizontales que quedan ubicados sobre la ventana común y que sirve para iluminar por medio de reflexión el interior de las habitaciones, en las partes más alejadas de la fachada donde incide el sol. Existen detractores de esta solución dado que se argumenta que la luz "se reduce al obstruirla en la parte cercana a la ventana", razón de más para incluir este elemento en las investigaciones y corroborar o rebatir dicha aseveración..

Repisas de luz; son elementos horizontales ubicados en el exterior, cuya cara superior refleja la luz directa del sol hacia el techo de la habitación, mientras las repisas proyectan su sombra en las ventanas, con lo que se impide el paso directo de radiación.

Pérgolas; son elementos prismáticos rectangulares de sección muy esbelta que tienen forma de tablillas, ubicados todos de la misma forma, de modo que las caras de los lados más largos van colocadas de manera vertical y con una separación entre ellos que generalmente es menor al lado mayor de su sección. Por no poder afirmar lo contrario, diremos que generalmente son fijas, puesto que podría darse la posibilidad de tener movimiento.

Persianas; son muy similares a los deflectores, pero la diferencia está en su tamaño ya que son extremadamente delgadas por lo que generalmente se realizan en plástico o metal y se



Imagen N° 38 Pantalla

colocan manteniendo vertical el plano que pasa por los ejes de simetría en el lado largo de cada una, ya sea que éstas se mantengan verticales u horizontales. Pueden ser fijas pero generalmente son móviles y tienen la ventaja que pueden ser retirados a voluntad con un sistema retráctil.

Cortinas; son elementos generalmente confeccionados en tela cuya función principal es evitar el paso de la visión hacia el interior de las habitaciones, por lo que se abren durante el día para dejar pasar la luz solar y son cerradas por la noche, se utilizan principalmente en residencias privadas, pero en la actualidad tienden a desaparecer para dar paso a otros conceptos de vanguardia. Otra forma de cortina es la realizada con carrizos que al tirar de una cuerda se enrollan, quedando al nivel que se desee.

Pantallas; confeccionados generalmente de tela, pueden cubrir de forma total la penetración solar y reducir la iluminación y ventilación, por lo que se deben diseñar con mucho cuidado, especialmente cuando son fijas, pues un estudio acucioso podría otorgar excelentes resultados.

Toldos; consiste en un elemento de tela que puede ser abierto o cerrado a voluntad o permanecer fijo, es una solución muy práctica dado que permite resolver problemas de edificios existentes sin recurrir a grandes inversiones, pero también puede perjudicar la imagen urbana si no se toma en cuenta el contexto, por esta razón es importante un estudio urbano antes de aplicar este tipo de solución.

Balcones; si bien proporcionan un espacio agradable, que permite un contacto directo con el exterior, además de servir como elemento de control solar, tienen el inconveniente de alejar la ventana del paño de la fachada, con lo cual se pierde gran parte de la *iluminación natural*. Sin embargo se puede estudiar la combinación con repisas de luz para lograr una solución que no perjudique el acceso de *iluminación natural*.

Vegetación; Una forma natural de protección solar para edificios de una o dos plantas, son los árboles del tipo caducifolia, cuyo follaje proporciona sombra en



Imagen N° 39 Toldos y balcones

verano y no estorba el asoleamiento en invierno, aunque el resguardo que proporcione dependerá de la altura, tamaño y forma de su copa, además de la distancia y posición respecto del edificio. Sin embargo, se debe considerar que en la época de mayor follaje, también reducirá la *iluminación natural*, por lo que deberá realizarse un estudio acucioso para elegir la especie y posición que ocupará.

Doble piel; se denomina así a una fachada exterior que se ubica delante de la pared interna del edificio y está constituido por elementos modulares cuya función es proveer al edificio de un mayor control ambiental, así como también otorgar privacidad o simplemente una determinada estética, su uso se ha extendido de tal modo que se podría decir que constituye en sí una tipología arquitectónica propia de nuestra era.



Imagen N° 40 Doble piel

Concentradores de luz solar; están basados en lentes ópticos que captan la luz del sol, concentrándola para dirigirla a una zona en el interior de la edificación, donde puede ser redirigida, reconcentrada o difuminada. Para su implementación requiere aparatos especialmente diseñados y un estudio muy preciso de la trayectoria solar, pero tiene la ventaja de poder llevar luz natural a grandes profundidades.²⁵

Postigos; estos antiguos aditamentos están formados por unas hojas de madera abatibles, que pueden tener o no celosías y que se ubican delante de las ventanas para realizar de modo manual el control térmico o lumínico,

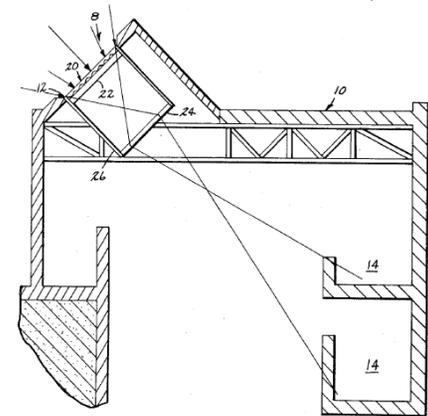


Imagen N° 41 Concentrador de luz



Imagen N° 42 Postigos

²⁵ U.S. Patent 4,329,021, may 11, 1982, Passive solar lighting system, David J. Bennett y David A. Eijadi



Imagen N° 43 Velaria

según sea el caso. Por lo general se usan en lugares donde el calor excesivo debe ser detenido antes de que penetre al edificio, aunque esto debe estar acompañado de muros que posean la suficiente masa térmica para que el dispositivo cumpla su objetivo.

Velarias o Tenso Estructuras; este tipo de módulos consisten en membranas sometidas a tensión por medio de cables y estructuras rígidas, así como sistemas de abrazadera especialmente confeccionados, las telas se fabrican en vinilo y fibra de vidrio cubierta con teflón. Proporcionan una distribución uniforme de la luz y son capaces de abarcar grandes distancias. Por la forma de estructurarse produce una geometría que no es sencilla de definir, razón por la cual lo más recomendable para utilizarlas es recurrir a un profesional especialista en este tipo de elementos.



Imagen N° 44 Edificio Gasco con atrio central

Atrios; una forma de iluminar que podría constituir una tipología arquitectónica son los llamados atrios, en los que se deja libre una parte central de la planta para permitir, a través de la techumbre translúcida, el paso de iluminación directa, difusa o una combinación de ambas. Este elemento espacial otorga una gran variedad de posibilidades dado que por su medio se puede también ventilar, crear espacios escultóricos, jardines, circulaciones y muchas otras, generando un ambiente interior agradable en condiciones de clima exterior extremo. Existen numerosos ejemplos exitosos en diversas partes del mundo, tales como el edificio Gasco en Santiago, Chile, inmerso en una zona de recuperación urbana.

Conductos de luz; son sistemas compuestos de un elemento que recibe el haz solar, tal



Imagen N° 45 Conductos de luz

como un domo, un cuerpo que conduce la luz por dentro de sí, generalmente tubular y un componente que cierra el circuito distribuyendo al interior la iluminación, el fabricante asegura que la extensión de los tubos puede ser hasta de 12 metros sin pérdida de la calidad y con algunas curvas para evitar paso de instalaciones o estructuras, sin embargo, no hemos encontrado datos comparativos entre la recepción del sistema y el resultado al final del mismo y dado que no se mostró dispuesto a que su producto fuera sometido a investigación por parte del curso “Interacción con el medio” del Posgrado en Arquitectura, nos hace dudar de la veracidad de sus afirmaciones. Por otra parte, los casos prácticos presentados, se limitan aparentemente a soluciones en naves industriales o aplicadas en el último nivel (imagen N° 40), constituyendo un costo adicional que pudiera ser solventado a uno mucho menor empleando láminas de policarbonato, vidrio de seguridad esmerilado o algún otro sistema similar, además los conductos luminosos ocupan un espacio que no puede ser despreciado, lo que los hace inviables si se requiere atravesar niveles útiles de la edificación. Sin embargo, debemos decir a su favor que la solución en oficinas con plafones ofrece una vista atractiva.

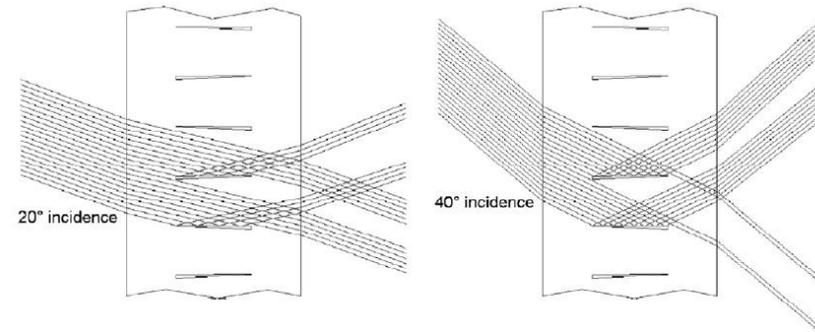


Imagen N° 46 sistema Serraglaze

Serraglaze; consiste en dos hojas muy delgadas de polimetilmetacrilato (PMMA) que incorpora prismas microreplicados, adheridos para crear bolsas de aire microscópicas que actúan como deflectores de luz ubicados de forma perpendicular a las caras de la lámina. El sistema trabaja cambiando el ángulo de refracción por lo que la luz solar puede ser dirigida al plafón de las habitaciones sin perjudicar la visión hacia el exterior, ni permitir el paso del calor, su desventaja es el costo que es elevado y si no se estudia adecuadamente puede reducir o eliminar la ganancia de calor en invierno.

Protección por redireccionamiento de la luz (Light-guiding shades); son sistemas en los que por medio de algún material altamente reflectante, como puede ser una lámina pulida de aluminio u otro material, se forma un conjunto que envía los rayos solares al techo o plafón de la habitación. Para concentrar la luz en la entrada del sistema se emplea algún tipo de prisma que redirige la luz hacia el interior sin importar la

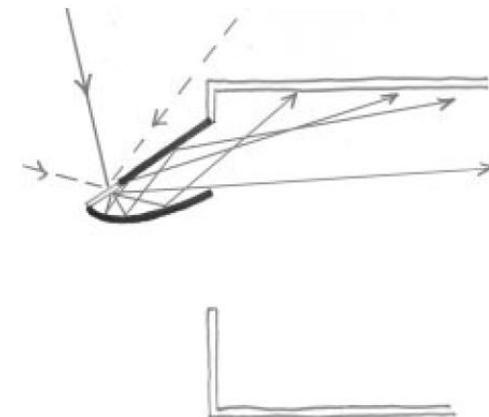


Imagen N° 47 Redireccionamiento de luz

dirección de procedencia de esta. Si bien los fabricantes defienden su producto, se debe argumentar que tienen la desventaja de disminuir el área de ventana y producir sombra, además de necesitar el rayo directo del sol para funcionar, con lo cual, pasan a ser un obstáculo para la *iluminación natural* cuando se presenta únicamente luz difusa, por este motivo son aptos para climas de mucha insolación y gran calor, como puede ser una zona tropical o desértica.

2.4.- Estrategias de control de la luz natural

Existe una innumerable cantidad de estrategias para iluminar el interior de los edificios por medios naturales y para ello necesitaremos siempre algún elemento de control como los que se vieron en el apartado anterior, sin embargo, la solución estará marcada principalmente por los siguientes parámetros:

1. Efecto luminoso deseado; aunque al hablar de *iluminación natural* se puede pensar que lo importante es hacer ingresar la mayor cantidad de luz a un lugar, no siempre es así, en ocasiones podrá ser éste el objetivo, pero en otras puede importar más la ganancia de calor, las vistas o evitar el deslumbramiento, por esto el estudio de los niveles de iluminación al interior del espacio se vuelve una tarea de primer orden y sin dudas, la experiencia será primordial, pero el éxito será alcanzado solo mediante un trabajo prolijo y arduo.
2. Orientación de la(s) fachada(s); de nuestro estudio se desprende que cada orientación es diferente, por lo que cualquier estrategia exitosa para una fachada no tiene porqué serlo para otra, cada frente es único y por lo tanto requiere un estudio particular. Esto nos hace poner en duda las soluciones llenas de cortinas de muchos Pritzker que llenan revistas de arquitectura.
3. Latitud; como ya sabemos, la declinación solar es una función perfectamente definida por la latitud del lugar y esto tendrá consecuencias directas en los niveles de iluminación, por lo que es preciso conocer de manera cabal la proyección estereográfica y su aplicación.
4. Clima; la cantidad de factores que se conjugan para determinar el clima hacen que cada lugar sea único e irrepetible, incluso dentro de una misma urbe, como sucede en la Ciudad de México, pueden existir diferentes comportamientos climáticos, por lo que basta con este argumento para cuestionar cualquier proyecto que pretenda denominarse ecológico y contemple prototipos de edificios o viviendas.
5. Obstrucciones; en una gran ciudad, los elementos que constituyen barreras al paso de la luz pueden ser un gran dolor de cabeza, pero precisamente por medio de los elementos de control solar es que podemos lograr que las obstrucciones actúen a nuestro favor, por medio del punto enumerado a continuación.
6. Ingenio y habilidad del diseñador; todo el conocimiento adquirido y la experiencia acumulada son irrelevantes si no se pueden encontrar soluciones novedosas y estas solo se darán como fruto de un trabajo constante sometido a la autocrítica, buscando siempre nuevas interpretaciones y enfoques.

Los textos referidos a la *iluminación natural* en su inmensa mayoría en inglés, definen las estrategias en función de días nublados o despejados por estar basados en las condiciones climáticas que prevalecen fundamentalmente en Europa y más específicamente en Inglaterra, donde surge el método del día claro, pero en la condición cambiante de los cielos mexicanos, estas técnicas no pueden ser aplicadas sin incurrir en errores que podrían ser graves, por lo que es preciso definir nuestras propias soluciones, puesto que se trata de dar respuesta a los requerimientos fundamentalmente con los elementos disponibles en México.

En el siguiente apartado mencionamos la función especializada de la ventana y decimos que este elemento puede servir para iluminar, ventilar y calentar un espacio, por lo que será tarea del diseñador elegir qué función o funciones tendrá de manera primordial, dado que, si se quiere que cumpla una sola, la sencillez será mayor, pero al agregar más tareas la solución puede complicarse, especialmente cuando los requerimientos pueden ser contradictorios, como ejemplo mencionaremos que si se requiere calentar un espacio, la luz directa es la indicada, pero si al mismo tiempo se necesita un nivel de iluminación homogéneo estaremos en problemas. De cualquier modo el diseño debe ser integral y considerar todas las aberturas de manera conjunta, para que actúen como un todo que proporciona satisfacción a los diferentes deseos en cuanto al manejo de la luz solar. El diseñador debe comprender esta relación al momento de tomar una decisión sobre qué sistema elegir y pensar en la interacción que tendrá con los demás sistemas del edificio, el éxito del sistema durante la operación dependerá de lo acertado de su elección.

Al aumentar los requerimientos que debe satisfacer una ventana, disminuirá el rango de los sistemas de control que pueden ser aplicables y la mayoría de las soluciones contemplarán elementos móviles que pueden ser retirados cuando no se usan, tales como persianas venecianas, toldos, postigos u otros, accionados por medios manuales, mecanizados o automatizados mediante sistemas computarizados. Otra posibilidad es asignar diversas funciones a partes específicas de una ventana, aplicando sistemas de control diferenciados a cada una de ellas para ser operados de manera independiente, que inclusive podría ser el mismo mecanismo u otro diferente, pero en este caso se requerirá un estudio más detallado del funcionamiento del sistema. Obviamente cada solución dependerá de múltiples factores, lo importante es que se logre la satisfacción de las condicionantes del diseño.

Dado que la luz difusa penetra a los espacios una distancia igual a dos y media veces la altura de la ventana, en la mayoría de los edificios de varios niveles se tendrá la falta de luz a una corta distancia de la fachada si este aspecto no ha sido considerado desde la fase de diseño, por lo que cualquier solución natural de iluminar los interiores posteriormente, no tendrá gran éxito o podría ser muy costosa.

Si tenemos la relación altura de ventana-ingreso de luz como algo constante, al crecer la primera, también aumentará la segunda y pensando en los edificios que ocupan alta tecnología para su funcionamiento, donde lo recomendado por los expertos en la materia son

entrepisos de 3.5 m a 4.5 m en los que todas las instalaciones son llevadas por piso o plafón, se puede incorporar éste último elemento para plantear estrategias de *iluminación natural* hasta distancias que podrían oscilar entre 8.50 m y 11 m, lo cual es muy bueno. Para esto se tendría que tener el cuidado de diseñar los sistemas de servicios del edificio, de modo que no interfirieran con el ingreso luminoso o lo hicieran de forma mínima, lo que podría ser conseguido con eficiencia llevando las redes, la mayor parte de su trayecto, cercanas a los elementos estructurales y por su cara norte, para procurar que el plafón trabajara como una gran caja de luz. Pero considerando que en la Ciudad de México, la mayoría de las veces se puede contar sólo con dos fachadas, debido a las colindancias, si el largo del edificio supera el doble de la distancia máxima para proveer luz de día por ambos frentes, en las zonas donde esta se reduciría, es decir la parte central, se pueden plantear actividades que requieran menores niveles de iluminación, tales como circulaciones verticales, sanitarios, equipos u otros elementos, que además podría servir para articular otra zona de *iluminación natural* que diera apoyo a las fachadas. Puesto que el plafón trabajaría como una lámpara natural, debería estar construido con materiales translúcidos, tales como acrílico blanco o vidrio esmerilado en todos aquellos lugares donde pudiera pasar la luz y en los sectores que por su función sean opacos, en la parte superior deberían poseer una superficie reflectante que enviara la luz al lecho bajo de la losa, que a su vez debería ser también reflejante para regresarla al plafón. Es preciso hacer notar que esta estrategia es eficiente sólo si recibe luz directa, por lo cual sería muy importante considerar un sistema de ventilación cruzada para que dicho espacio no se sobrecaliente, pero además no serviría implementarlo con una orientación norte, pues su utilidad sería muy escasa.



Imagen N° 48 Lonarias difusoras de luz natural

Otra estrategia de diseño para edificios de poca altura, es el uso de atrios o patios centrales cubiertos, que si bien tiene la restricción de requerir mayor área de desplante, ha dado muy buenos resultados por lo que si es posible disponer de espacio para ponerla en práctica puede ser muy buena solución. Aquí se debe tener en consideración que la cubierta del atrio debe estar diseñada de modo que no se produzca un sobrecalentamiento del interior en las épocas de calor, pero si es posible introducir el sol directo en temporada de frío sin producir deslumbramiento ni otras molestias en los ocupantes podría generar un grato ambiente que además de economizar energía en calefacción, permitiría como ya ha sido expuesto, mejorar la productividad de los empleados. Los vidrios difusores de luz son una solución concurrida y eficiente, el uso de pantallas es también una opción a considerar, así

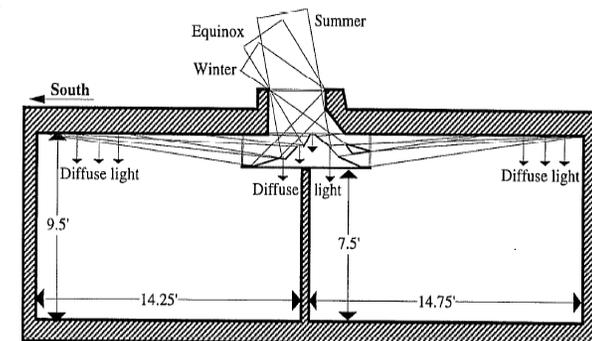


Imagen N° 49 Elementos Ópticos Holográficos

como las lonarías que permiten una gran versatilidad, lo que puede ser visto en el museo de arte Trapholt en Kolding, Dinamarca (imagen N° 48).

Debido especialmente a la ganancia térmica esta tipología de edificios no se ha difundido en latitudes donde la temperatura puede elevarse por encima de los rangos de confort, pero con el uso de los sistemas avanzados de redireccionamiento de la luz solar, tales como el vidrio grabado con láser o los elementos ópticos holográficos que permiten el ingreso exclusivo de la luz, cada vez se están generando más proyectos solucionados de esta forma, es el caso del Centro Internacional para Arquitectura del Desierto en El Cairo, Egipto donde es posible encontrar estas aplicaciones, así como en la Cámara de Comercio de Palm Spring en California, EU.

En aquellos edificios donde es posible una configuración que permita iluminar por diferentes fachadas el espacio interior, puede realizarse una combinación de elementos que obstruyan los rayos directos en el lado que los recibe, mientras el otro paño permite vistas y la distribución más uniforme de la luz, evidentemente esta estrategia requiere de elementos móviles como pueden ser pantallas, persianas venecianas, toldos, entre otros, que puedan ser modificados a voluntad de acuerdo con el desplazamiento solar y su luz.

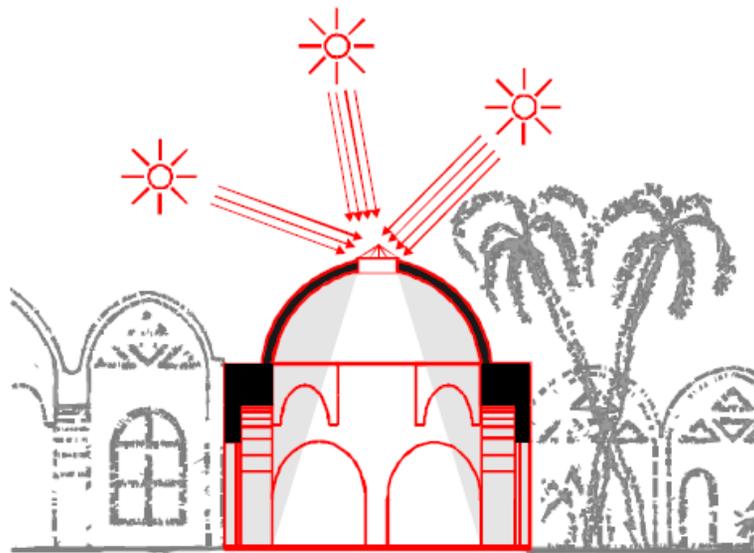


Imagen N° 50 Elementos Ópticos Holográficos

Dado el movimiento cambiante de la luz solar, es poco probable que en la Ciudad de México pueda llegarse a una buena solución con elementos fijos, ya que estos podrán otorgar buenos resultados en determinados momentos, sea mejorando la iluminación o protegiendo de los rayos directos, pero al pasar el efecto que se desea controlar, invariablemente se tendrá una reducción de la luz que entra al espacio por la ventana que contiene el sistema fijo, por esto, a menos que sea precisamente la disminución permanente de la claridad lo que se desea conseguir, como puede ser el caso de templos religiosos, deberá implementarse además un sistema móvil que permita suplir la deficiencia provocada por el estático.

2.5 - El vidrio en la arquitectura

El control solar es deseable solo si se toma en cuenta para qué se quiere realizar, puesto que todo debe partir de un análisis de las necesidades del usuario, dado que si no se hace de esta forma, es muy probable que se cauce un perjuicio, aunque sea de manera parcial. Además como en todos los aspectos de la arquitectura, el manejo de la *iluminación natural* debe ser parte de un estudio integral que involucre otros factores ambientales, como la humedad, temperatura y ventilación, de esta forma se puede llegar a una solución que ofrezca confort durante todas las horas de ocupación del edificio, pensando siempre en la manera de lograrlo en la mayor parte de forma pasiva, con el fin de obtener importantes reducciones en el consumo energético. Una vez realizados estos estudios se puede determinar por medio de gráficas u otros elementos a nuestro alcance, tales como la geometría solar, qué elementos serán los más convenientes para realizar el control tanto de la *iluminación natural* como de otros factores, de acuerdo con su función y actividades, es decir, introducir luz en la proporción adecuada en todos los espacios habitables, pero sin descuidar la tan necesaria radiación en los momentos de frío durante el día. La ventilación es también un aspecto que es necesario cuidar dado que si está correctamente utilizada no interferirá con la eficiencia de nuestros sistemas.

Considerando que la ventana es por antonomasia el primer sistema de control ambiental, pues desde siempre se le han agregado aditamentos con este fin, ya sean cortinas, persianas, postigos, etc., cuyo conocimiento y perfeccionamiento ha sido posible por la experiencia que ha tenido como base la prueba y el error a lo largo de muchas centurias, pero en el diseño contemporáneo debemos apoyarnos tanto en esa experiencia como en la investigación.

La ventana es un elemento importantísimo en lo que a *iluminación natural* se refiere y por este motivo nos dedicaremos aquí a analizarla desde el punto de vista de la luz. Como sabemos una ventana es un espacio inserto en un elemento sólido que de acuerdo con la Real Academia de Lengua Española (a la cual la Academia Mexicana de la Lengua se adscribe), en lo que a arquitectura concierne, se define como:

Ventana; (Del lat. ventus).

- f. Abertura más o menos elevada sobre el suelo, que se deja en una pared para dar luz y ventilación.
- f. Hoja u hojas de madera y de cristales con que se cierra esa abertura.

Si bien, estas definiciones nos permiten identificar el objeto del que estamos hablando, creemos que son insuficientes para aclarar cuáles son todas las funciones que cumple una ventana y menos aún para cubrir todas las posibilidades que en la actualidad ofrece este elemento.

Estamos de acuerdo en la función que tiene la ventana de iluminar, sin embargo, ventilar se refiere más a los cambios de aire que a una tarea térmica, por esta razón a lo ya mencionado se tiene que agregar la posibilidad de calentar (o enfriar) un espacio, pero además, debemos considerar que una ventana no debe necesariamente cumplir todos estos trabajos, lo que nos lleva a plantear la función especializada de la ventana, donde ésta puede cumplir una o varias de las tareas mencionadas. Por otra parte, no se puede asegurar que las ventanas sólo puedan existir en los muros, dada la configuración formal de los edificios actuales, donde muchas veces no es posible identificar o separar sus elementos, es decir, no existe una clara separación de lo que es techo y lo que es muro.

Una vez hechas las aclaraciones, podemos concentrarnos en la utilidad que nos puede prestar la ventana, pero debemos señalar que dado el interés de esta investigación, por ahora dejaremos fuera las consideraciones que tienen que ver con la parte térmica y la ventilación, si bien deben ser analizadas a profundidad cuando se proyecta arquitectura natural.

Sin lugar a dudas, el material más utilizado para cerrar todo tipo de fenestras es el vidrio o cristal, pero dado que existe poca claridad de que término se debe aplicar a los elementos translúcidos que cubren la inmensa mayoría de estas aberturas en los edificios, nuevamente recurrimos al diccionario de la RAE, para conocer las definiciones oficiales de estos materiales:

vidrio. (Del lat. *vitřeum*, de *vitrum*).²⁶

1. m. Sólido duro, frágil y transparente o translúcido, sin estructura cristalina, obtenido por la fusión de arena silíceo con potasa, que es moldeable a altas temperaturas.
2. m. Lámina de este material que se utiliza en ventanas, puertas, etc.

cristal. (Del lat. *crystallus*, y este del gr. *κρύσταλλος*).²⁷

1. m. Sólido cuyos átomos y moléculas están regular y repetidamente distribuidos en el espacio.
2. m. Vidrio, especialmente el de alta calidad. *Cristal de La Granja*.
3. m. Pieza de vidrio u otra sustancia semejante que cubre un hueco en una ventana, en una vitrina, etc.

De la lectura de estas definiciones podemos deducir que se puede usar indistintamente un término o el otro, por lo que en lo sucesivo, podremos aplicar cualquiera de ellos para referirnos a este frágil material que cubre nuestras ventanas.

En México existen básicamente dos proveedores de vidrio para ventanas; Grupo Saint Gobain y Grupo Vitro, quienes ofrecen una gran variedad de alternativas para uso arquitectónico, otros productores e importadores más pequeños, no serán considerados por no ofrecer casi variedades, siendo por lo general más especializados.

²⁶ Diccionario de la lengua española, Real Academia Española, Vigésimo segunda edición, 2001. p. 1561

²⁷ Diccionario RAE op. Cit. p. 463

Podemos mencionar que la primera compañía tiene lo que denomina Familias Saint-Gobain Glass, dentro de las cuales encontramos las siguientes líneas²⁸:

- Comfort: que ofrece control solar, aislamiento térmico reforzado y atenuación de ruidos provenientes del exterior.
- Design: incluye vidrios claros y de color con diseños grabados e impresos, ya sean transparentes o translúcidos, así como variedades mate o brillantes y una gran gama de posibilidades para el diseño arquitectónico que incluye el templado y el termoformado
- Vision: conformada por vidrio flotado extra-claro, incoloro, anti-reflejante, de doble acristalamiento, además de un tipo de vidrio denominado Priva-Lite que mediante un interruptor modifica su transparencia hasta hacerse translúcido, también vidrios que permiten la visión unidireccional y otro anticondensación.
- System: que consiste en sistemas de estructuración mediante elementos metálicos y vidrio, así como laminados y templados, que permiten la realización de muros y entrepisos. También contempla la incorporación de fotoceldas en fachadas.
- Protect: vidrios destinados a resistir golpes y atenuar los riesgos de accidentes, roturas, vandalismos e incendios, así como la protección contra rayos x.
- Clean: compuesta por vidrios autolimpiantes con aplicación a fachadas de edificios.

Por su parte la empresa Vitro ofrece 5 grupos de productos en los que podemos encontrar vidrios²⁹:

- Térmicos; diseñados para uso residencial, obras monumentales e instalaciones que requieren estricto control de temperatura.
- Acústicos; para aquellos lugares donde se requiere un elevado control del ruido.
- Seguridad; destinados a evitar daños materiales y robos a través de las ventanas de los edificios.
- Luminosidad; vidrios más claros para una mejor percepción de la luz y los ambientes.
- Estéticos; que incluyen cristales de color, impresos, espejo, block y una variedad denominada Stone glass, que imita la piedra natural.

Sin lugar a dudas, la extensa gama de productos de estas dos compañías permiten combinaciones que llevan el diseño al infinito y en lo que a *iluminación natural* se refiere, podemos asegurar que las posibilidades para realizar este cometido no son pocas por lo que creemos importante destacar los criterios que se deberían tener en mente a la hora de diseñar con luz.

²⁸ Ver <http://www.saint-gobain-glass.com.mx/>

²⁹ Ver http://www.vitro.com/vidrio_plano_arquitectonico/

- El exceso de iluminación produce molestias que no son adecuadas para la mayoría de los trabajos, razón por la cuál es preciso cuidar este aspecto, mediante una combinación de materiales y diseño.
- El uso de vidrios transparentes puede aportar vistas, pero también transferencia térmica, la elección correcta del material o sistema puede solucionar los problemas y permitir un ambiente interior adecuado a lo largo del año.
- Eliminar completamente la radiación solar también puede ocasionar problemas de enfriamiento excesivo, especialmente en las épocas de invierno.
- Realizar arquitectura con vidrio como elemento principal en pisos, fachadas, escaleras, barandales, etc. es perfectamente posible permitiendo llevar la luz solar a espacios inimaginables con otros sistemas constructivos, sin embargo la seguridad debe ser un punto inicial para el diseño, que obliga a una adecuada elección de materiales y proveedores.

Debido a su importancia en el control y manejo de la luz natural creemos necesario ahondar en algunos tipos especiales de vidrio que por sí solos pueden realizar estas funciones:

Vidrios equipados con capa protectora anti UV; gracias al avance de la tecnología en esta materia existen soluciones que logran altos grados de protección de la radiación ultravioleta, que puede llegar hasta 99% según los fabricantes, su función es la de evitar el efecto invernadero provocado al interior de las habitaciones una vez que penetra el rayo de sol, así como el deslumbramiento que este genera. Consiste en una película o capa superficial aplicada al vidrio, cuya característica principal es que permite el paso de las ondas de luz visible, pero refleja la luz infrarroja cuando la temperatura supera los 29 grados centígrados, por lo que puede reducir considerablemente los costos económicos y ambientales del aire acondicionado, por esta razón debe usarse de acuerdo con un estudio para evaluar donde se requiere este control y permitir así la radiación en determinados lugares, evitando el uso de calefactores cuando se puede realizar esta función de manera natural. Un inconveniente importante es que este tipo de vidrios presentan un costo elevado, en relación a los normales y existen otras alternativas como el vidrio esmerilado, vidrio catedral u otros similares de menor costo, sin embargo debe agregarse a su favor que a diferencia de estos últimos, el vidrio anti UV posee transparencia.



Imagen N° 51 Vidrio grabado con láser

Vidrios grabados; existe una extensa gama de procedimientos para grabar el vidrio y cada una de ellas nos dará diferentes acabados y por lo tanto resultados diversos, de los cuales aquí trataremos los más conocidos;

- *Grabado químico;* de naturaleza más bien artística, puede ser utilizado en arquitectura por sus valiosos resultados, consiste en cubrir el vidrio con una capa protectora que después se descubre en las partes donde actuará el ácido que por lo general es

fluorhídrico aunque también hay fórmulas que emplean ácido nítrico, el resultado es una superficie mate que no se mancha fácilmente y puede ser limpiada de forma sencilla. El trabajo es muy peligroso y se requiere gran pericia, siendo una labor artesanal que casi se ha perdido.

- *Serigrafía*; Consiste en estampar el vidrio con tintas especiales por medio de una malla que tiene el diseño impreso en negativo que constituye una barrera para la pintura que sólo pasa a través de las partes abiertas, el resultado es permanente, pero no conocemos estudios sobre la durabilidad del grabado en el tiempo, por ser un trabajo artesanal su costo es elevado, pero si se puede realizar por medios mecánicos, debería bajar ostensiblemente.
- *Chorro de arena (sand blast)*; en ésta técnica la parte a ser grabada queda expuesta mientras la restante debe ser cubierta ya sea por medio de serigrafía o papeles adhesivos, tiene la ventaja que se puede controlar la profundidad del grabado con mayor precisión y ya existe maquinaria que realiza el trabajo de forma mecánica, lo que reduce costos y tiempos a la vez que permite una mayor uniformidad y calidad de los proyectos.
- *Esmerilado*; para conseguir este tratamiento se coloca polvo de esmeril sobre la superficie del cristal y por medios manuales o mecánicos se frota de forma circular con otro vidrio hasta conseguir un acabado mate uniforme.
- *Grabado con láser*; estos cristales son tratados con alta tecnología láser con la que se realiza un grabado para reflejar hacia el plafón interior los rayos del sol y la luz del cielo, pero solo hasta cierto grado de luminosidad, puesto que al sobrepasar el nivel de confort lumínico, rechazarán parte de la luz. La ventaja que poseen es que no reducen de manera significativa las vistas al exterior, como puede ser apreciado en la imagen N° 51, sin embargo el costo se eleva considerablemente

Vidrios laminados; este tipo de cristales están formados por dos o más capas de vidrio que son unidas por medio de una resina o película, que puede tener componentes de protección UV, la que adicionalmente mejora su capacidad como aislante térmico y acústico, pero que fundamentalmente se emplean para seguridad.

Vidrios templados; si bien es común encontrar este tipo de vidrios en arquitectura, a menos que posean alguna de las características de los mencionados en los párrafos precedentes, no cumplirán función alguna en términos de control ambiental, ya que están diseñados para resistir golpes, esto se hace por medio de un procedimiento que consiste en crear una red de tensiones interiores que le confieren una dureza muy elevada lo que se consigue calentándolo hasta llevarlo a una cierta temperatura, inmediatamente inferior al punto de rotura (stretch point) momento en el cuál se enfría de forma muy rápida mediante una trama controlada de chorros de aire.

Además del vidrio existen muchos sistemas para el control y manejo de la *iluminación natural*, los materiales empleados son de los más diversos, por lo que sería ocioso tratar de mencionar alguno o pretender clasificarlos, baste decir que prácticamente cualquier material podría ser empleado para realizar algún tipo de control solar, que será posible más por la forma de emplearlo que por sus propiedades características ya sean de transparencia, opacidad, brillo, textura, etc.

Capítulo III

Elementos que deben ser considerados en el diseño de iluminación natural en la arquitectura.

"Y los arquitectos, por la elevada y humanitaria misión que nuestra profesión encarna, estamos obligados a conocer, perfectamente...lo que son el Sol y la Tierra y el modo de comportarse el Sol en nuestro planeta"

Miguel Bertrán de Quintana

Para lograr el objetivo de iluminar de manera adecuada los espacios interiores en la arquitectura es preciso considerar todos aquellos elementos que pueden incidir ya sea de manera directa o indirecta sobre un edificio. Como podremos comprobar a lo largo de este capítulo, existen diversas condicionantes que están ligadas al emplazamiento de la construcción y será preciso estudiarlas de forma acuciosa para llegar a la mejor solución posible. Con la finalidad de realizar un mayor acercamiento a la comprensión de estos fenómenos los agruparemos en tres categorías que denominaremos factores:

- 3.1 Geométricos
- 3.2 Ambientales
- 3.3 Arquitectónico-constructivos

3.1.- Factores geométricos asociados al movimiento terrestre

La declinación solar y la latitud, así como las horas del día, son condicionantes que afectarán de manera muy importante la incidencia de luz diurna en las edificaciones, pero al ser cíclicas y fijas dentro del ciclo¹ para un determinado lugar, además de poder ser determinadas con gran precisión por métodos geométricos, resultan ser herramientas de mucha utilidad para nuestros fines, pues como sabemos, el mayor asoleamiento en invierno se da en las fachadas orientadas al sur y en verano esto se invierte algunos días, llegando a iluminar levemente las fachadas que dan al norte. Sin embargo esto es válido solo en la parte que va del Ecuador hasta el trópico de Cáncer, en otras latitudes opera de manera diferente y en el hemisferio sur de forma opuesta, así en las latitudes más allá de los trópicos, la declinación solar se ve aumentada provocando que en la mayor parte de los horarios normales de trabajo los rayos solares provengan de la dirección opuesta al hemisferio en que estemos ubicados, durante todo el año, es decir, que si estamos en el hemisferio norte, desde el amanecer hasta el ocaso, habrá luz proveniente del sur, con la sola excepción del verano, cuando tanto la salida como la puesta del sol se darán en el lado correspondiente al propio hemisferio.

Si se cuenta con datos de iluminación como es nuestro caso, los estudios nos pueden llevar a una mayor profundidad que debería traducirse en un mejor diseño del objeto arquitectónico, en términos ambientales al menos, pero si no es así, se pueden considerar algunas estrategias, como captar la mayor cantidad de luz solar directa en latitudes altas o evitarlas al máximo en las regiones cercanas al Ecuador.

¹ Si bien en términos astronómicos estos ciclos varían, para fines de la arquitectura las modificaciones son insignificantes, por lo que se puede afirmar que son fijos para un período anual o de cuatro años.

3.1.1.- El movimiento terrestre

Como es conocido desde los primeros años de estudio de cualquier persona, nuestro planeta se desplaza en una órbita elíptica alrededor del sol, sin embargo se tiende a creer que es debido a esto que existen las cuatro estaciones denominadas: primavera, verano, otoño e invierno, pero realmente lo que produce los cambios climáticos que se dan de una estación a la siguiente es la inclinación que posee el eje de rotación de la Tierra, de este modo al llegar más inclinados los rayos solares en la época invernal de un determinado lugar, estos tienen un menor poder calorífico y por el contrario, en los veranos incidirán de manera casi frontal, haciéndose más perpendiculares mientras mayor sea la cercanía del sitio a la línea del Ecuador.

Esto sucede porque la línea imaginaria denominada eje de rotación de la Tierra apunta siempre en la misma dirección, aproximadamente hacia la estrella polar en el norte y hacia la cruz del sur en el polo opuesto, (el conocimiento de esto ha permitido a los navegantes desde siempre la orientación en el inmenso océano, donde lo único "fijo" son las estrellas), pero el Sol que si está fijo respecto de la Tierra envía sus rayos horizontales al plano de la eclíptica, que es el que forma la tierra en su recorrido alrededor del gran astro. Así en el momento en que el hemisferio norte está "más cerca" del Sol, el hemisferio sur está "más alejado" y serán los momentos denominados solsticio de verano y solsticio de invierno para cada porción terrestre respectivamente, situación que se invertirá al realizar la Tierra la mitad de su recorrido y darse los fenómenos contrarios en cada hemisferio. En el solsticio de verano se tendrá el día mas largo del año, mientras el día del solsticio de invierno será el mas corto, haciéndose mayor la duración de cada uno mientras mas cerca se esté de los polos, al extremo que el día y la noche duran seis meses en cada uno de estos según la estación del año.

Otra situación que se da son las estaciones intermedias denominadas otoño y primavera, en las cuales por un lado la parte expuesta de la Tierra se está alejando del Sol y la opuesta se está acercando, el punto exacto donde esto ocurre se denomina equinoccio que significa igual noche, es decir, la duración del día es igual al de la noche en todo el planeta, excepto en los polos donde se da una zona de transición del día a la noche y viceversa en el polo opuesto, la que se podría denominar como anochecer y amanecer polar respectivamente.

Para comprender mejor esto nos podemos auxiliar de un globo terráqueo, el que ha sido fotografiado en la 4 posiciones clave del año, es decir, en los solsticios y equinoccios, pero la vista es la de un observador ubicado en el sol, por lo que se observa precisamente la parte iluminada por el astro. Nótese que el flash de la cámara ilumina exactamente el centro del globo, que es el lugar de la mayor incidencia solar.

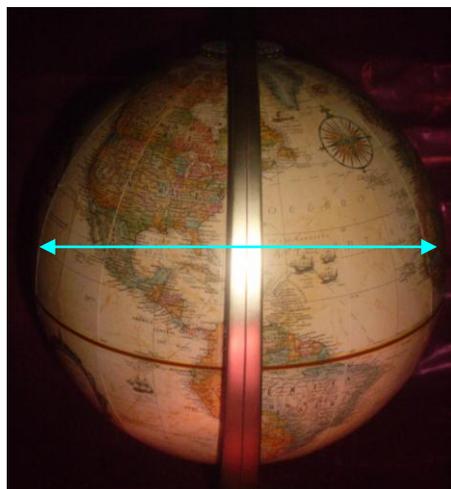


Imagen N° 52 Solsticio de verano

Si miramos la imagen N° 52 veremos que México se encuentra de frente al observador, es el momento en que comienza el verano, es decir el solsticio, (alrededor del 21 de junio). Si trazamos una recta horizontal que pase por el Distrito Federal podemos ver de manera gráfica la duración del día, si hacemos lo mismo con la imagen N° 54 y las comparamos, tendremos una clara noción de la razón por la cual varía la extensión de los días y las noches a lo largo del año terrestre.

En la imagen N° 53, ubicada abajo a la izquierda se observa de manera muy clara que México se ha alejado ligeramente del sol, es el equinoccio de otoño, momento en que de frente al observador está el Ecuador, por esta razón, los días y las noches tienen la misma duración. Esto se puede comprobar de forma sencilla midiendo la parte visible de un paralelo y su contraparte hemisférica, se verá que son iguales.



Imagen N° 53 Equinoccio de otoño

En la imagen N° 54 México se ha "levantado" y ya casi no se ve, es el inicio del invierno y como es lo contrario del verano, ahora los días serán más cortos y las noches largas, lo que se aprecia en la longitud visible de los paralelos en los dos hemisferios, dado que en el sur estará comenzando el verano.

En la imagen N° 55 se han completado $\frac{3}{4}$ del año y estamos en presencia del equinoccio de primavera, o sea, la igual duración del día y la noche, ya que la



Imagen N° 55 Equinoccio de primavera

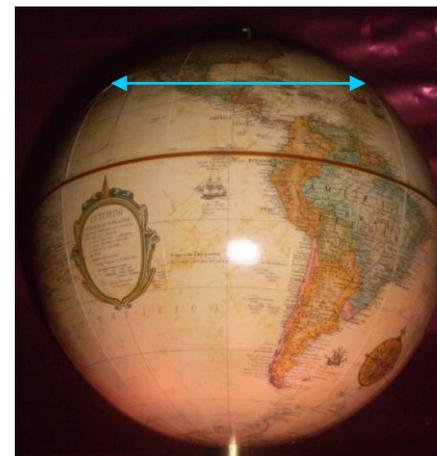


Imagen N° 54 Solsticio de invierno

Tierra va avanzando hacia la posición en la que en el hemisferio norte será verano, cuando realice un giro completo, es decir una vuelta alrededor del sol, o lo que conocemos como año terrestre. Conocer estos cambios es algo fundamental, sin embargo, esto no nos sirve si no tenemos una forma de representar el movimiento aparente del Sol respecto de la Tierra y puesto que tanto la trayectoria descrita como la superficie de nuestro planeta son curvilíneas, se requiere realizar una simplificación que lleve el

desplazamiento a una superficie plana para representarla en dos dimensiones, (sistema comprensible para nosotros por ser la manera como hemos conocido el mundo desde los tiempos más remotos).

A través del tiempo se han creado diferentes formas de plasmar en un plano el espacio y específicamente respecto del movimiento del sol en relación a nuestro planeta podemos mencionar la montea solar², ampliamente utilizada antes del endiosamiento de la tecnología y el olvido de los elementos naturales. En la actualidad, uno de los métodos más usados en arquitectura, por ofrecer una mayor precisión para nuestros fines, es la carta solar o proyección estereográfica, que consiste en un trazado sobre un plano horizontal de las trayectorias solares para todo el año en una determinada latitud y dado que todos los puntos del planeta comprendidos en esa línea geográfica recibirán de igual forma los rayos luminosos, el trazo será aplicable a cualquier lugar de la Tierra ubicado en un mismo paralelo. A partir de las proyecciones estereográficas se puede obtener la dirección de las sombras de cualquier objeto aledaño al elemento arquitectónico que estemos estudiando de manera muy exacta, en cualquier momento del día, mediante el transportador de azimut y la mascarilla de sombreado. El primero está definido por un conjunto de círculos concéntricos que permiten obtener la altura solar, la altitud angular y el azimut. Con la mascarilla de sombreado podemos determinar los ángulos horizontales y verticales de las sombras en cualquier momento del día o el año. De esta forma, podemos contar con una herramienta de trabajo de alta precisión para predecir el comportamiento de una edificación en términos del asoleamiento, con la cual podemos tomar decisiones de diseño adecuadas a las necesidades y al contexto, tales como asoleamiento en épocas de frío o protección de los rayos solares en tiempo de calor, sin perder la condición de iluminación natural necesaria para el edificio.

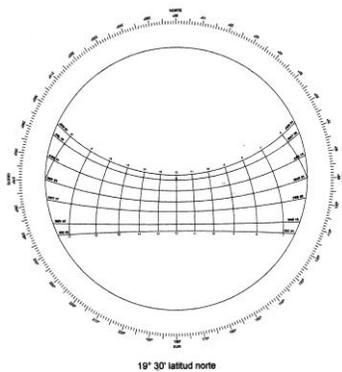


Imagen N° 56
Proyección estereográfica

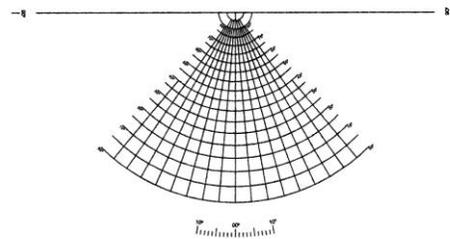


Imagen N 57 **Transportador de azimut y altitud**

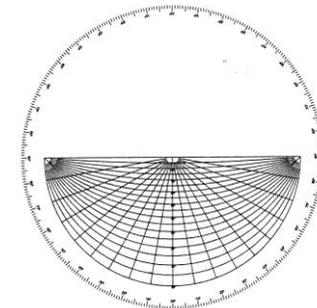


Imagen N° 58 **Mascarilla de sombreado**

² Para un estudio detallado de la montea solar ver; El sol en la mano, estudios de iluminación, orientación y relojes solares, Miguel Bertrán de Quintana, Ed. UNAM, Escuela Nacional de Arquitectura, 1982

3.1.2.- Construcción de la proyección estereográfica en planta

Para realizar la construcción y aplicación de la estereográfica, es necesario comprender antes algunos conceptos pues de lo contrario se podría incurrir en errores debidos fundamentalmente a las convenciones a las que se ha debido llegar para que nuestro mundo funcione (se debe mencionar que aún cuando su construcción puede ser algo complicado, la aplicación de este método, es muy sencilla), además si requerimos un estudio muy específico para un lugar puntual, debemos entender cuáles son las variaciones que se dan para poder discernir con seguridad que estamos haciendo lo correcto.

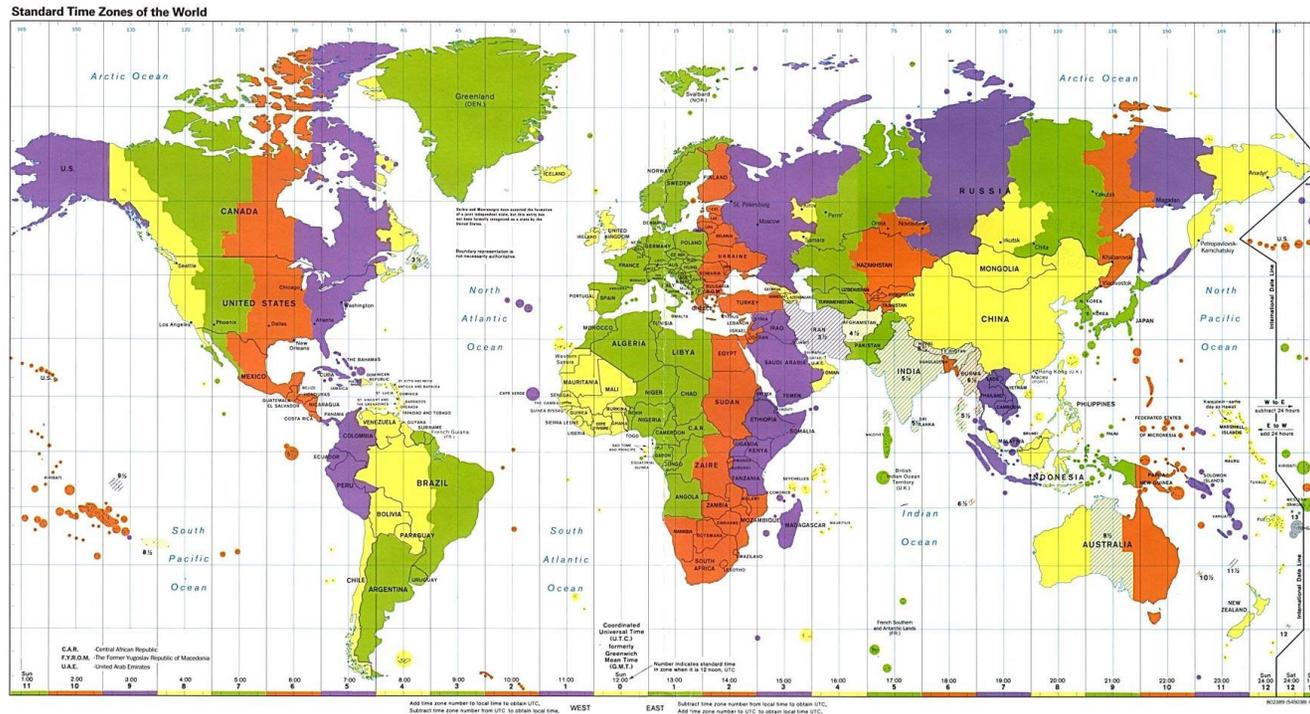


Imagen N° 59 husos horarios con vigencia en todo el mundo¹

ser estrictos en relación al sol, el mediodía debería ser el momento en que sus rayos caen en un plano vertical con orientación norte-sur, sobre la posición que ocupamos, sin embargo esto querría decir que el mediodía avanzaría a la misma velocidad que el gran astro, sobre nuestro planeta, obviamente esto no es práctico y es por eso que se han establecido los husos horarios, que son

Si bien todos nos regimos por una hora oficial, esta es una convención y de hecho en México está reglamentada por ley desde el 1° de enero de 1922, en que por un acuerdo se estableció que “las horas en los Estados Unidos Mexicanos se contarán de 0 a 24, empezando a la media noche tiempo medio”³, esta ley con muchas modificaciones ha llegado hasta nuestros días, incluyendo las correspondientes a los horarios de verano, pero si quisiéramos

³ Publicado en el diario Oficial de la Federación el 20 de diciembre de 1921, bajo el Gobierno de Álvaro Obregón

24 y ocupan 15° en gajos, cortando la Tierra de sur a norte y aunque tratan de ajustarse a estos, en la práctica siguen la geografía política (imagen N° 59), por lo que en un mismo meridiano pueden existir diferentes horarios, razón por la cual al aplicar la proyección estereográfica, podríamos estar errados en la hora y por lo tanto en la inclinación que atribuimos al sol, si desconocemos esto.

Entonces cuando queremos conocer el horario real, recurrimos a lo que denominamos Tiempo Solar Verdadero (TSV), que depende de la Hora Oficial (HO), el meridiano del lugar (Me), así como la longitud geográfica (LG) y la Ecuación del Tiempo (ET), de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$TSV^4 = HO + \frac{Me - LG}{15} + ET$$

Donde,

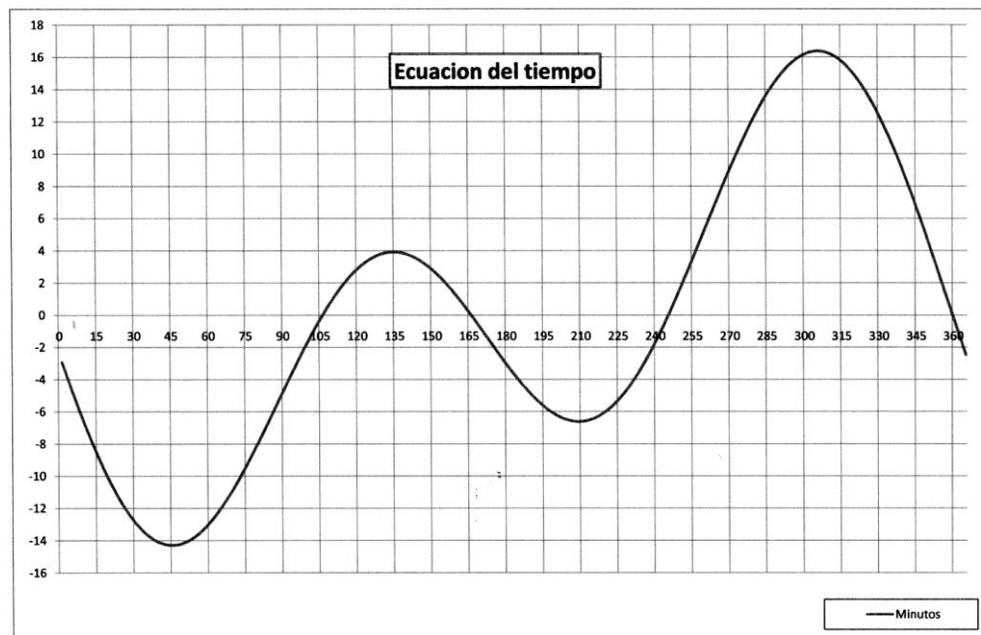
HO: Hora oficial imperante +/- cambios por horario de verano

Me: Meridiano por el cual se rige la hora oficial del lugar

LG: Longitud geográfica del sitio a estudiar

ET: Ecuación del tiempo

De lo anterior todo se puede obtener de manera sencilla, excepto la ecuación del tiempo que corresponde a la diferencia diaria de la duración de un día real con uno de 24 horas y que por lo general se grafica a lo largo de un año, como se puede ver en la gráfica N° 3, donde se expresa en minutos positivos o negativos dicha diferencia. Esta disparidad se produce por el movimiento planetario, en el que la Tierra de acuerdo con la primera ley de Kepler, sigue una órbita elíptica alrededor del sol, pero la velocidad con la que sigue ese camino varía a lo largo del trayecto, dado que en concordancia con la segunda ley de Kepler el momento angular es constante. Esto puede ser entendido si hacemos pasar un eje perpendicular al plano de la



Gráfica N° 3 variación acumulada de la duración del día solar

⁴ T. Munner, Solar radiation and daylight models, Ed. Elsevier, 2004, p. 10

eclíptica por el centro del sol y lo llamamos L, el área que barre la Tierra sobre el plano mencionado con centro en L, es igual en tiempos t iguales, verificándose la ecuación:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

Donde; L : momento angular
 r : distancia Tierra-sol
 m : masa de la Tierra
 v : velocidad del desplazamiento terrestre

La masa de la Tierra es constante y el momento angular también lo es, pero para que esto sea cierto, al aumentar el radio, la velocidad debe disminuir proporcionalmente, o sea que cuando nuestro planeta se encuentra más alejado del sol (afelio), viajará más lentamente que en el caso contrario (perihelio), donde la rapidez con la que se moverá será mayor.

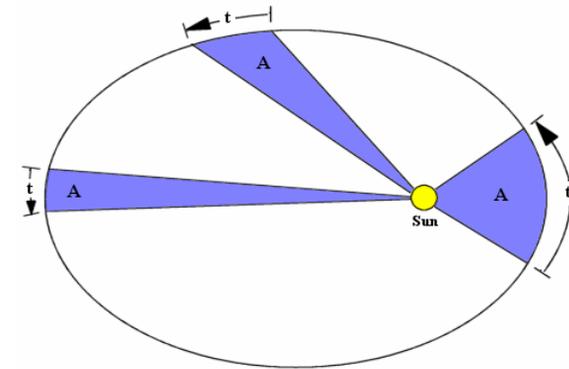


Imagen N° 60 esquema de la segunda ley de Kepler

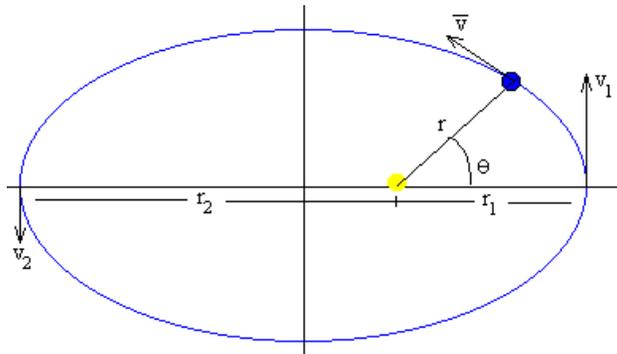


Imagen N° 61 Variación de la velocidad de la Tierra en relación con su distancia al Sol

Por otra parte, el movimiento de traslación terrestre implica una pequeña variación en la longitud del día, dado que si la duración de éste fuera constante, de un equinoccio a su contraparte, un observador fijo en la Tierra, cambiaría del mediodía a la medianoche, es por todo esto que los días no pueden ser iguales y para corregirlo se usa la ecuación del tiempo, que para obtenerla, nos auxiliaremos de la ecuación, provista por Spencer (1971)⁵;

$$ET = 0.0000075 + 0.001868 \cos (r) - 0.032077 \sin (r) - 0.014615 \cos (2r) - 0.040849 \sin (2r)$$

$$\text{Donde: } r = \frac{2 \times \text{PI} \times (\text{DN}-1)}{365}$$

PI : constante = 3.1416.....

DN : número del día anual con 1 enero = 1

⁵ J. W. Spencer, Fourier series representation of the position of the sun, Search 2, 172. CSIRO Division of Building Research, Melbourne, Australia. Nótese que la primera expresión ha sido cambiada, puesto que en el texto original aparece “0.000075”, error que al ser corregido da una mayor precisión a la fórmula. Nota del Dr. John Pickard, Graduate School of the Environment Macquarie University.

Si bien con las nociones anteriores podemos obtener de manera muy precisa las posiciones que ocupará la Tierra respecto del sol en un momento específico, para determinar cómo caerán los rayos solares sobre un objeto fijo en un punto terrestre, aún necesitamos conocer algunos conceptos que nos llevarán a una mejor comprensión de la forma como el sol nos ilumina a lo largo de un año.

Sin embargo aún debemos hacer algunas consideraciones básicas, en primer lugar necesitamos definir:

- ***Esfera celeste***; llamamos así a una esfera cuyo centro coincide con el de la Tierra y tiene un radio igual a la distancia media que nos separa del sol, es decir una unidad astronómica. $1 \text{ UA} = 1.496 \times 10^8 \text{ Km}$
- ***Horizonte celeste***; es un ángulo de 360° , entendido como una superficie horizontal que pasa por el punto donde se encuentra un observador.
- ***Zenit***; es un punto sobre la bóveda celeste ubicado en una línea que parte del centro de esta y que pasa por el lugar que ocupa un observador sobre la superficie terrestre, dicha línea se entiende normal al horizonte celeste. La contraparte del zenit es el Nadir que se encuentra prolongando la línea descrita, hacia el hemisferio opuesto del observador y hasta cruzar nuevamente la bóveda celeste.
- ***Ángulo cenital***; es un ángulo vertical medido haciendo centro en el lugar que ocupa un observador sobre la superficie terrestre, que va desde el horizonte hasta la posición que ocupa el sol.
- ***Ángulo acimutal o azimut***; es el ángulo horizontal que ocupa un plano vertical que contiene la posición del sol y del observador, medido desde el norte y que por definición es positivo en el sentido de las agujas del reloj.
- ***Declinación solar (DS)*** ⁶; es el ángulo medido entre el plano ecuatorial y el que forma el desplazamiento de la tierra alrededor del sol (plano de la eclíptica), que por convención se establece positivo cuando se inclina hacia el norte del Ecuador (verano en el hemisferio norte) y negativo en el caso contrario (verano en el hemisferio sur). Dicho ángulo varía desde 0° cuando se cruzan aquellos planos en los equinoccios, a 23.5° en los solsticios y puede ser medido con diferentes grados de precisión, de acuerdo con el método que se utilice para ello como los desarrollados por los investigadores Perrin de Brichambaut, Dogniaux y Page, por la Comunidad Económica Europea⁷, o como en nuestro caso que utilizamos la de Spencer.
- ***Día Número (), DN ()***; dado que nuestro estudio a pesar de involucrar cuestiones astronómicas, no requiere de una precisión tan exacta como lo que tiene que ver con la ciencia que estudia los planetas, para fines prácticos nos referiremos a un ciclo anual, que comienza el 1 de enero y termina el 31 de diciembre para la determinación del Tiempo Solar Verdadero y la Ecuación del Tiempo.

⁶ Vera Mella, Nelson, tesis doctoral dirigida por el Dr. José María Baldasano Recio, titulada "Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica, Universidad politécnica de Cataluña, 2005, Cap. 10, p. 5

⁷ Muhlia V., Agustín, Notas del curso: Solarimetría, 30 Semana Nacional de Energía Solar, Asociación Nacional de Energía Solar, Veracruz, 2006

Como ya hemos mencionado, para determinar la declinación solar nos apoyamos en la ecuación de Spencer⁸, expresada en minutos, donde:

$$\begin{aligned}
 \text{DS} &= (0.006918 - 0.399912 * \text{COS}((2 * \text{PI} / 365) * (\text{DN} - 1)) \\
 &+ 0.070257 * \text{SENO}((2 * \text{PI} / 365) * (\text{DN} - 1)) \\
 &- 0.006758 * \text{COS}(2 * (2 * \text{PI} / 365) * (\text{DN} - 1)) \\
 &+ 0.000907 * \text{SENO}(2 * (2 * \text{PI} / 365) * (\text{DN} - 1)) \\
 &- 0.002697 * \text{COS}(3 * (2 * \text{PI} / 365) * (\text{DN} - 1)) \\
 &+ 0.00148 * \text{SENO}(3 * (2 * \text{PI} / 365) * (\text{DN} - 1)) * 180 / \text{PI}
 \end{aligned}$$

Los valores de la declinación solar obtenidos para cada día del año pueden ser consultados en las tablas 1 y 2 en el anexo. Una vez conocidas todas estas variables, podemos acercarnos a graficar la trayectoria solar.

Dado que el movimiento aparente del sol se realiza a través del plano de la eclíptica es válido considerarlo constante para fines prácticos, pues la variación astronómica puede ser despreciada ya que no afecta de manera significativa a la iluminación natural en la arquitectura, sin embargo, un observador fijo en un punto sobre la superficie terrestre apreciará dicho movimiento a lo largo de un año con una variación máxima cercana a los 47° dado que en los solsticios tendrá un desplazamiento de +/- 23° 27' respecto del ecuador celeste inclinándose hacia los polos, como se aprecia en las imágenes 52 y 54, éste desplazamiento que tiene influencia sobre el clima, también ejerce una variación sobre los niveles de luz disponibles como se observará en el siguiente capítulo. En los equinoccios que corresponden al momento en que el plano de la eclíptica interseca al plano del Ecuador la declinación es 0° y los rayos solares caerán normales a cualquier punto sobre esta línea. Por otra parte, al ser una consecuencia del movimiento planetario, la declinación para cada día del año es constante, es decir que es independiente del punto donde se ubica un observador, sin embargo, la forma como los rayos del gran astro inciden sobre un punto en el globo terráqueo sí varía según la latitud, pero no por la longitud, o sea que a igual distancia del Ecuador terrestre, la geometría solar se comportará exactamente de la misma forma, por lo que se puede representar con mucha precisión el comportamiento de los haces luminosos por medio de las proyecciones estereográficas, que teóricamente en número de 90 describirían todas las latitudes, pero puesto que la humanidad habita el planeta en su inmensa mayoría fuera de los círculos polares, léase latitud 75° y esto en el hemisferio norte, porque en el sur la población no rebasa los 60°. Así con 75 gráficas podríamos tener toda la Tierra descrita, ya que cada una es simétrica con su contraparte hemisférica, pero esto sería un preciosismo y puesto que aquí describimos y damos las bases para obtener las estereográficas, solo presentamos la que corresponde a la Ciudad de México y puede ser consultada en la tabla 4 del anexo.

⁸ Iqbal, Muhammad, An introduction to solar radiation, Academic press, Toronto, 1983, p. 7, modificada según lo apuntado en la nota n° 6 del Dr. John Pickard

El método utilizado aquí para el trazo de la estereográfica considera un plano ecuatorial donde se dibujará en planta el paso solar para algunos días característicos, es el caso del 22 de junio y 22 de diciembre por ser los extremos, es decir los mayores valores para la declinación solar de acuerdo con nuestros cálculos, los días 21 de marzo y 23 de septiembre, que corresponden a los equinoccios, poseen los valores mas cercanos a cero y los demás días fueron elegidos en parejas considerando la similitud de la declinación solar, ya que corresponden al paso del sol con la misma inclinación en su viaje de sur a norte y viceversa y son 22 may / 23 jul, 22 abr / 23 ago, 20 feb / 23 oct y 20 ene / 23 nov.

El trazo de las trayectorias solares requiere determinar perfectamente el lugar donde se está ubicado, pero como ya dijimos, sólo es relevante la latitud, por otra parte la altura sobre el nivel del mar del lugar no tiene influencia puesto que el paralaje es ínfimo por la enorme distancia que separa a nuestro planeta del Sol, por lo que puede ser considerado cero. Esto es muy fácil de comprobar dado que si tomamos la distancia media Tierra-Sol, $149\ 597\ 890 \pm 500\ \text{km}$ ⁹ aproximada a 149.6 millones de kilómetros (1 UA) y la altura del monte Everest, mayor elevación de nuestro planeta (8848 m sobre el nivel medio del mar), el ángulo que se produce por una línea que hace centro en el sol y va del nivel del mar a la cumbre del monte, tendría una magnitud igual a 3.38×10^{-6} grados sexagesimales, lo que para nuestro interés, perfectamente puede ser considerado cero para fines prácticos, más aún, cuando nuestros edificios actuales no superan los mil metros de altura en el mejor de los casos, por esto podemos considerar paralelos los rayos que inciden en un momento, en cualquier parte de una obra arquitectónica.

Habiendo obtenido los datos de la declinación solar, para días característicos y con el dato de la latitud del lugar podemos entrar a la tabla 3 que se muestra en el anexo A, designando una dimensión de 10 unidades de manera arbitraria para el radio de nuestras gráficas, en primer lugar se determinarán los parámetros para el trazo de los meses (imagen N° 62) y para ello se calculará el radio r_s y la separación d_s . Como se puede observar, para cada día característico que ocupa la primera posición de la tabla, se coloca en la segunda columna de la misma, el valor de su declinación, en la tercera columna dicho número se transforma en radianes, en la

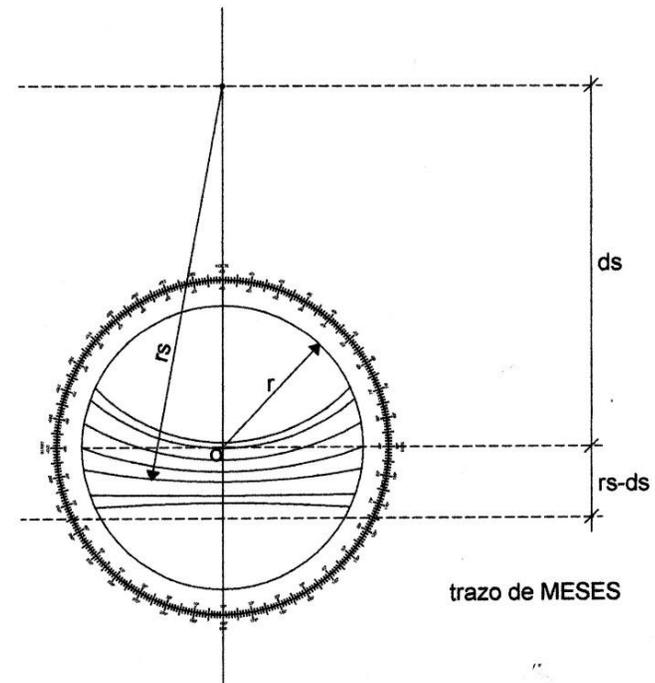


Imagen N° 62. Trazo de los meses

⁹ Iqbal, Muhammad, An introduction to solar radiation, Academic press, Toronto, 1983, p. 3

cuarta y quinta se calcula su coseno y seno, respectivamente, en la sexta posición se obtiene el producto de nuestro radio dado, por el coseno de la declinación. En la columna siete, se obtiene un valor fijo por multiplicarse el radio arbitrario por la latitud, que es fija (en este caso 19.5°) y en la octava columna se suma la latitud a la declinación. r_s y d_s se obtienen de dividir los valores de las columnas 6 y 7 por los de la columna 8 respectivamente. Finalmente, en la última columna se realiza la diferencia de r_s y d_s para ubicar el origen del trazo.

Para el trazo de las horas se han dispuesto en las filas solo 6 posiciones dado que el comportamiento de la gráfica es simétrica respecto del mediodía solar verdadero y encontramos en la primera columna las horas, en la segunda su correspondencia en grados y su conversión a radianes en la tercera, en la cuarta y quinta columna se realiza el cálculo de las funciones seno y tangente respectivamente, de las horas en radianes, que en las columnas seis y siete son multiplicadas por el coseno de la latitud. El centro del arco, r_h , para el trazo de las horas se obtiene de dividir el radio de dimensión 10 que inicialmente nos dimos, por la columna 6, d_h que es la distancia al eje de simetría se obtiene de la razón entre el radio y la columna siete. Finalmente, d_t se obtiene del producto entre el radio y la tangente de la latitud, como ambos valores son fijos el resultado también lo es y se traza desde el origen hacia el sur para los valores positivos.

Con estos parámetros se dibujan los arcos de acuerdo con las figuras 7 y 8 para obtener las proyecciones estereográficas que se deseen en cualquier posición del planeta. Es preciso notar que para trazar cualquier día en particular basta con realizar el cálculo y trazo según estas tablas, considerando el valor de la declinación solar de aquel día y la latitud de su posición geográfica.

Una vez construida la proyección estereográfica, para saber cómo será iluminado un espacio interior, colocamos nuestra planta con su fachada orientada como está (o estará) en la realidad haciendo centro en el origen de la estereográfica, considerando que el norte por convención se encuentra hacia arriba.

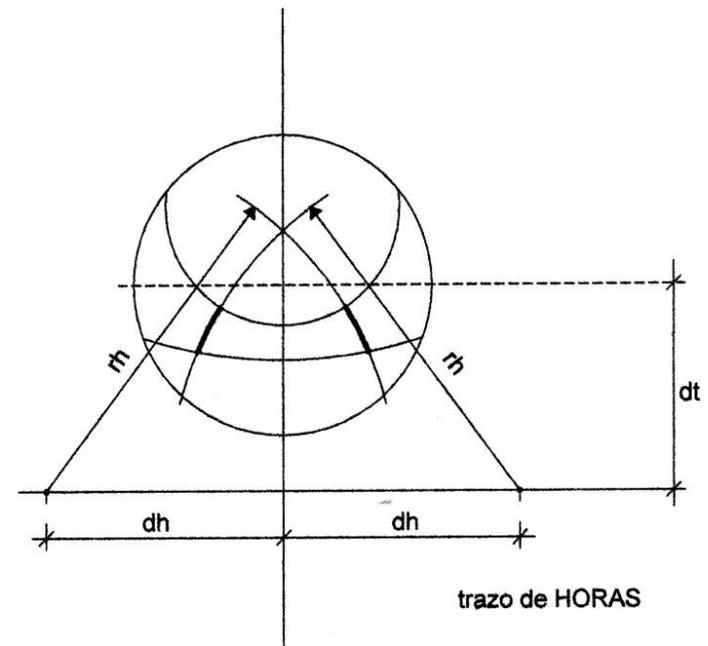


Imagen N° 63, Trazo de las horas

Para determinar los ángulos que tendrán las sombras o los rayos solares, nos auxiliaremos del transportador de azimut y el transportador de sombras, con los que haremos centro en el origen de nuestro sistema, el primero nos servirá para conocer el ángulo de incidencia de los rayos solares respecto del norte y la altura del sol, con el segundo se puede realizar el cálculo del

ángulo que tendrán las sombras proyectadas tanto en el plano horizontal como vertical, así podemos identificar la manera como será iluminado o sombreado cualquier lugar en cualquier hora del día, sólo debemos identificar en la proyección estereográfica el momento que queremos analizar.

3.2.- Factores ambientales

3.2.1.-Las nubes; dentro de los estudios de iluminación natural y especialmente si estos están referidos a la Ciudad de México, un factor de gran importancia son las nubes, dado que son las que producen las mayores alteraciones por presentar formas, tamaños, tonalidades y movimientos aleatorios e impredecibles, pero que sin duda inducen un aumento o disminución de la luz al interponerse en su camino. Si bien existe una clasificación en diez géneros de nubes, dada por la Organización meteorológica mundial¹⁰, estas a su vez para cada uno de los géneros se subdividen, pero aún si con estas subclasificaciones fuera suficiente, no se podría encontrar relaciones que nos permitieran establecer parámetros para su aplicación en nuestro tema de estudio, razón por la cual, para desarrollar algún tipo de metodología sería necesario estudiarlas de manera heurística, profundizando en campos como la teoría de los fractales, lo cual está muy alejado de nuestro interés por el momento. Por todo esto no ahondaremos en este tema, que si bien como se ha mencionado, es de gran importancia, puede ser motivo por si solo para una tesis al menos de maestría.

3.2.2.- La contaminación ambiental; es un factor que afecta en cierto modo de manera favorable la iluminación natural, porque actúa como pantalla difusora, dado que por lo general se manifiesta de manera bastante homogénea para una determinada zona, sin embargo, su afectación a la luz natural no ha sido estudiada para la Ciudad de México y no podríamos indicar aquí algún procedimiento para incorporarla en nuestros análisis, pero además, por tratarse de un agente nocivo para la sociedad se debería tender a su desaparición más que a encontrarle aspectos positivos, lo que gracias a la conciencia que aún de manera lenta asumen las personas esperamos que fructifique y en un futuro no lejano podamos admirar nuevamente aunque sea con un nuevo paisaje, los cielos, que pintó José María Velasco.

3.2.3.- La temperatura; es un elemento de relevancia fundamental en el diseño bioclimático, pero un buen proyecto de iluminación natural debe permitir la ganancia de calor en épocas de frío y evitar el ingreso de calor excesivo cuando el termómetro sube. Este es probablemente, el mayor reto del arquitecto que diseña iluminación natural, alcanzar el más alto grado de confort interior por medios pasivos la mayor parte del año, generando un ahorro energético al usuario, pero esto solo será posible considerando los materiales que intervendrán en la fachada en conjunto con las aberturas destinadas a iluminar.

¹⁰ Organización meteorológica mundial, Atlas Internacional de Nubes, Volumen I - Manual de observación de nubes y otros meteoros, 1993

3.2.4.- *Entorno urbano*; en la actualidad, dado el grave problema de sobrepoblación que enfrenta la mayoría de las metrópolis y especialmente en los centros políticos, económicos, financieros o de algún otro tipo, es común la proliferación de grandes edificios, tendencia que cada día es mas pronunciada y que se ve agravada por el vedetismo arquitectónico¹¹ en una desquiciada carrera por alcanzar la mayor altura, propiciando con ello los llamados cañones urbanos que tienen en las ciudades de los Estados Unidos de América el referente más antiguo (imagen N° 64). En ellos se produce una reducida incidencia solar, especialmente en los pisos mas bajos de las edificaciones por lo que mientras mayor sea la altura del cañón urbano y menor la separación de los

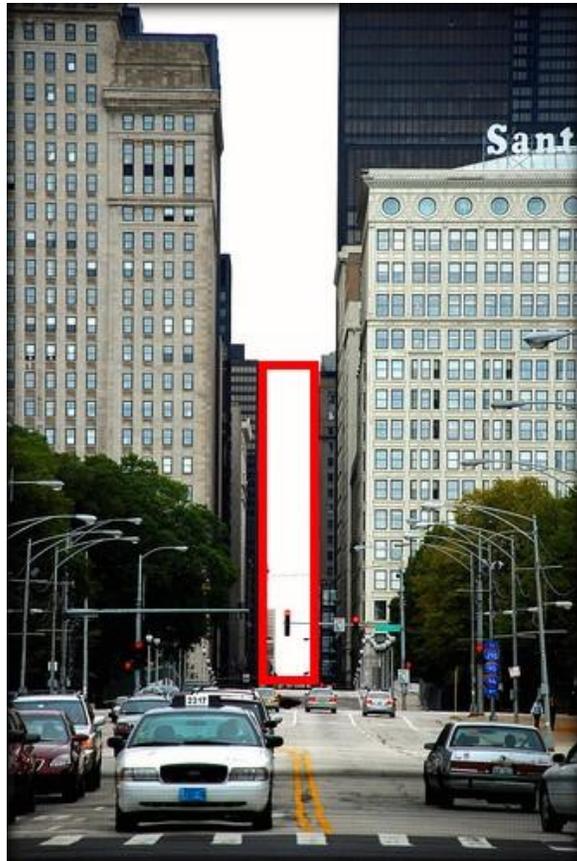


Imagen N° 64 Cañón urbano (en rojo), Chicago, Illinois. Estados Unidos de América

edificios de una acera y su contraria, también será menor la posibilidad de captar iluminación natural. A menor escala, a los edificios se sumarán los árboles, especialmente los altos y algún mobiliario urbano de gran volumen como pueden ser letreros publicitarios, torres de agua o antenas de radiocomunicación. También podemos mencionar algunas unidades de infraestructura como pasos sobre nivel o vías elevadas.

Todos los elementos anteriores pueden ser considerados relativamente fijos, dado que se alzan para ser utilizados a largo plazo y en caso de interrumpir en alguna medida el haz solar que llega a nuestra edificación, alguno de ellos o la combinación de estos, será necesario considerarlos para el análisis de la incidencia de luz en la misma y así realizar el proyecto de iluminación natural, pues representarán las posibilidades reales con las que se cuenta y definirán en una medida importante la conformación del proyecto arquitectónico en general.

Una forma de mitigar la falta de acceso a la iluminación natural, debida a las obstrucciones urbanas sería lograr una legislación que consagrara el “derecho al sol” que cada predio de la ciudad debería poder gozar, así mediante estudios de asoleamiento se podría establecer la altura y separación de las edificaciones con la que deberían regirse todas las obras nuevas, incluyendo aquellos proyectos en los que se derribe un edificio para construir otro. Indudablemente se puede pensar que esta es una gran utopía dada la enorme cantidad de intereses que se verían afectados, pero no es posible negar la formidable contribución que una medida de este tipo produciría en la calidad de vida de la ciudad y nuestra obligación como arquitectos es velar por el bien común antes que por el interés personal.

¹¹ Término que usamos para designar la irracional carrera por tener el edificio mas alto; de la ciudad, del país, del mundo...(Nota del autor)

3.2.5.- *Factores geográficos*; un componente del paisaje urbano que si bien no es edificado, afecta a los edificios de manera similar a los anteriores, son los montes que pueden ubicarse en los alrededores o dentro de una ciudad o las montañas que la pueden circundar y deben ser incluidos en el análisis del mismo modo que los del entorno urbano, ya que si están en el camino solar en relación con el predio que estemos analizando producirán alguna alteración, que puede ser benéfica o perjudicial según las características que nos interese estudiar y el clima del lugar. Esto se puede ver de manera dramática en la imagen N° 64 de la ciudad de Bogotá, Colombia rodeada de montañas andinas, por lo que los rayos solares directos son recibidos en un lapso mucho menor a otras ciudades ubicadas en planicies abiertas.



Imagen N° 65 Bogotá, Colombia

3.3.- Factores arquitectónico-constructivos

3.3.1.- *la orientación de las fachadas*; este es un factor crucial al momento de iniciar el diseño, pues de ellas exclusivamente se captará la luz natural, lo que sucederá en todos los niveles de una construcción (excepto en el último, donde también se puede captar por el techo, pero por representar un porcentaje muy reducido dentro de una ciudad, no consideraremos este elemento, tomando en cuenta además que por lo general los pisos elevados poseen buena iluminación natural), por esto la definición de los espacios al interior de los edificios juega un rol de primer orden, debiendo establecerse con claridad la vocación de cada área en función de las condicionantes ambientales del lugar, esto nos debe llevar a la conformación de un programa arquitectónico, que integre los elementos ambientales como requerimientos obligados. Si bien nuestro tema de estudio es la iluminación natural, no podemos obviar que la arquitectura debe ser integral. Así si estimamos que una cocina debe orientarse al norte en la Ciudad de México por ser el lado más frío y este un lugar caliente, del mismo modo, debemos estudiar los espacios de cualquier edificio pensando en la luz y las funciones que requieren de este recurso en orden decreciente, así podremos lograr un mayor nivel de eficiencia.

3.3.2.- *Los vanos destinados a iluminar*; serán otro elemento que se tiene que estudiar de manera acuciosa, en términos de lo que a las ventanas propiamente concierne, debemos decir que toda interferencia que ocurra en el camino de la luz hacia el interior de los espacios habitables, provocará una disminución de la misma, por lo que la abertura más eficiente será aquella que no tenga obstrucción alguna, es decir, lisa y llanamente el vano. Pero sabemos que esto no es posible en prácticamente la totalidad de los proyectos y es aquí donde comienza nuestra labor como diseñadores, pues la ventana más sencilla tendrá al menos un vidrio y ya

establecidas las orientaciones y la función de los espacios interiores, lo siguiente es considerar el tamaño y posición de las mismas. Como una consecuencia lógica diremos que inmediatamente después del vano, la ventana más luminosa será aquella que ocupe toda la fachada o sea, un vidrio colocado a hueso en el vano, pero en términos de la bioarquitectura se pueden producir problemas en el acondicionamiento térmico, acústico y lumínico, por lo que nos veremos en la necesidad de intervenir de alguna forma para evitar aquellas dificultades.

Basándonos tanto en la literatura existente en lo que a iluminación natural se refiere como en la experimentación realizada podemos afirmar que la posición de la ventana que produce la mayor penetración de luz solar es aquella en la que ésta se encuentra adherida al lecho bajo de la losa y dado que una superficie habitual de trabajo se encuentra a una altura mínima de 75 cm sobre el nivel de piso terminado, ésta medida podría ser considerada un límite inferior de la ventana destinada a iluminar, pero dado que la penetración de la luz está en relación directa con la altura de la fenestra, se pueden conseguir mejores resultados lumínicos si estas van de piso a techo por las mayores reflexiones que serán producidas.

En este punto debemos mencionar que habitualmente se piensa en las ventanas como elementos destinados a la comunicación visual y la iluminación, pero de manera general no se considera el aspecto térmico, por lo que estos elementos se transforman en grandes superficies por las que se gana calor en verano o se pierde en invierno, razón por la cual remarcamos la función que se quiere atribuir a este elemento, ya que a partir de realizar esta definición se dará también su configuración y así existirán ventanas para iluminar, para tener comunicación visual, para control térmico y ventilación, pudiendo obviamente cumplir más de una función a la vez.

Para conseguir la mejor iluminación sin sacrificar los aspectos térmicos, será necesario utilizar “sistemas de control solar”, como aquellos vistos en el apartado 2.3 del capítulo II, donde existe una enorme variedad de métodos que pueden ayudar en el diseño bioambiental, los que además nos deben permitir eliminar el deslumbramiento, puesto que nuestro trabajo consiste en lograr el máximo de eficiencia y el exceso de luz es también un elemento de discomfort, por lo que un buen diseño de iluminación natural debe permitir el ingreso de la mayor cantidad de luz, pero sin producir molestias en las cercanías de la ventana.

3.3.3.- El color y las texturas de los materiales usados en el interior de los espacios construidos, también contribuirán a modificar las condiciones de iluminación, por esto se debe pensar de acuerdo con el fin que deseamos conseguir, ya que colores claros, brillantes y superficies lisas producirán mayor reflexión de la luz y por el contrario, colores oscuros, superficies rugosas y mate, producirán el efecto de absorberla dando como resultado más oscuridad.

Además de todas estas consideraciones al momento de elaborar un proyecto arquitectónico debemos contemplar las características de nuestro usuario de manera particular, puesto que los niveles de iluminación requeridos dependerán también de la edad de los ocupantes, así como la naturaleza de la tarea visual a realizar y la rapidez con que deberá hacerse. De acuerdo con

esto, el diseño de interiores debería contemplar lineamientos generales, a ser observados por los ocupantes para ajustarse a la calidad de iluminación proyectada y dado que en la actualidad existe una amplísima gama de materiales de acabado, esto en ningún caso limitaría las posibilidades de cada usuario de lograr un ambiente adecuado a su gusto o estilo.

3.3.4.- Perímetro expuesto; otro elemento de gran importancia será la conformación de la planta, pues como ya quedó planteado de acuerdo con la literatura revisada, un edificio tendrá la posibilidad de ser iluminado naturalmente una distancia hacia el interior igual a 2.5 veces la altura de la ventana. Si se tratara de un volumen compacto de forma rectangular cuya sección sea igual a 5 veces la dimensión mencionada y con posibilidad de ventanas en sus dos fachadas no tendremos problemas para lograr nuestro objetivo puesto que de cada paramento recibirá luz solar,

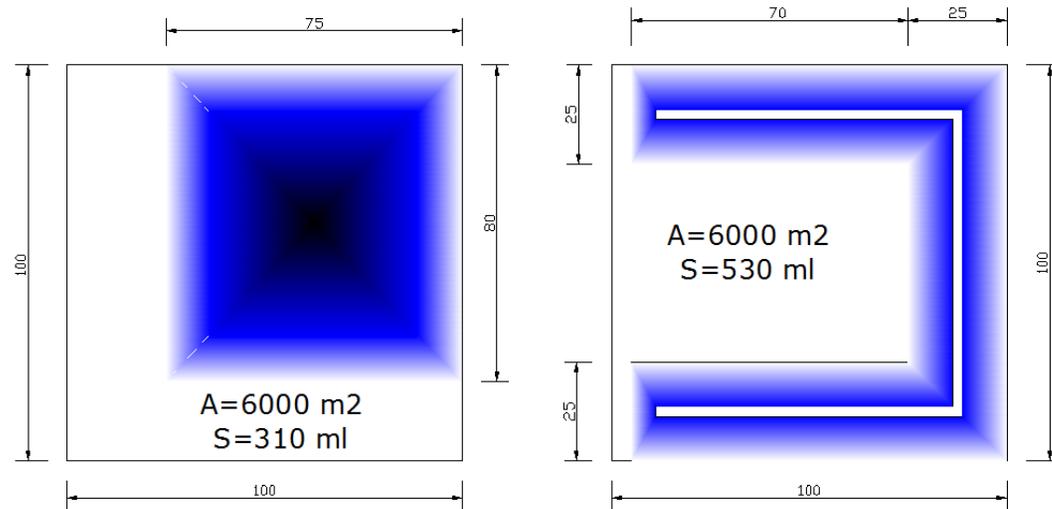


Imagen N° 66 comparación de dos plantas con igual área construida

sin embargo, muchas veces los requerimientos de área interior en conjunto con el terreno disponible impulsan a los diseñadores a realizar grandes cubos con plantas que se acercan al cuadrado, dejando extensas áreas interiores sin iluminación natural. Pero esto obedece más a falta de creatividad que a otra situación pues como nos proponemos demostrar aquí podemos recurrir a lo que Fuller Moore¹² llama “finger plans” o lo que podríamos traducir como “plantas en forma de dedos”, es decir, varias ramas o alas de un edificios unidas por un cuerpo central, en el cual las circulaciones se realizan por el centro de ellas, de modo que las áreas útiles siempre tienen acceso a la luz natural. En la imagen N° 66 podemos observar dos plantas con igual área de construcción (6000m²) sobre un terreno cuadrado de 10,000 m², en el cual un 40% se puede destinar a terreno permeable, además hemos considerado una altura de entrepisos de 4.50 m que en la actualidad se aplica a muchos edificios denominados “inteligentes”. Así teóricamente podríamos iluminar 11.25 m desde la fachada de manera eficiente por medios naturales, a la izquierda tenemos una planta rectangular de 75 m x 80 m, en la cual ingresa luz solar por el perímetro quedando toda la parte central sin este recurso, mientras en el esquema de la derecha que tiene forma de grapa sólo la parte central destinada a circulaciones quedaría en

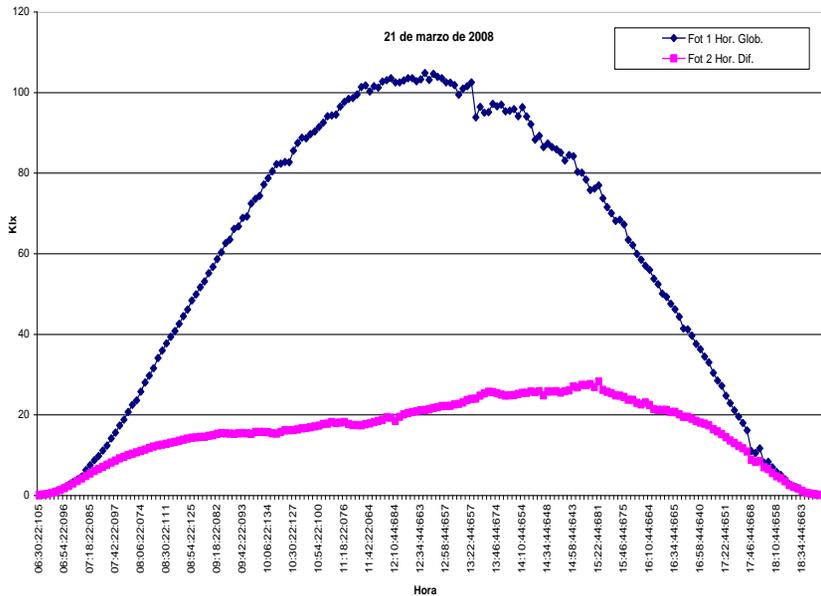
¹² Fuller Moore, op. Cit. p. 63

penumbra, todo esto sin utilizar otros sistemas más que la ventana como elemento de iluminación diurna. Es preciso acotar que evidentemente el sistema propuesto por Moore requiere mayor área de fachada, lo que sin duda nos remite a un problema de costos, al que no entraremos por no ser tema de esta investigación, sin embargo, mencionaremos que de realizarse un trabajo de este tipo, tendría que considerarse la reducción energética como amortización de la inversión a lo largo de la vida estimada del edificio. Por otra parte, la solución de dedos de Moore otorga mayores posibilidades de realizar un mejor acondicionamiento climático del objeto arquitectónico, ofreciendo además amplias oportunidades estéticas.

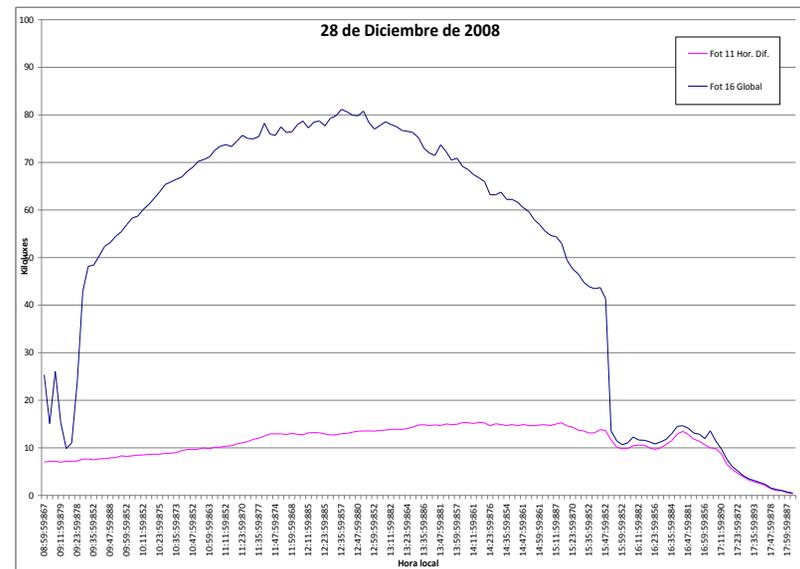
3.4.- Estrategias para la Ciudad de México

Aunque a simple vista podría pensarse que en la Ciudad de México no existe una marcada distinción entre las estaciones del año, en términos de la luz natural disponible al menos, podemos afirmar que éstas se dan, pero no en estricto apego a lo que marca el calendario y para una mayor precisión de los periodos que abarcan, sería necesaria una investigación que los determinara de forma más concluyente.

No obstante lo anterior y de acuerdo con nuestra investigación podemos afirmar que en la época de invierno es posible encontrar días totalmente despejados con niveles máximos de iluminación global que superan con dificultad los 80 kiloluxes, como sucede

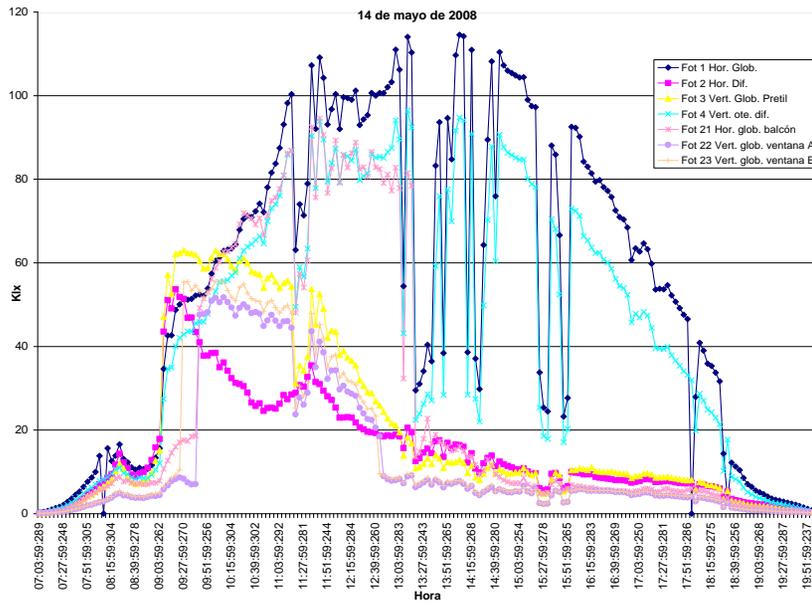


Gráfica N° 4 Luz global y difusa en primavera

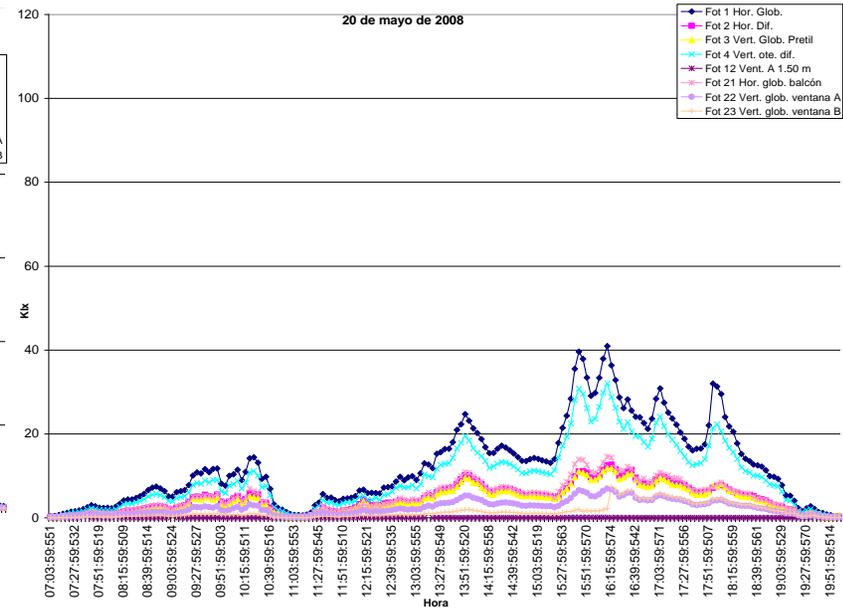


Gráfica N° 5 Luz global y difusa en invierno

el día 28 de diciembre de 2008 (gráfica N° 5), que en la parte central del día, de las 9:30 a las 15:40 hrs. muestra una parábola muy bien formada, (los extremos se ven modificados por obstrucciones a la luz directa que no alteran el propósito que buscamos aquí de comparar los niveles superiores de luz), mientras en la primavera encontramos valores generalmente de 100 klx. como la que se puede apreciar en la gráfica N° 4 del 21 de marzo de 2008 que describe una curva de Gauss perfecta lo cual nos arroja una diferencia de al menos 20% para un día totalmente despejado, lo que nos permite poner en duda la aplicación del método del día claro, pues estamos hablando de un factor de error inaceptable. Debido a que no disponemos de datos es imposible comparar dos días nublados con similares características, sin embargo, si estamos en condiciones de asegurar que el tipo de nubosidad será preponderante, pues en presencia de nubes claras los valores pueden ascender a máximos de 115 000 luxes, como sucede el 14 de mayo de 2008 (gráfica N° 6), mientras con nubes oscuras estos rangos pueden caer por debajo de los 40 000 luxes, tal como se muestra en la gráfica del 20 de mayo de 2008 (gráfica N° 7), es decir, solo 6 días después, con lo que, por una parte, se demuestra la reiterada necesidad de un estudio acerca de la influencia de las nubes en la iluminación y por otra, la inaplicabilidad de un método concebido para otras latitudes y condiciones de luz solar, por lo que nuestras soluciones estarán definidas más por el tipo de luz que por los niveles de iluminación global o difusa.



Gráfica N° 6 día nublado claro



Gráfica N° 7 día nublado oscuro

Por este motivo, deberemos identificar en primer lugar, las formas como incide la luz solar en los edificios y a partir de allí definir las estrategias. Como ya sabemos, la luz solar barre el planeta en un recorrido de este a oeste durante el día y que se desplaza a lo largo del año, en el caso de la Ciudad de México, desde un ángulo de 47° sur a 94° norte, medidos sobre un plano horizontal, como se aprecia en la imagen N° 67 . Conociendo esto sabemos que de manera general, los rayos directos del sol iluminarán las habitaciones con orientación este por la mañana, las que ven al sur una gran parte del día y aquellas que miran hacia el oeste por la tarde y puesto que nuestro objetivo es describir estrategias de control solar que permitan dar pautas de diseño bioclimático, necesariamente tendremos que tomar en cuenta la parte térmica de la luz del gran astro, aunque lo haremos de forma somera.

La primera consideración que haremos es que en el ámbito laboral, por lo general se estipula un horario de 9 am a 6 pm hora local, pero no debemos olvidar que la proyección estereográfica considera tiempo solar verdadero, por lo que debemos realizar la conversión para trabajar con los mismos parámetros, en segundo lugar necesitamos hacer la corrección del horario de verano, que por decreto está estipulado para iniciar el primer domingo de abril y terminar el último de octubre¹³.

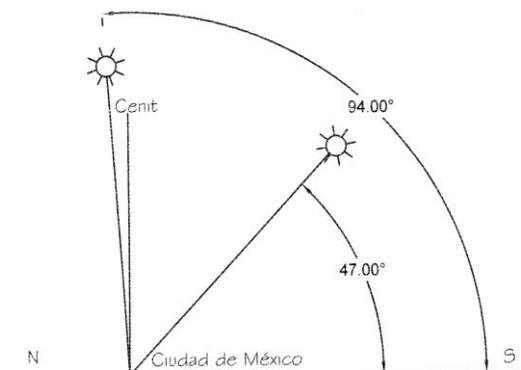


Imagen N° 67 declinación para la Ciudad de México

Puesto que una variación de 1° en la latitud muestra una diferencia que puede ser despreciable en el ángulo de la declinación solar y que de la Ciudad de Cuernavaca hasta la ciudad de Tula de Allende se pasa de 19° a 20° , despreciando el error, podemos considerar, que todo el Valle de México está comprendido en la latitud de $19,5^\circ$, además en términos de los meridianos, el punto más alejado hacia el este es la comunidad de El Salto, que se encuentra ubicada en la longitud $98^\circ 43'$ y hacia el oeste, La Marquesa está situada en $99^\circ 22'$, es decir a menos de 1° por lo que el cálculo del tiempo solar verdadero producirá una diferencia de aproximadamente 3 minutos de un punto al otro, por lo cual fijar una posición en 99° de longitud oeste para la Ciudad de México, para fines prácticos es algo perfectamente factible con un margen de error máximo de 22 minutos de grado o 1 minuto 46 segundos de reloj, que representa un error del 0.1%. Por tanto, hablar de un lugar situado en $19,5^\circ$ de latitud norte y 99° de longitud oeste nos permitirá estudiar el comportamiento de la

luz solar en términos generales, pero lo que de ahí se derive puede ser aplicable a cualquier punto del Valle de México.

Por otra parte, hemos visto en los apartados anteriores de este capítulo, que por las convenciones necesarias para el funcionamiento de la sociedad, los horarios son ajustados y no representan la realidad astronómica, por lo cual el momento de entrada en las oficinas, es diferente del que representa la estereográfica (ver imagen 68), así cuando el reloj marca las 9 horas del

¹³ Decreto Presidencial 2002, México, D. F., Viernes 1 de marzo de 2002 Diario Oficial de la Federación

28 de octubre en la Ciudad de México, en realidad son las 8:40 hrs. en tiempo solar verdadero y por las diferencias debidas a la rotación terrestre y que se reflejan en la ecuación del tiempo, se producirá una oscilación que decrecerá hasta las 8:10 hrs. en los días alrededor del 10 de febrero para nuevamente aumentar a las 8:20, el 4 de abril, momento en que se produce un salto como resultado del cambio al horario de verano, por lo que la hora real será las 7:20 oscilando hasta un máximo en las 7:27 y un mínimo en las 7:17, para nuevamente aumentar hasta las 7:40 el 28 de octubre, donde se regresa al horario normal¹⁴.

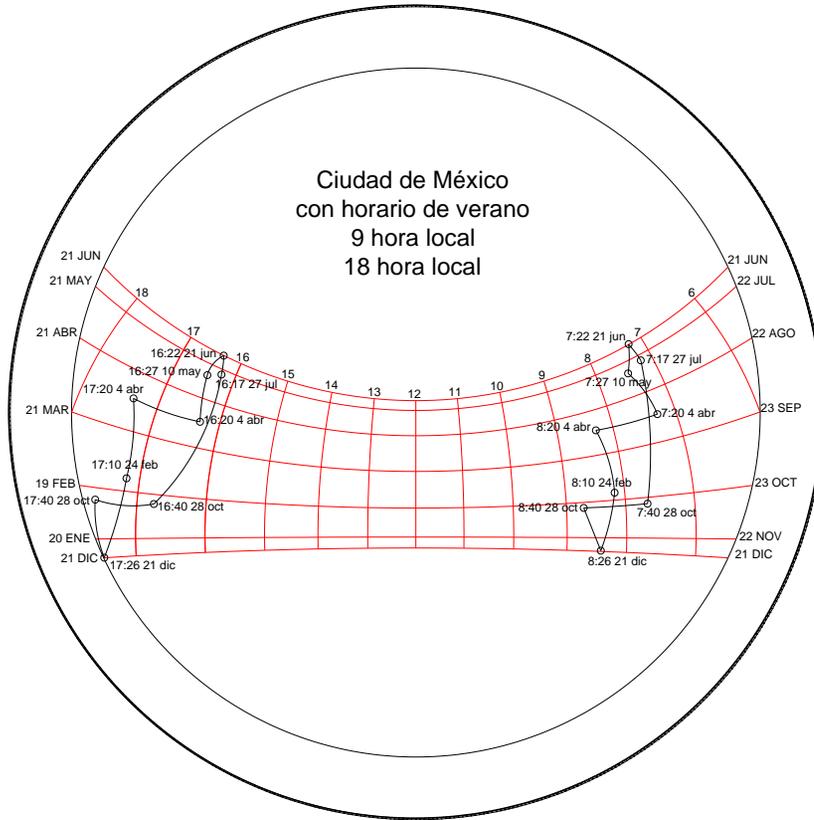


Imagen N° 68 estereográfica para el horario de oficina



Imagen N° 69 variación horaria en tiempo solar verdadero 9 a. m.



Imagen N° 70 variación horaria en tiempo solar verdadero 6 p. m.

¹⁴ Considerando que los días marcados por el decreto oficial pueden ir del 1 al 7 de abril, así como del 25 al 31 de octubre, hemos considerado el día medio para realizar este ejercicio, fijando las fechas en 4 de abril y 28 de octubre. (nota del autor)

Por la tarde ocurre una situación similar con una curva idéntica a la matinal y los mismos desfases, pero que en la gráfica solar tiene un comportamiento diferente. Un análisis con la mascarilla de sombreado nos permite determinar, que el sol incidirá de manera directa con ángulos verticales que variarán a partir de los 18° para el horario matinal que hemos elegido, es decir las 9 a.m. hora local, para las orientaciones desde el este hacia el sur. Por la tarde, la situación es más crítica, puesto que a las 6 p.m. hora local, el mínimo ángulo de incidencia es de 8° y además por la carga térmica que han acumulado las edificaciones, durante el día, se debe proteger especialmente este aspecto en las orientaciones desde el oeste hacia el sur.

Mañana	Angulo vertical	Tarde	Angulo vertical
Este	20° - 35°	Oeste	8° - 32°
15° SE	18° - 35°	15° SO	8° - 34°
30° SE	18° - 42°	30° SO	9° - 40°
45° SE	20° - 42°	45° SO	10° - 50°
60° SE	23° - 50°	60° SO	12° - 68°
75° SE	28° - 63°	75° SO	18° - 90°
Sur	34° - 82°	Sur	8° - 90°

Cuadro N° 8

De acuerdo con lo anterior, la fachada más crítica será la que tiene vista hacia el oeste y de ahí, de manera decreciente los giros

Para un rayo de luz con inclinación de 18°					
Ángulo	Separación	Reducción	Vista	% ancho	% vista
0°	0.65	0.00	0.65	32.50	100.00
15°	1.15	0.52	0.63	57.27	54.81
30°	1.56	1.00	0.56	78.14	36.01
45°	1.87	1.41	0.46	93.69	24.52
54°	2.00	1.62	0.38	100.00	19.10

Para un rayo de luz con inclinación de 8°					
Ángulo	Separación	Reducción	Vista	% ancho	% vista
0°	0.28	0.00	0.28	14.06	100.00
15°	0.79	0.52	0.27	39.46	34.41
30°	1.24	1.00	0.24	62.17	19.58
45°	1.61	1.41	0.20	80.65	12.32
60°	1.87	1.73	0.14	93.63	7.50
74°	2.00	1.92	0.08	100.00	3.88

Cuadro N° 9

(que hemos considerado cada 15°) hasta los 75° SO, le siguen las fachadas iluminadas por la mañana con orientación SE, desde 15° hasta la vista hacia el sur, siendo ésta última, la más favorable, pues si bien recibe un rayo en un ángulo vertical de 8°, su dirección horizontal es de 65° hacia el oeste, lo que lo hace cercano a la rasante, pero además en la época de más frío, cuando esta penetración puede ser considerada más bien positiva que negativa (ver cuadro N° 6).

En concordancia con lo anterior, realizamos un estudio gráfico con deflectores horizontales para determinar los ángulos óptimos y las separaciones que estos elementos deberían tener para evitar totalmente el paso del rayo directo al interior de un espacio y encontramos que existe una contradicción inherente a este tipo de sistemas, - las posiciones que permiten las mejores vistas son las que tienen la peor

relación entre el ancho de los deflectores y la separación entre ellos puesto que para evitar el paso del haz solar directo deben estar muy juntos y en el otro extremo, aquellos en que existe una mayor distancia entre las piezas, por el ángulo de inclinación requerido prácticamente bloquean la visión -. En el cuadro N° 8 que está directamente relacionado con la imagen N° 71 podemos apreciar las variaciones debidas a los diferentes ángulos con los que se puede bloquear el rayo solar incidente, donde hemos considerado las inclinaciones de 18° y 8° por ser éstas las más desfavorables a lo largo del año, a las 9 a.m. y 6 p.m. respectivamente, las dos correspondientes a la hora local. Por la mañana, el sol se encuentra en ascenso, por lo que al interrumpir el haz luminoso más bajo, se estarán restringiendo todos los demás, pero por la tarde el fenómeno es el contrario, por lo que mas allá de las 18 hrs, la obstrucción del sol podría conseguirse apoyándose en elementos del entorno pero si estos no existen, irremediamente los deflectores horizontales fallan en la posibilidad de conseguir vistas al exterior, por lo cual se debería buscar otras estrategias para una solución adecuada.

Sin embargo, es preciso apuntar que dentro del horario considerado (9 a 18 hora local), en el caso del rayo con 8° de inclinación vertical el porcentaje de visibilidad horizontal es mínimo (3.9%) y en el rayo matinal de 18°, la visibilidad a través de la ventana es de un 19.1%, es decir, estos artefactos, aunque sea de forma limitada, permiten un contacto con el exterior aún en condiciones de total bloqueo de la luz directa.

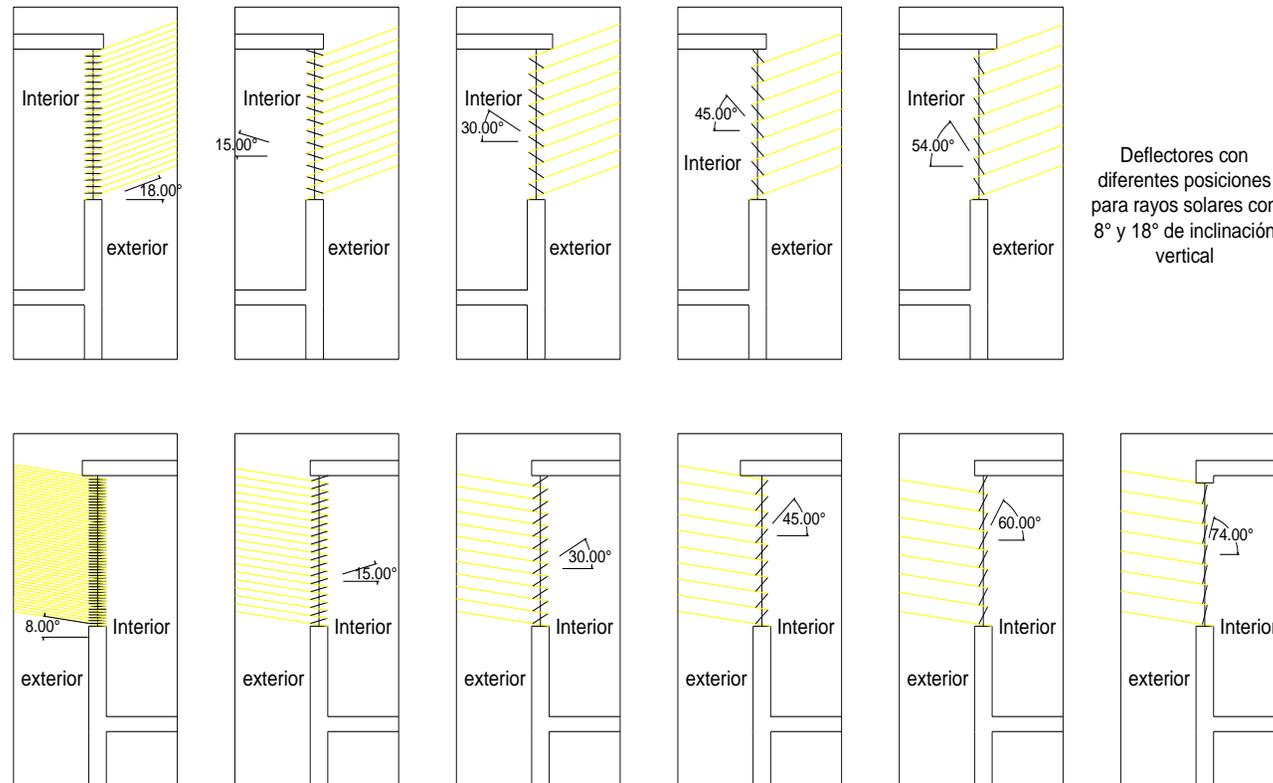


Imagen N° 71 Estudio gráfico de diferentes ángulos para los deflectores con dos rayos solares incidentes

Capítulo IV

Estudios de iluminación natural en un modelo real

“lo que tu llamas sombra es la luz que no ves”

Henri Barbusse

Introducción

La fuente de luz que nos interesa estudiar para ser aplicada en la arquitectura es el sol y aunque en los apartados anteriores hemos explicado los elementos necesarios para una correcta comprensión y aplicación de los principios rectores de la iluminación natural, el camino de la teoría es vasto, muy agreste y probablemente no rendirá sus frutos hasta que sea puesta en práctica y confrontada con la realidad, debido a esto hemos llevado a cabo un ejercicio de medición de la luz de manera científica, en campo, utilizando para ello un modelo real, estudiando diversas variables con la finalidad de entender de mejor forma el comportamiento de la luz en la arquitectura.

La investigación que hemos realizado para el estudio del comportamiento de la luz natural al interior de un inmueble ha requerido realizar diversas modificaciones y alteraciones en el recorrido del rayo luminoso, valiéndonos de elementos diversos como la reducción de ventanas, la colocación de un plafón o la instalación de deflectores o louvers. Pretendíamos encontrar parámetros que nos ayudaran a una mayor comprensión del fenómeno lumínico, para su aplicación en la arquitectura.

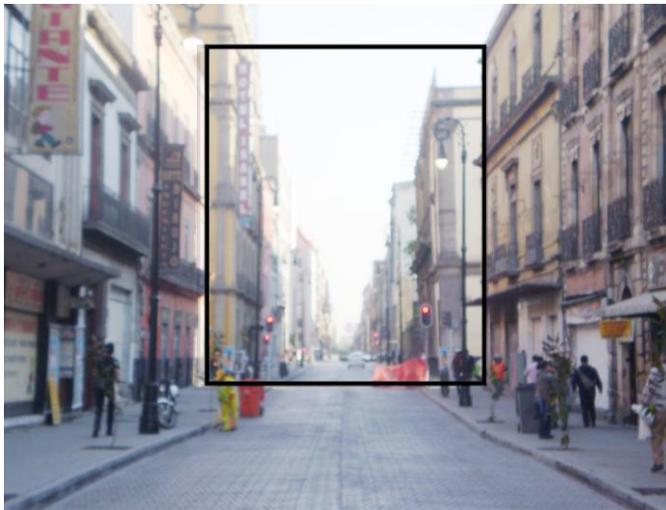


Imagen N° 73 Cañón urbano en Isabel la Católica



Imagen N° 72 Ubicación Isabel la Católica # 67

El método que ha servido de base para llevar a cabo nuestros análisis es el uso de gráficas que se desprenden de planillas de cálculo, ocupando el software de Microsoft Excel para tal efecto. Los datos, una vez que han sido recolectados por el adquisidor que los almacena, son transferidos a la computadora donde se limpian y son ordenados manualmente, fijando un margen para cada día entre las 6 am y las 6 pm. En la construcción de gráficas se estableció una plantilla base para contar con los mismos colores asignados a cada variable y de esta forma tener una mejor percepción visual de lo acontecido con los diferentes elementos estudiados.

Se construyeron gráficas para todos los días que duró la recolección de datos y a partir de las diversas fases y algunas condiciones climáticas asociadas, se seleccionaron las que a nuestro juicio representan de mejor forma las alteraciones naturales o artificiales del ingreso de luz, de esta manera, nos dimos

a la tarea de realizar con la mayor prolijidad la selección de aquellos días que mejor representaran el fenómeno que se deseaba mostrar. Así de los 57 días analizados, para cada uno de los cuales se realizaron al menos dos gráficas, (exterior e interior), lo que se muestra en este capítulo representa una pequeña parte, pero consideramos que es la más significativa y relevante, permitiéndonos avanzar hacia nuestro objetivo que ha sido el de conocer mediante la práctica el comportamiento de la luz al interior de los espacios habitables.

4.1.- Estudio de campo en un modelo real

Nuestro objeto a estudiar se ubica en el Centro Histórico de la Ciudad de México y se trata de un edificio catalogado por el INAH como inmueble con valor patrimonial, que si bien ha



Imagen N° 75 Fotómetro para luz difusa

sufrido algunas modificaciones, tanto los muros como las ventanas conservan las características originales (ver imagen 72). Se cuenta con plantas

arquitectónicas y cortes del inmueble y la investigación se realizó en la planta alta, en un cuarto con fachada hacia la calle. El predio mencionado se encuentra ubicado en la calle Isabel la Católica # 67, Centro Histórico de la Ciudad de México (en lo sucesivo ILC 67) y tiene orientación hacia el este con una ligera inclinación de 7° respecto del norte.

Producto de la conformación de la ciudad, los edificios no reciben luz directa del sol cuando este aparece en el horizonte, sino que esto se da dependiendo de las obstrucciones existentes en el lugar y en nuestro caso de estudio no existe excepción, por lo que para el edificio de ILC 67, la barrera está constituida por los inmuebles ubicados en la acera opuesta, que por contar con una altura ligeramente mayor a nuestro objeto de estudio, cubren el sol matinal hasta un horario que va de las 7:10 a las 8:40 TSV aproximadamente a lo largo del año (imagen N° 73).

El estudio realizado, consistió en la medición de los niveles de iluminación natural del inmueble tanto en la planta alta que tiene vista hacia la calle Isabel la Católica como en el exterior y la azotea del mismo, donde se midió específicamente iluminación global y difusa en las posiciones que a continuación se detallan; El aparato 1 (imagen N° 74), se utilizó para medir la luz proveniente de toda la bóveda celeste, procurando que no tuviera obstrucciones,



Imagen N° 74 Fotómetro para luz global

razón principal para ubicarlo en la azotea junto con los asignados con los números 2 al 4. El segundo fotómetro se montó sobre una maqueta provista de un aro delgado cuya función es la de cubrir el rayo directo del sol y de esta forma captar solo la luz difusa (imagen N° 75), el tercer fotorreceptor fue colocado en una maqueta de modo que su normal quedara en posición horizontal mirando en dirección oriente (imagen N° 76). El equipo de medición asignado con el número 4 se instaló en una maqueta provista de un aro de sombreado, para captar iluminación difusa proveniente del oriente (imagen N° 77. Los fotómetros con los números 12 al 20 quedaron dentro del salón de acuerdo con la distribución mostrada en las imágenes N° 78 y 79, colocados sobre tubos de cartón de modo que captaran la luz global horizontal a una altura de 75 cm por arriba del nivel de piso. En el exterior de la habitación se montó el sensor N° 21 sobre el barandal del balcón, de modo que permitiera medir iluminación global horizontal, ubicándolo equidistante a las puertas y en éstas se insertaron aquellos signados con los números 22 y 23 para captar el flujo luminoso incidente de manera perpendicular a la fachada.



Imagen N° 77 Fotómetro para luz difusa oriente

La captura de datos se llevó a cabo en el verano dividida en dos periodos; del 20 de marzo al 14 de abril y del 4 al 29 de mayo, ambos de 2008.

Para realizar las mediciones en toda la investigación se utilizó una serie de fotómetros marca Licor modelo LI-210SA conectados a un equipo adquirente de datos marca Agilent, modelo 34970A con capacidad para almacenar información, que en nuestro caso abarcó un periodo cercano a tres días.

Los valores obtenidos se transfirieron a la computadora con una periodicidad cercana a tres días, para no saturar el adquirente, en formato de archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel, por lo que el último paso antes de realizar las gráficas consistió en limpiar los datos de aquellos inservibles o erróneos, para dar una mayor claridad a estas representaciones. Además de los equipos anteriores, se instalaron dos cámaras, una dentro del salón y otra en la azotea, la primera para observar lo que sucede en el interior de la habitación y poder corroborar acontecimientos que no son explicables por las gráficas, alteraciones que de otro modo quedan como dudas. La segunda cámara se ubicó apuntando al zenit, de esta forma, podemos saber con



Imagen N° 76 Fotómetro para luz global oriente

certeza si llueve, hay nubes o está despejado. Las cámaras prestan un servicio invaluable al momento de analizar los datos, pues registran las imágenes con fecha y hora, lo que las hace tan preciadas. Todos los equipos utilizados son propiedad del incipiente Laboratorio de Iluminación Natural del Posgrado de la Facultad de Arquitectura de la UNAM y si bien pueden parecer cuantiosos, debemos acotar que resultan mínimos y escasos.

Resumen de la posición y función de los sensores de iluminación

Fotómetro	Azotea
1	Horizontal global
2	Horizontal difusa
3	Vertical global (ubicada en el pretil)
4	Vertical oriente difusa
	Salón (distancia a de la fachada)
12	Ventana A 1.50 m
13	Ventana A 3.00 m
14	Ventana A 4.50 m
15	En medio 1.50 m
16	En medio 3.00 m
17	En medio 4.50 m
18	Ventana B 1.50 m
19	Ventana B 3.00 m
20	Ventana B 4.50 m
21	Horizontal en balcón
22	Vertical a 75cm puerta A
23	Vertical a 75cm puerta B



Imagen N° 78 Colocación de los fotómetros

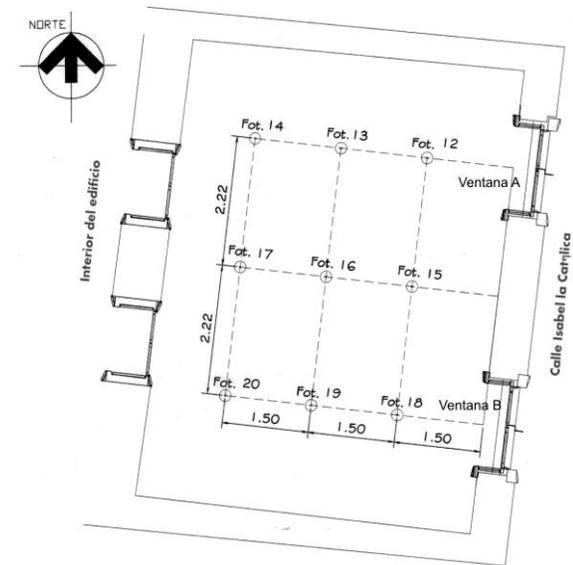


Imagen N° 79, Ubicación de fotómetros al interior del salón

Como ya fue mencionado, para interpretar los datos recolectados, se utilizó la planilla de cálculo Microsoft Excel con la cual se realizaron gráficas de líneas conservando la nomenclatura de colores para una mejor visualización y los días analizados se seleccionaron tomando en consideración aquellos que resultaron clave por cambios en el interior del salón, por alteración de las condiciones de la ventana o por presentar situaciones óptimas, ya sea en la adquisición de datos o en las características climáticas o ambientales, lo que significa que procuramos realizar una colección de tipos de días. Si bien hemos dicho que se requiere un estudio con mayor profundidad acerca de la condición de las nubes, tratamos de abarcarlas, más que desde su propia clasificación, del punto de



Imagen N° 80 Puerta A en condiciones normales

vista de la cantidad de luz percibida tomando como parámetro principal la luz global, por lo que hablamos de; día despejado, con pequeñas interferencias y muy nublado, la otra condición es la ventana y sus modificaciones y por último se consideró, el plafón.

Una vez instalados todos los equipos, hacia el día 20 de marzo, se comenzaron a realizar lecturas y el último tercio del mes la medición se llevó a cabo sin realizar cambios en el interior del salón (Imagen N° 80), por este motivo, se puede considerar como información de control, ya que se presentan días con características diferentes, como por ejemplo, del 20 al 22 de marzo hubo cielo con escasa nubosidad, el 23 se presentó parcialmente nublado y el 24 fue un día que se presentó cubierto una parte importante del mismo.



Imagen N° 81 Puerta A cubierta

El día 3 de abril se cubrieron las ventanas con cartón corrugado en cuya cara exterior se adhirió una lámina de aluminio, (Imagen N° 81), esto se realizó en la parte inferior, dejando solo la parte superior con paso directo de incidencia solar, lo que significó reducirla de 4.76 m² a 1.46 m², esto representa una disminución del 69.3%. O sea que la reducción permitió iluminar con un 30.7% de la luz original. El día 4 de abril se debió reforzar el tapiado de la ventana dado que la cinta del tipo gris para equipos de aire acondicionado, con la que se pegaron los cartones no soportó y fue necesario reemplazarla por cinta canela que se adhirió de mejor forma a la madera de la ventana.



Imagen N° 82 Plafón de hule blanco a 2.75 m

Dado que la habitación tiene un área de 48.7 m² las ventanas representan un 9.8% de la misma y al reducirse quedaron en 3%. Los siguientes días se ocuparon para tener mediciones con este elemento que alteró las condiciones originales del salón.

El paso que se dio a continuación fue instalar un plafón de hule blanco a una altura de 2.75 m en todo el interior de la habitación, (Imagen N° 82) esto ocurrió el 9 de abril. Para ello se realizó un tendido de cables que atravesaron el recinto de forma paralela a la fachada, (Imagen N° 83) detenidos en armellas colocadas en las paredes laterales cada 50 cm, inicialmente atoradas en taquetes de madera, pero dado que no resistían la presión producida por el peso del hule, fue necesario sustituirlos por taquetes plásticos, que dieron un mejor



Imagen N° 83 Tendido de cables a 2.75 m

resultado. El hule utilizado tenía dimensiones de 4 x 8 m por lo que se colocó en dos segmentos que cubrieron el salón en la dirección de las ventanas, es decir oriente-poniente, la parte que sobró después de alcanzar la pared posterior del salón, quedó desplegada hacia el suelo, cubriendo el muro para servir de reflectante de la luz. Sin embargo, haber dejado el hule de esta dimensión causó grandes dificultades al momento de su colocación, por el peso del tramo colgante.



Imagen N° 84 Tendido de cables a 3.05 m



Imagen N° 85 Ventana con deflectores de luz

En la colocación se usaron cables eléctricos, calibre 20, de dos hilos, recubiertos y para lograr la mayor horizontalidad del plafón se usaron tensores de 3" que prestaron un excelente servicio. Las mediciones se realizaron hasta el día 14 de abril de 2008, momento final de la primera etapa, ya que los sensores debieron ser trasladados a otro lugar y además fue retirado el plafón.

Para la segunda etapa de captación de datos se requirió nuevamente la colocación del plafón, pero ahora se ubicó a una altura de 3.05 m, (Imagen N° 84) y el sistema utilizado fue el mismo que el anterior, es decir taquetes de plástico, armellas, tensores y cable eléctrico de dos hilos, pero en esta ocasión al tener la experiencia anterior, se prefirió cortar el hule en dos partes cada tramo, por lo que dos secciones correspondieron al plafón propiamente tal y las otras dos se adosaron a la pared posterior.



Imagen N° 86 Confección de los deflectores

El día 3 de mayo se realizó nuevamente la colocación de los sensores en el salón, esta actividad se efectuó manteniendo el mismo orden numérico usado en la primera etapa, para facilitar el trabajo de análisis al conservarse la nomenclatura de colores en las gráficas de Excel. En esta ocasión también se instaló una cámara de video para capturar todo lo ocurrido dentro del salón. Se mantuvo el sistema inalterado hasta los días 17 y 18 de mayo que no se consideran en nuestro análisis, dado que se realizó otra investigación manteniendo el salón en completa oscuridad.

El día 19 de mayo se mantuvo abierta durante toda la jornada la ventana A, mientras la B permaneció completamente tapiada y al día siguiente, 20 de mayo, se invirtió el proceso tapiando la ventana A y abriendo la B, sin embargo el clima no fue de gran ayuda puesto que hubo nubosidad muy densa y lluvia gran parte de los dos días.

El 23 de mayo se instaló una serie de deflectores o "louvers" en la ventana B, (Imágenes 85 y 86), estos fueron confeccionados con cartón corrugado de 40 cm x 1.20 m, que para ser mantenido de forma horizontal debió rigidizarse con dos tiras del mismo material a 5 cm del borde mas largo, estas tiras se hicieron doblando el cartón en tres partes formando una sección triangular de aproximadamente 4 cm de lado y luego fueron adheridas al cartón principal con cinta canela. Para detenerlas en la ventana se realizó un tendido de hilo en forma de red sobre la que se hicieron descansar los deflectores a una distancia de 26 cm, ésta separación se obtuvo del menor ángulo de incidencia solar, producido en el instante en que el sol rebasa el edificio de enfrente, que define un ángulo de 27° (Imagen N° 87), de este modo, se impidió totalmente la penetración de luz solar directa, captando únicamente luz difusa. Para mejorar la iluminancia, los deflectores ubicados por sobre 1.80 m se cubrieron con lámina de aluminio, con la finalidad de producir una mayor reflexión de los rayos solares, los que quedan por debajo de esta medida, se mantuvieron sin alteraciones para no producir destellos molestos. El día 25 de mayo se retiró el plafón muy temprano para realizar la comparación de un día utilizando los deflectores, con y sin plafón.

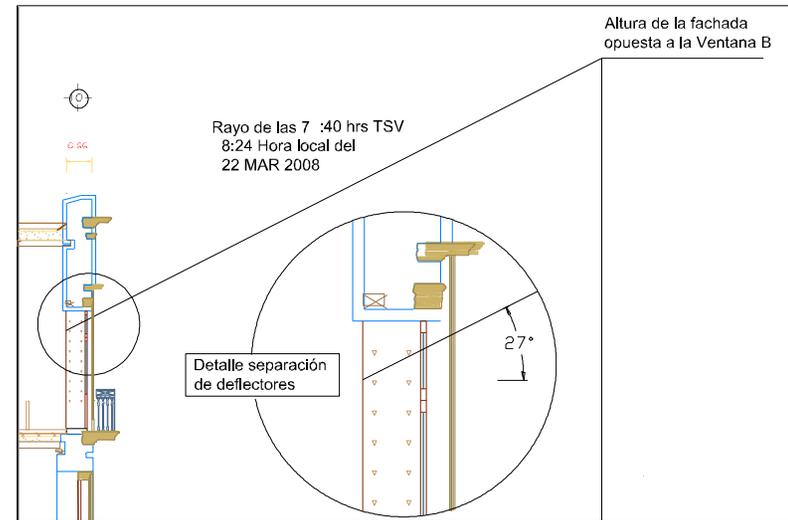
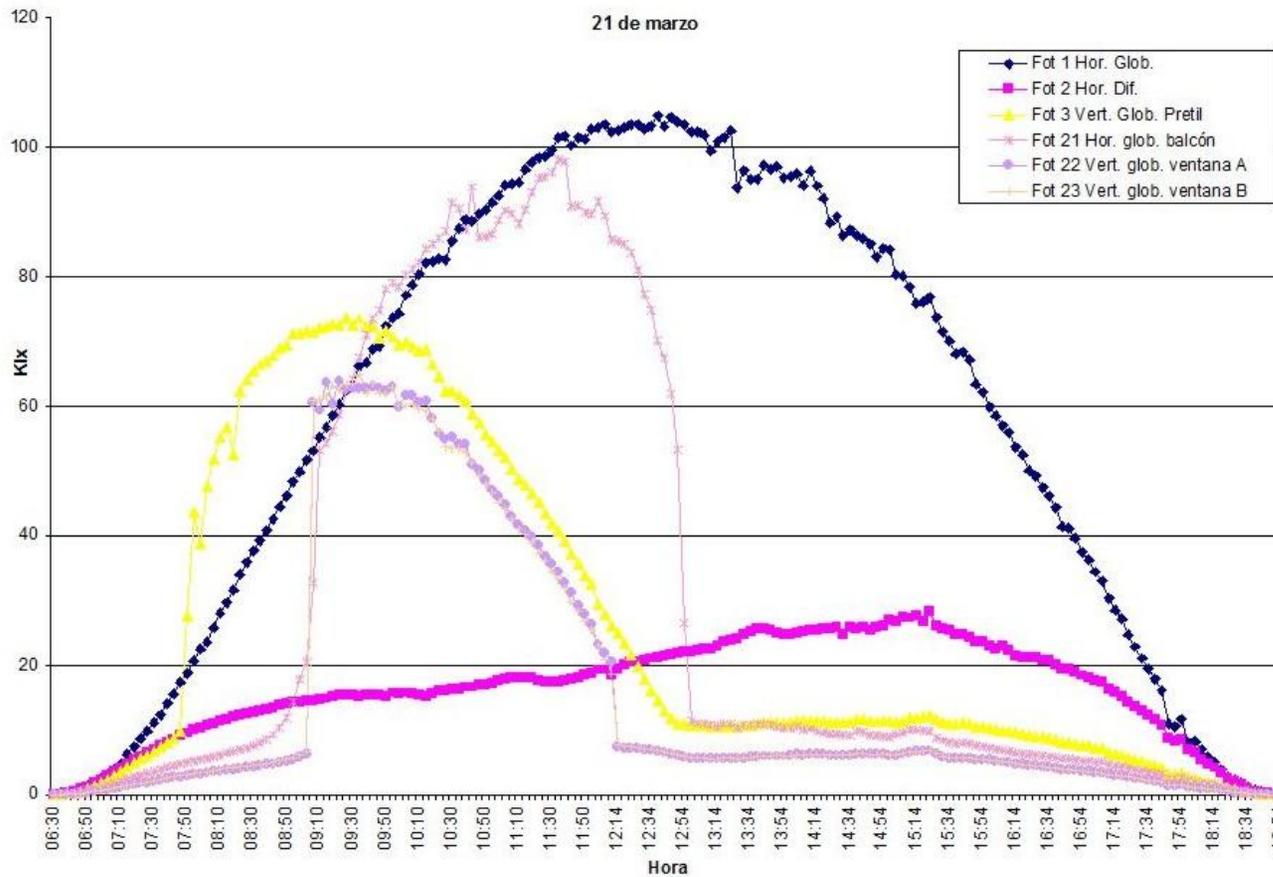


Imagen N° 87 corte de la fachada, proyección del rayo solar y separación de los deflectores de luz.

4.1.1.- Día despejado, salón en condiciones normales; 21 de marzo de 2008

Hemos elegido este día por presentar durante prácticamente toda la jornada condiciones estables en lo que a luz se refiere, como puede



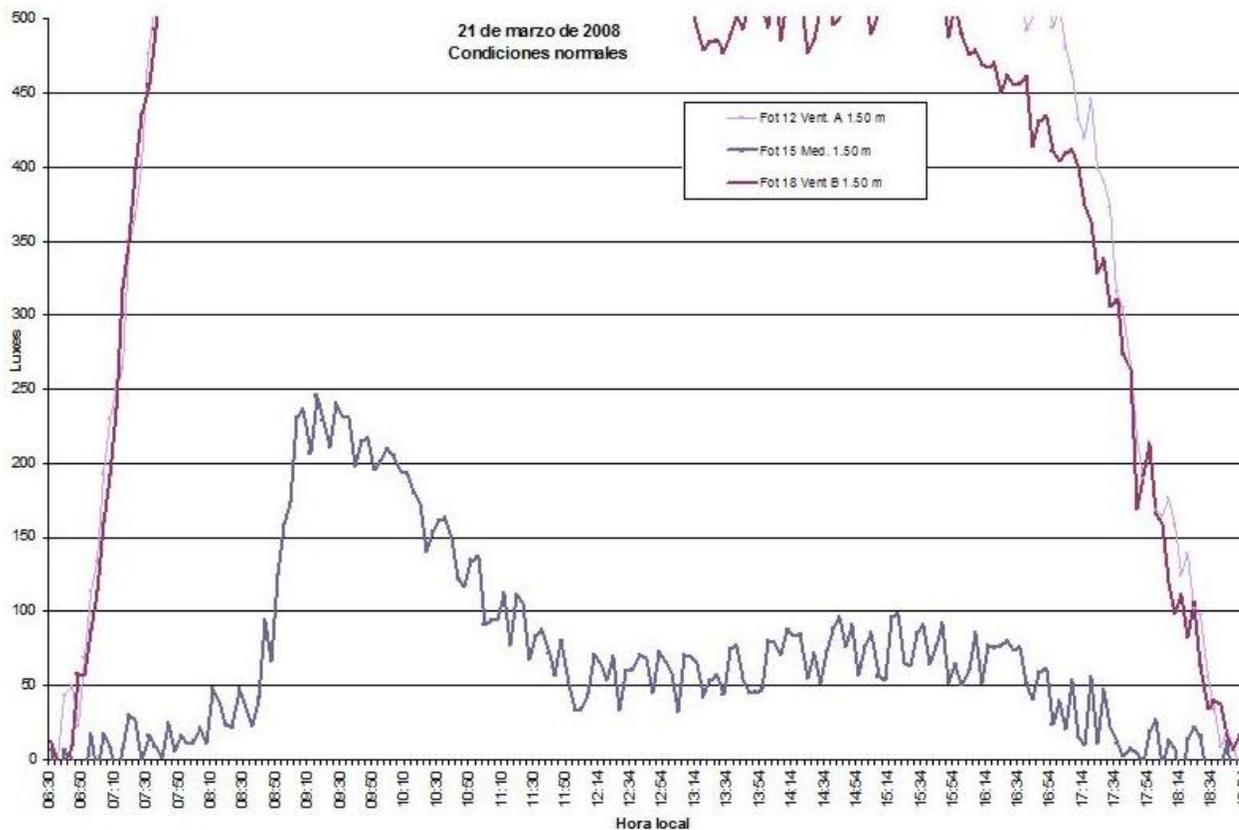
Gráfica N° 8 Condiciones exteriores de iluminación

ser apreciado en la gráfica N° 8, donde la curva de iluminación global muestra una parábola casi perfecta que revela la total ausencia de nubes. Por esta razón podemos considerar este día como parámetro de control pues todas las demás variables muestran comportamientos que podríamos llamar normales,¹ puesto que se presentan sin mayores alteraciones, de esta forma podemos realizar su comparación y entender los cambios que se producen por la introducción de diferentes modificaciones, ya sean naturales o artificiales.

Por su parte, el fotómetro N° 2 que mide luz difusa refleja un aumento sostenido, que podríamos asemejar a una línea recta prácticamente desde el amanecer hasta las

¹ Si bien esta denominación es arbitraria, solo queremos denotar que éste es nuestro punto de partida para la investigación sin otro tipo de consideraciones.

15:22 hrs., momento en el cual alcanza su cúspide y comienza a decaer, aquí es interesante hacer notar que su máximo no coincide con la luz global como podría pensarse y puesto que ambos aparatos están en la azotea del edificio, no existen elementos tales como muros u otros que pudieran reflejar luz hacia el sensor interfiriendo en las mediciones y aunque no podemos asegurar de manera categórica el origen del aumento en los niveles de iluminación difusa por la tarde, creemos que este se debe a la contaminación ambiental, pues en esta parte de la ciudad hay una mayor concentración de esta, que por la mañana no está presente de manera significativa, pero al avanzar el día se manifiesta con mayor fuerza, lo que podría explicar que se incremente precisamente la luz difusa al actuar las partículas como pantalla que difunde los rayos solares, como refuerzo de esta idea se puede apreciar el mismo comportamiento



Gráfica N° 9 Condiciones interiores de iluminación a 1.5 m de la fachada

exactamente a las 15:22 hrs en los aparatos que miden luz global en el pretil, el barandal y las ventanas.

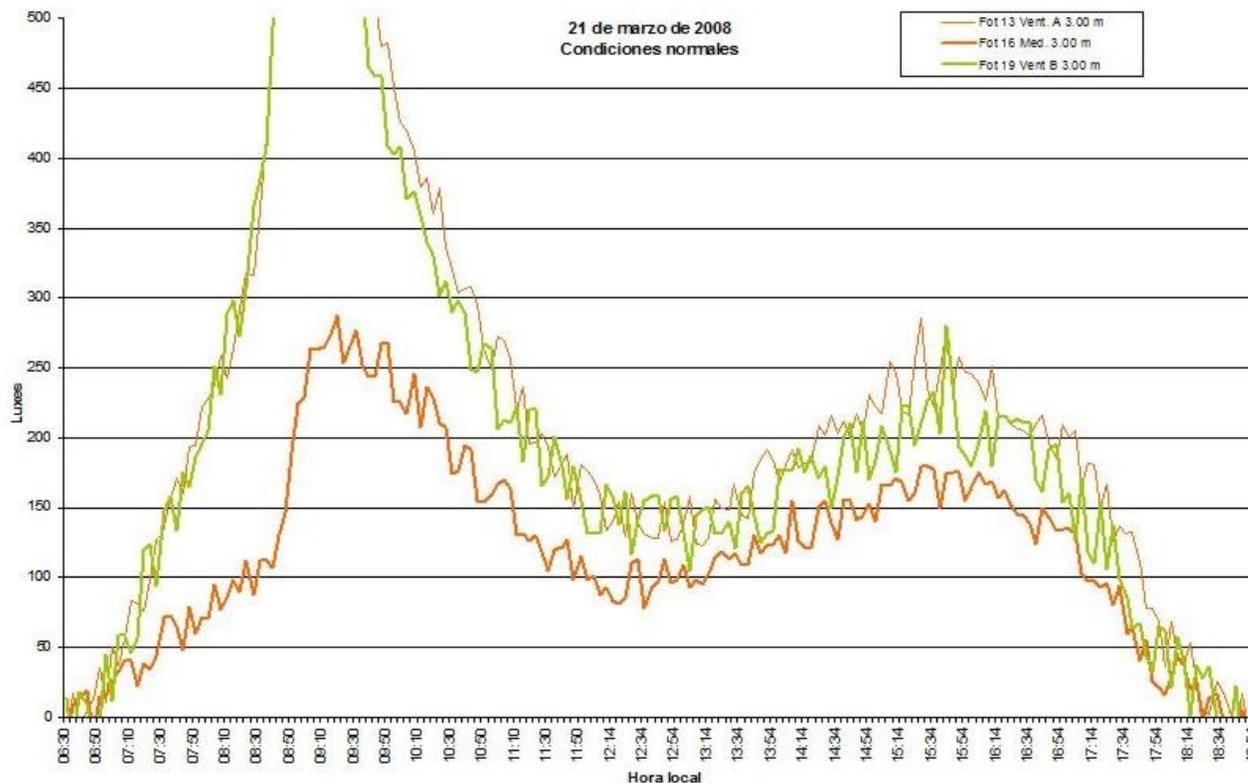
La luz global que proviene del este es captada por el instrumento signado con el N° 3 cuya curva comienza el día ascendiendo de forma sostenida, pero a las 7:46 hrs. experimenta un alza considerable producto de los rayos directos que en ese momento han sobrepasado la barrera urbana e inciden frontalmente sobre el aparato, situación que se mantiene hasta alrededor de las 8:00 hrs. en que, aún cuando sigue aumentando, lo hace en menor medida, llegando a su climax alrededor de las 9:26 hrs. en que comienza a declinar. La explicación de

este comportamiento se encuentra en que al elevarse el sol sobre el horizonte sus rayos caen de manera oblicua haciéndose cada vez mas agudo el ángulo con el que bañan al aparato hasta llegar a la tangencialidad en el momento de la culminación, a partir del cuál sólo medirá luz difusa.

Por su parte el fotómetro N° 21 ubicado horizontalmente sobre el barandal del balcón para captar la luz global en ese punto inicia un ascenso más acelerado a partir de las 8:30 hrs. aproximadamente, a tal grado que a las 9:30 hrs. supera la medición del aparato N° 1 por más de una hora y comienza a declinar rápidamente hasta un poco después de la culminación que se da a las 12:44 hrs. y a partir de

allí sigue casi horizontal, con una pequeña alza a la que ya hemos hecho alusión.

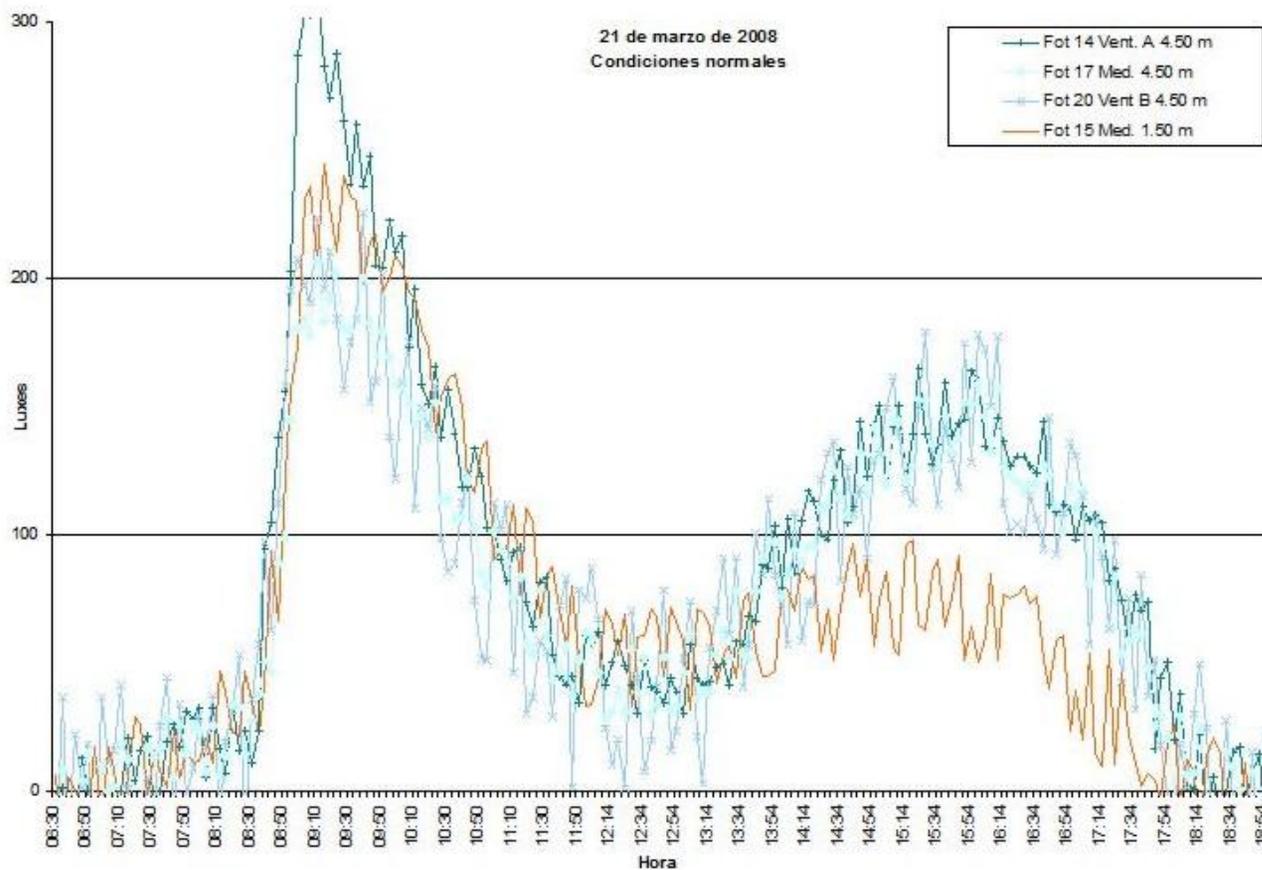
Los instrumentos que miden la luz incidente en las ventanas presentan una similitud tal que parecen uno solo y muestran un ascenso vertical al ser iluminados directamente por el gran astro inmediatamente después de las 9:02 hrs., de 6 a 60 klx, esto nos da una clara referencia sobre la relación de luz difusa y directa, que nos marcaría un 10% de la primera respecto de la segunda, pero no debemos olvidar que ambas están en el exterior. Una vez que han ascendido de esta forma abrupta, prácticamente alcanzan el máximo comenzando a reducir sus



Gráfica N° 10 Condiciones interiores de iluminación a 3 m de la fachada.

valores casi de inmediato, lo que nos ayuda a reforzar la teoría de reducción de luz al ser más agudo el ángulo de incidencia.

Respecto del interior de la habitación podemos apreciar en las gráficas N^s 9, 10 y 11 los valores de iluminación recibidos a 1.5, 3.0 y 4.5 metros de la fachada donde se ubican las ventanas, respectivamente y en las gráficas N^s 12, 13 y 14 las mediciones en línea con la



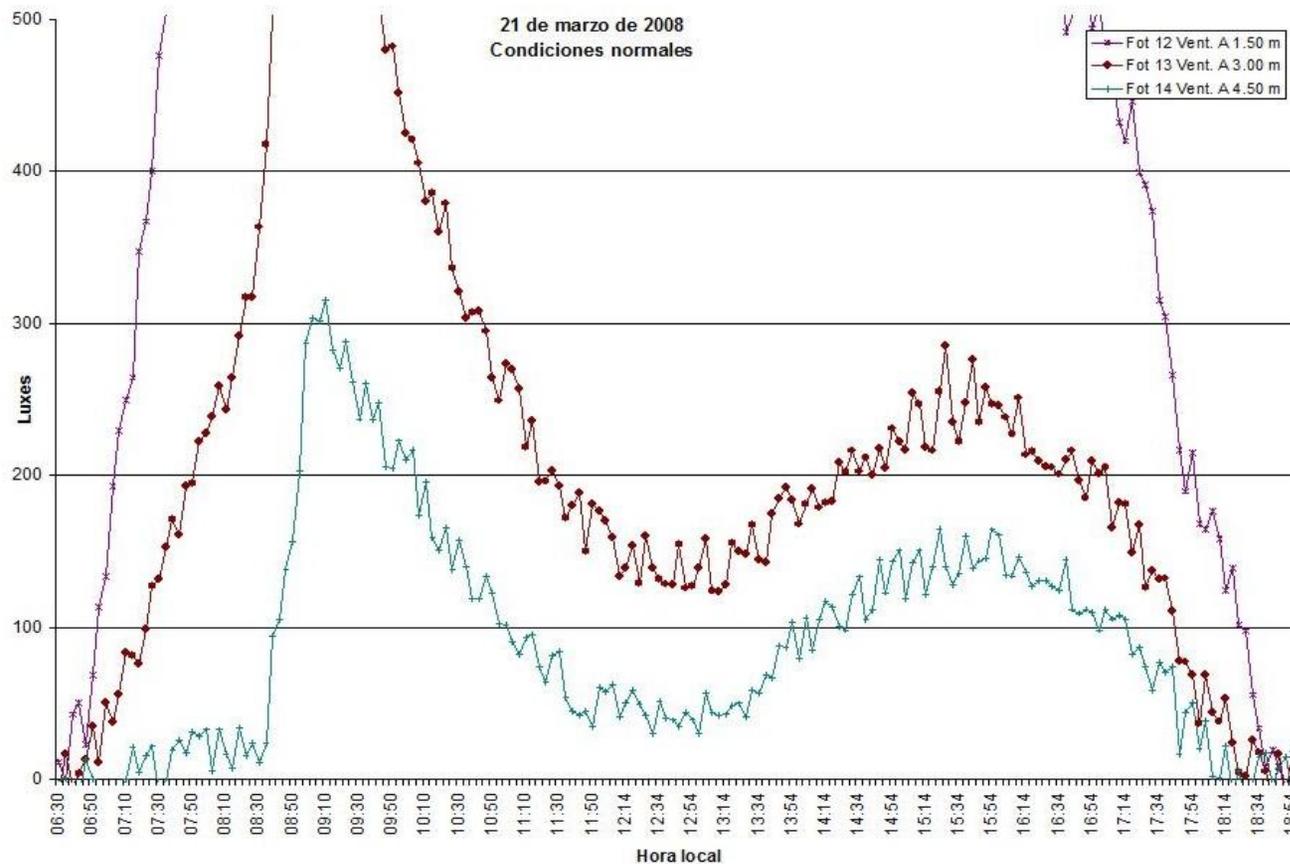
**Gráfica N° 11 Condiciones interiores de iluminación a 4.5 m de la fachada.
(Se incluye el fotómetro 15 del centro de la habitación a 1.5 m de la pared)**

ventana A, el paño de muro y la ventana B, en el mismo orden. De acuerdo con esto vemos que existe una gran diferencia entre la luz que ingresa al salón frente a las ventanas a 1.5 m de la fachada y la parte que queda detrás del muro, en las primeras se reciben más de 450 luxes durante una parte muy importante de la jornada laboral, mientras en el fotómetro 15, ubicado entre las ventanas, no se sobrepasan los 100 luxes, más que por un corto lapso, correspondiente al momento en que penetra el rayo directo a la habitación, con lo cual podemos equiparar la iluminación en esta zona con la que recibe la parte trasera del cuarto, como puede ser comprobado en la gráfica N° 11 en la que se ha incluido para una mayor referencia el sensor aludido. La explicación para que esto

suceda no es difícil de encontrar, pues el grosor del muro actúa como un cañón para la luz, dirigiéndola hacia atrás y solo una vez que se rebasa el paño interior del mismo, el haz luminoso se difunde, de acuerdo con la teoría que ya hemos expuesto, de manera esférica, pero puesto que el decrecimiento es muy rápido se produce una zona de sombra muy pronunciada, con los resultados que ya conocemos. Esto puede ser corroborado al observar la gráfica N° 10, donde los valores del instrumento colocado en la línea del muro, excepto en el lapso de penetración solar, son más cercanos a los que marcan los aparatos ubicados en frente de las ventanas, si bien permanecen siendo inferiores a estos y más aún, en la

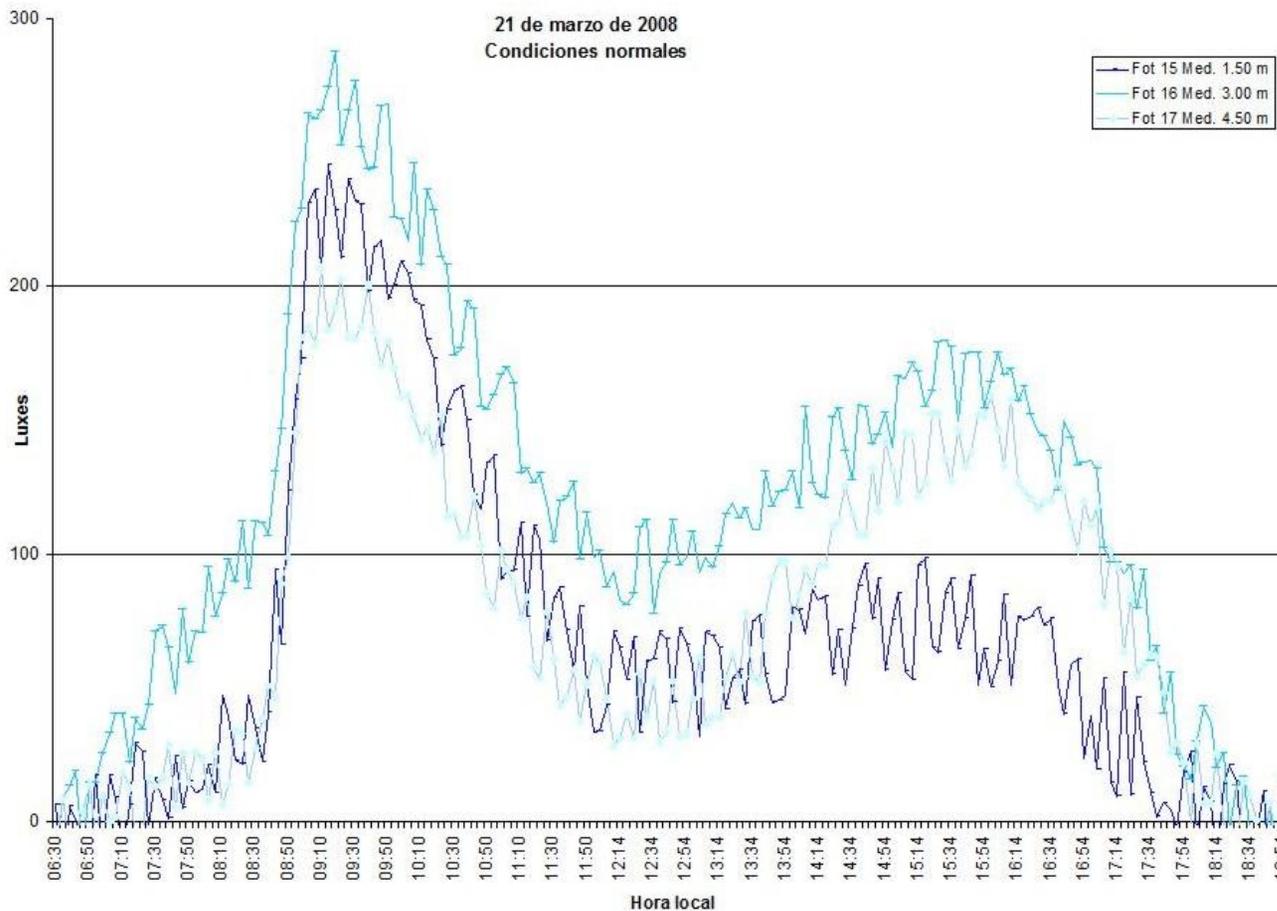
gráfica N° 13, observamos que es mayor la cantidad de luz que penetra al centro del salón que a 1.5 m de la fachada, detrás del muro.

A 3 metros de distancia de la fachada, encontramos valores ya bastante reducidos de iluminación, pues si consideramos que en las puertas se tienen mediciones superiores a 5000 luxes durante casi 8 horas y en el momento de captar los rayos solares directos, estas se acercan a los 64000, en los sensores escasamente se superan los 500 luxes, excepto en el momento de penetración directa, por un lapso inferior a una hora y en el aparato N° 16 ni siquiera se llega a 300 luxes durante toda la jornada. Una vez más



Gráfica N° 12 Condiciones interiores de iluminación en línea con la ventana A

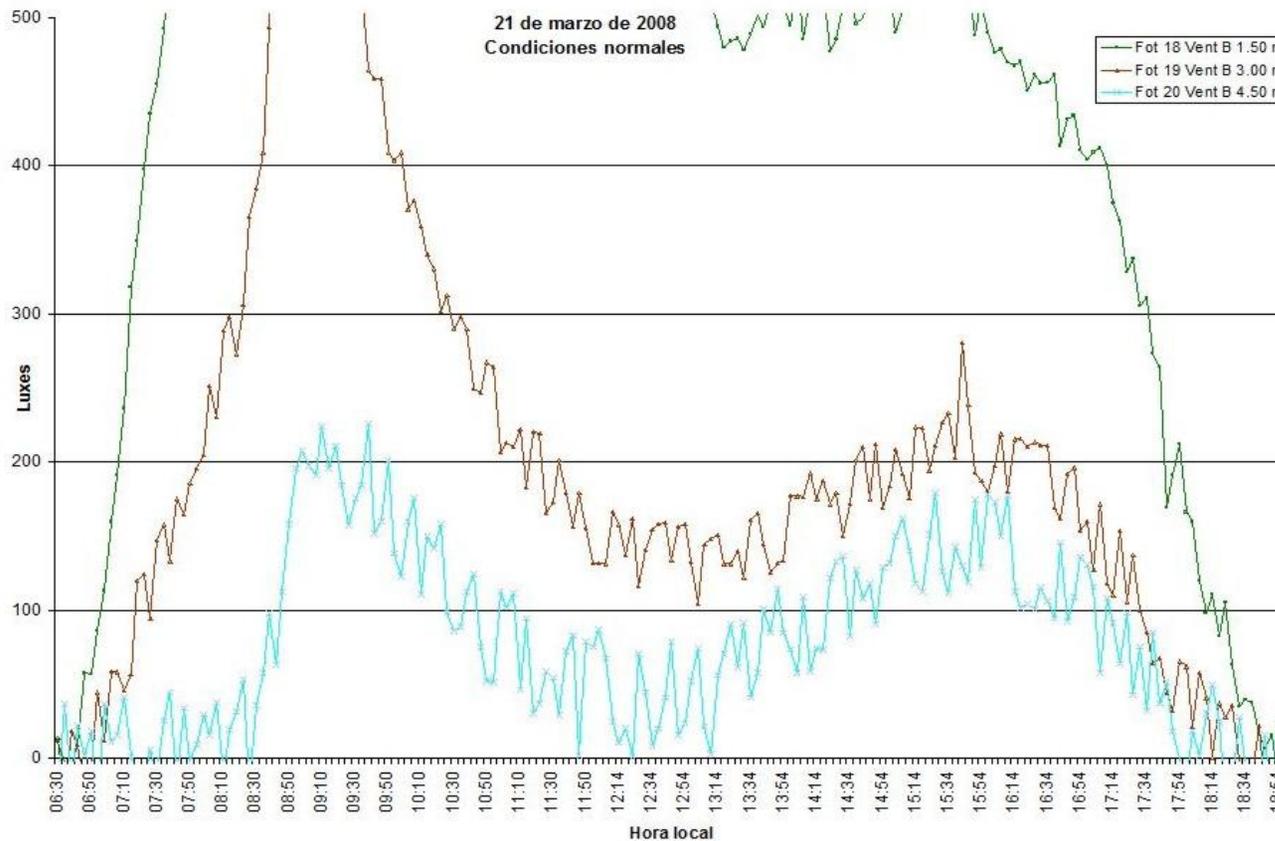
podemos observar el aumento hasta un punto de inflexión que se da por la tarde, alrededor de las 15:30 hrs. y que ya hemos explicado con relación a las gráficas del exterior.



Gráfica N° 13 Condiciones interiores de iluminación en línea con el paño de muro entre las ventanas

En la última fila, paralela a la fachada, las curvas graficadas muestran condiciones de clara escasez de luz, ya que prácticamente no se logra superar los 200 luxes, lo que motiva una zona que si bien permite realizar ciertas actividades muy burdas, para la mayoría de los trabajos de oficina requerirá complementar con iluminación artificial, sin embargo, creemos que algunas labores administrativas como aquellas que precisan pantallas de computadoras podrían ser realizadas aquí sin utilizar recursos lumínicos eléctricos o que éstos sean mínimos, pero esto no es más que una especulación, que debería ser corroborada con investigación de campo, la que podríamos emprender en un futuro o proponemos para que alguien más lo haga.

Con el fin de estudiar la forma en que decrece la luz presentamos aquí, las gráficas separadas por filas perpendiculares a la fachada, para una mayor claridad y de esta forma podemos apreciar la manera en que la reducción lumínica afecta al interior de la habitación lo que evidentemente sucede, sin embargo con los datos que poseemos no es posible establecer una correlación clara de la manera en que opera este efecto, pues como sabemos, la luz se reduce a razón del cuadrado de la distancia de la fuente, pero si nuestro emisor de luz es la ventana, o las ventanas, se establece una correspondencia demasiado compleja con el interior de la habitación y las condiciones inestables del exterior, por lo que no podemos deducir la relación matemática que rige el comportamiento lumínico. Esto nos hace comprender que en la arquitectura, los múltiples factores que interactúan, producen tal cantidad de variables que hacen muy difícil el establecimiento de parámetros estandarizados que puedan ser aplicados como fórmulas o recetas, por lo que la experiencia profesional



Gráfica N° 14 Condiciones interiores de iluminación en línea con la ventana B

pasa a ser un elemento de importancia crucial. No obstante lo anterior, puede ser útil tanto para adquirir mayor conocimiento como para usarlo de guía, estudiar la técnica expuesta en el libro *How to Predict Interior Daylight Illumination*, (ver la nota 4 del capítulo 2), lo que indudablemente requiere de una extensa investigación para determinar su aplicación en la Ciudad de México.

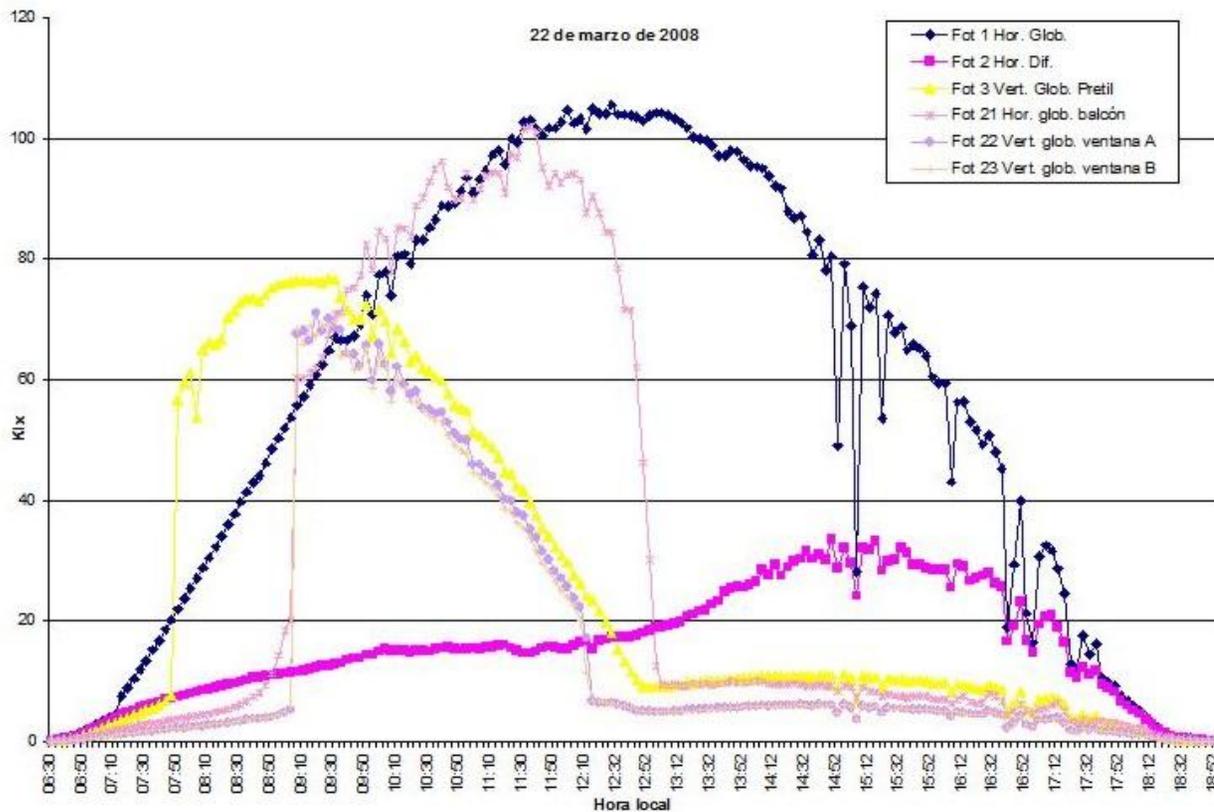
En la gráfica N° 13 observamos la escasa luz que logran percibir los fotómetros en la línea que enfrenta al paño de muro que se ubica entre las ventanas y además podemos apreciar que el posicionado a 3 metros de la fachada capta mayor

iluminación que el N° 15, a 1.5 metros de la misma, con lo que reafirmamos la clara interferencia que ejerce el grosor del muro en el camino de la luz. Por otra parte queda claro que en toda esta zona no existen condiciones lumínicas para cumplir con las exigencias mínimas de la norma laboral mexicana, (NOM – 025 - STPS-1999), puesto que en ningún momento se logra rebasar los 300 luxes requeridos para el trabajo de oficina.

En la línea de fotómetros ubicados enfrente de la ventana B se da una situación muy similar a la ocurrida en la otra fenestra, por esto creemos que sería redundante ahondar en el análisis de la gráfica y nos limitaremos a comentar que producto de la dirección horizontal del rayo solar, existe un leve aumento en la cantidad de luz que reciben los fotómetros enfrente de la ventana A, respecto de la que está enfrente de la B, lo que podemos atribuir al reflejo producido en el muro lateral del cuarto, dado que el rayo solar incidente penetra en la habitación inclinado desde el sur.

4.1.2.- Día despejado con nubosidad leve, salón en condiciones normales; 22 de marzo de 2008

Como puede ser apreciado en la gráfica N° 15, al inicio de este día se presenta una tenue nubosidad con algunas nubes aisladas muy pequeñas cuya interferencia puede ser considerada despreciable, por lo que la iluminación global que es medida por el fotómetro N° 1, se refleja de manera sostenida en un movimiento ascendente de la gráfica hasta las 9:34 a.m., a partir de ese instante la nubosidad se

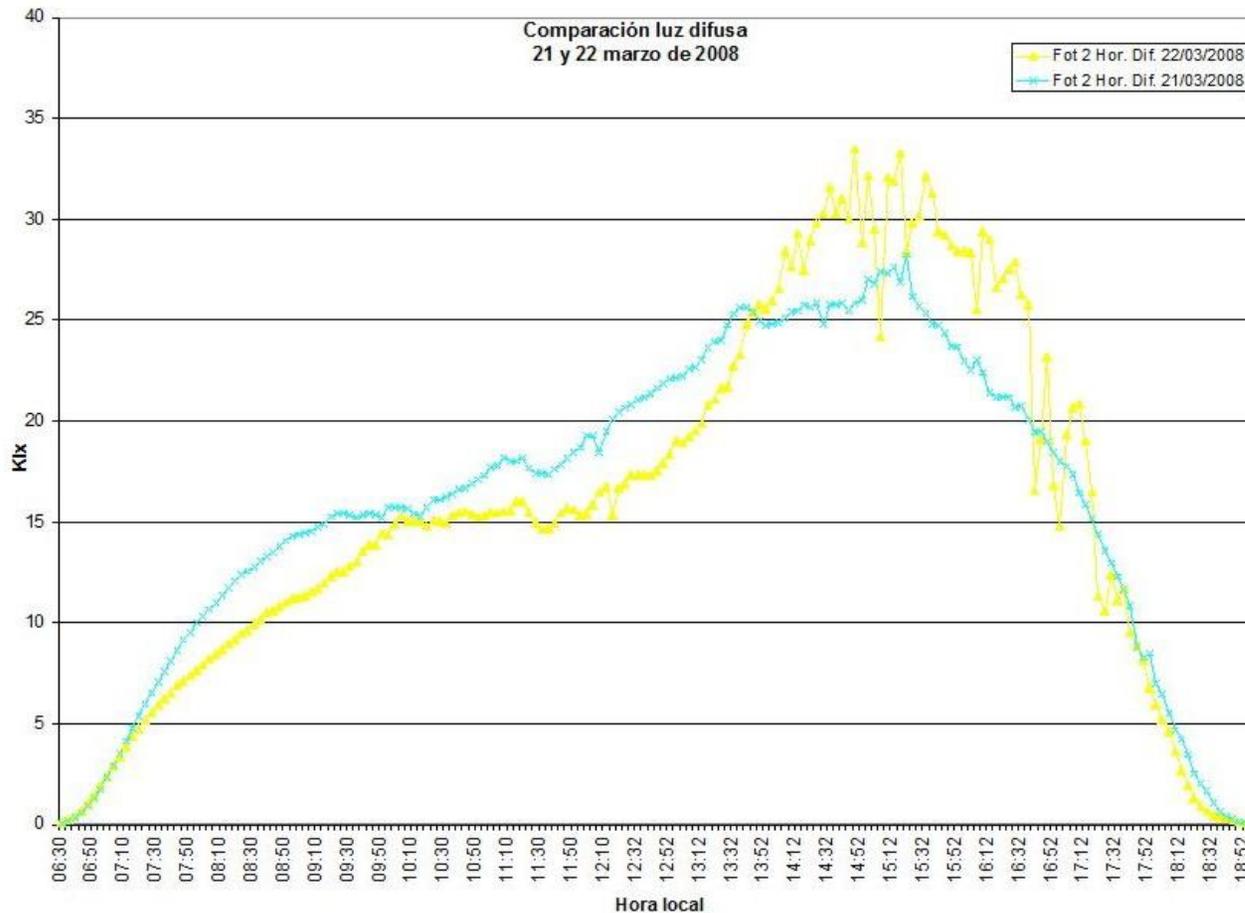


Gráfica N° 15 Condiciones exteriores

hace presente de manera leve por lo que comienza a producir algunas variaciones, pero aún sin incidencia importante, por lo que el aumento de la iluminación continúa. Así llega a un máximo aproximadamente entre las 11:30 y la 13:15 hrs. donde se mantiene ligeramente por arriba de los 100 kiloluxes, por lo que se puede apreciar muy bien el comportamiento de lo que podríamos contemplar como un día "normal" pero al acercarse las 15 hrs, se tiene algunas bajas considerables producto de la nubosidad, que alteran las condiciones de luz, sin embargo, al observar la gráfica en su conjunto se puede ver el comportamiento en forma de parábola de esta variable semejante al día 21 de marzo.

En cuanto a la luz difusa, que es registrada por el sensor N° 2,

podemos decir que aumenta de manera muy leve ya que su curva es ligeramente ascendente, llegando a valores cercanos a 20 kiloluxes al momento de la culminación, pero ya desde un poco antes muestra un mayor ascenso manteniéndose cercana a los 30 kiloluxes, hasta pasadas las 16:30 hrs. momento en el que decae de manera sostenida. En la gráfica N° 16 realizamos la comparación de los días 21 y 22 de marzo en relación con la luz difusa para estudiar en que medida afecta la nubosidad a esta variable. En primer término podemos



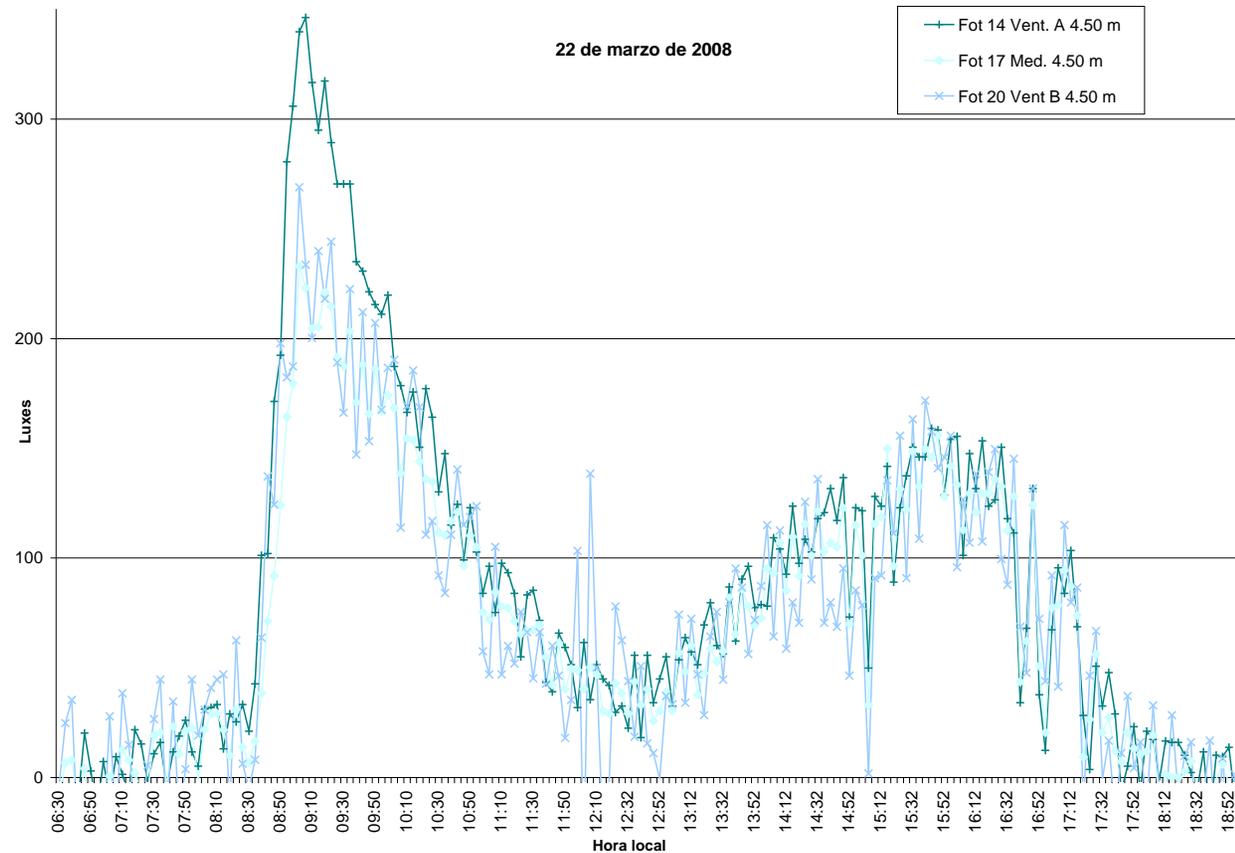
Gráfica N° 16 Comparación de luz difusa, días 21 y 22 de marzo de 2008

señalar la gran sensibilidad de este parámetro, pues muestra alteraciones que en la curva de luz global no son apreciables, lo que nos permite inferir que es arriesgado tratar de relacionar luz difusa con la global, punto que abordaremos más adelante. Otro elemento que surge del análisis de esta gráfica es que la presencia de nubes, si es reducida, no ayuda a aumentar el nivel de iluminación, sino al contrario, lo reduce, como sucede durante toda la mañana del día 22 de marzo, pero cuando alcanzan un mayor volumen si favorecen el incremento de la claridad, lo que acontece entre las 14 y 17 hrs.

Por su parte, el instrumento con el número 3 que mira hacia el oriente desde el pretil que da a la calle es iluminado de manera directa por los rayos solares inmediatamente después de las

7:46, donde mide 7.68 klx, dado que a las 7:50 a repuntado a 56.75 klx. El aumento es claro hasta alrededor de las 9:00 horas pues se mantiene constante en un máximo por arriba de 75 klx, después de los cual decae sostenidamente a partir de las 9:30 hrs, producto de la disminución de la componente horizontal de la luz, hasta el momento de la culminación que se da a las 12 horas con 44 minutos y 6 segundos, hora local. A partir de este momento el fotómetro sólo captará luz difusa, razón por la que su gráfica muestra una línea casi horizontal, excepto cuando tiene un pequeño repunte que creemos, se debe a la contribución de la fachada del edificio ubicado enfrente, que por ser un día nublado no es realmente significativa, esto nos dice que las fachadas aún siendo claras, no contribuyen de manera sustancial a iluminar las edificaciones de la acera opuesta en los días nublados.

Por otro lado, el fotómetro 21, que mide la iluminación global desde el barandal ubicado en el balcón y entre las dos ventanas del cuarto, comienza a ser iluminado por el sol a partir de las 9:02, lo que sucede hasta las 12:40 hrs. aproximadamente, durante dicho lapso la forma de la gráfica es similar a la del instrumento N° 1, ubicado en la azotea, pero alrededor de 10 klx aproximadamente por encima de éste, lo que se debe a la contribución de luz difusa reflejada por el muro de la propia fachada, esto se comprueba cuando los rayos comienzan a ser cercanos a la vertical y dicha contribución es



Gráfica N° 17 Condiciones interiores de iluminación 22/03/2008

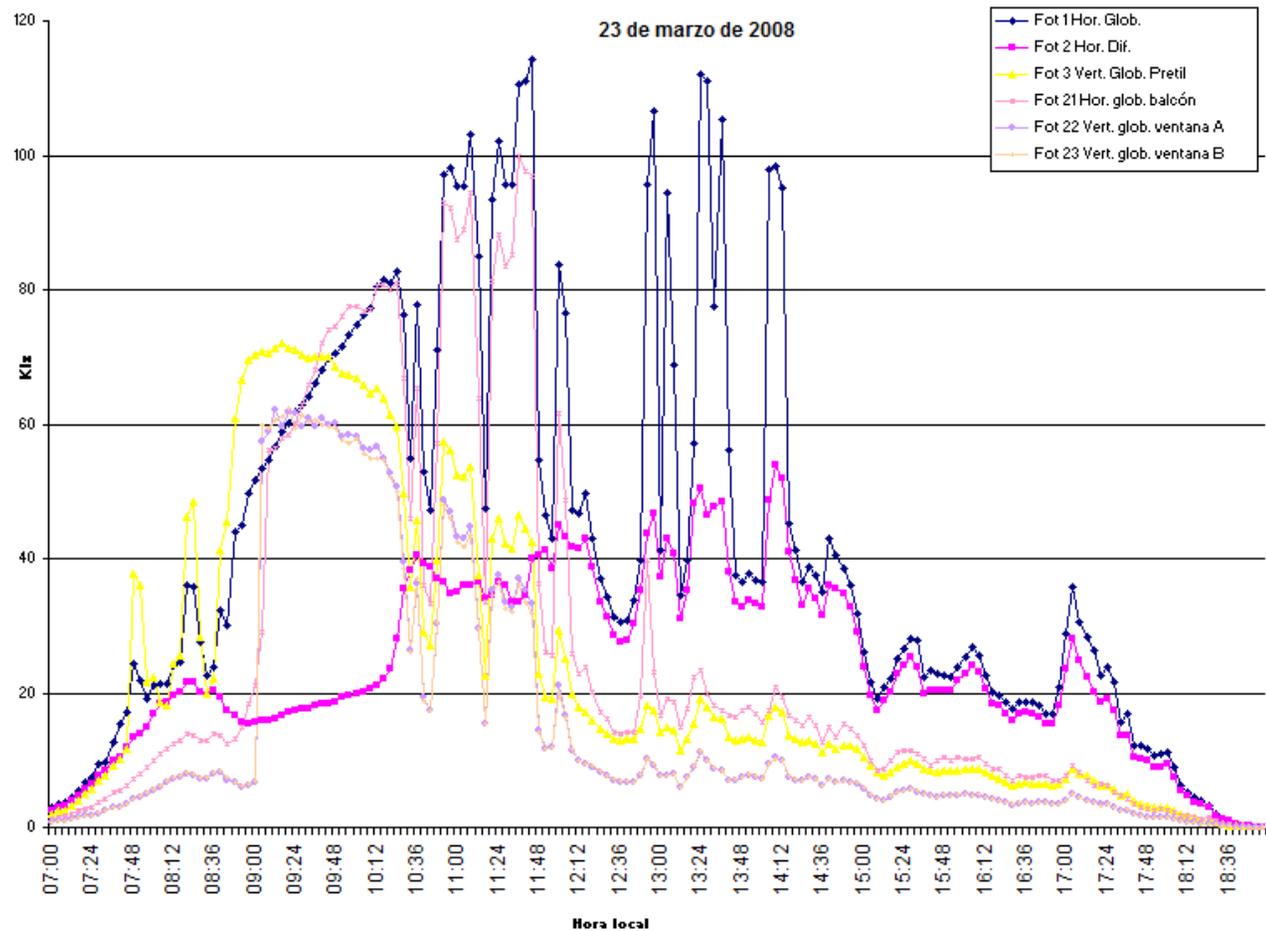
menor hasta quedar por debajo de la mostrada por el primer fotómetro, de ahí en adelante todo es disminución. Esto ocurre antes de la culminación puesto que existe una cornisa que produce sombra, pero también una malla de protección muy delgada de color negro, que si bien de manera perpendicular no afecta mayormente, cuando se hace tangente pasa a ser una capa que reduce la iluminación, de manera considerable, lo que nos dice que por transparente que sea dicha barrera, al acercarse al paralelismo con los rayos solares se convierte en un obstáculo que reduce el ingreso de luz de forma importante, por lo que un dispositivo de este tipo también podría ser considerado como elemento de control solar en un momento dado.

Los fotómetros 22 y 23 ubicados en las ventanas del salón sujeto de nuestro estudio tienen un comportamiento prácticamente igual al que observamos en el aparato número 3, aunque ligeramente menor, unos 5 klx aproximadamente, baja que solo podemos atribuir a que el aparato ubicado en el pretil “ve” más cielo, por lo que los instrumentos colocados en las ventanas capturan menos luz, al ser su campo de percepción menor, por lo que la diferencia puede ser atribuida a la luz difusa reflejada por la bóveda celeste, que en mayor medida captará el fotómetro asignado con el número 3.

En lo que al interior de la habitación se refiere y específicamente a la parte trasera, es decir a los fotómetros ubicados a 4.5 m de la fachada, podemos indicar que tienen dos momentos en los que se producen alzas, el primero es entre las 8:50 y las 10 hrs. donde se superan los 200 lx, lo que se debe a que en ese momento hay una penetración importante de luz directa al salón que es reflejada por el piso y las paredes. El siguiente es aproximadamente entre las 14 y las 17 hrs. donde se encuentra por arriba de 100 lx, la explicación de este aumento está en que al avanzar la tarde, el sol comienza a iluminar la fachada del edificio ubicado enfrente del que estamos analizando, la que se convierte en una pantalla que refleja la luz natural, por lo que a la contribución de este elemento se le puede atribuir alguna importancia, ya que si consideramos que a las 12:32 se registra un promedio para los tres fotómetros de 31.78 luxes, a las 15:44 dicho promedio es de 154.16 luxes, es decir, en términos numéricos un incremento cercano a 5 veces, aunque, dada nuestra necesidad de iluminación encontramos que el ingreso de luz es deficiente y no nos sirve para realizar actividades normales de una oficina, dado que para apreciar detalles medianos, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico, del Distrito Federal, se requieren al menos 300 lx, lo que es alcanzado sólo por un fotómetro y por un lapso muy corto.

4.1.3.- Día con gran nubosidad, salón en condiciones normales; 23 de marzo de 2008

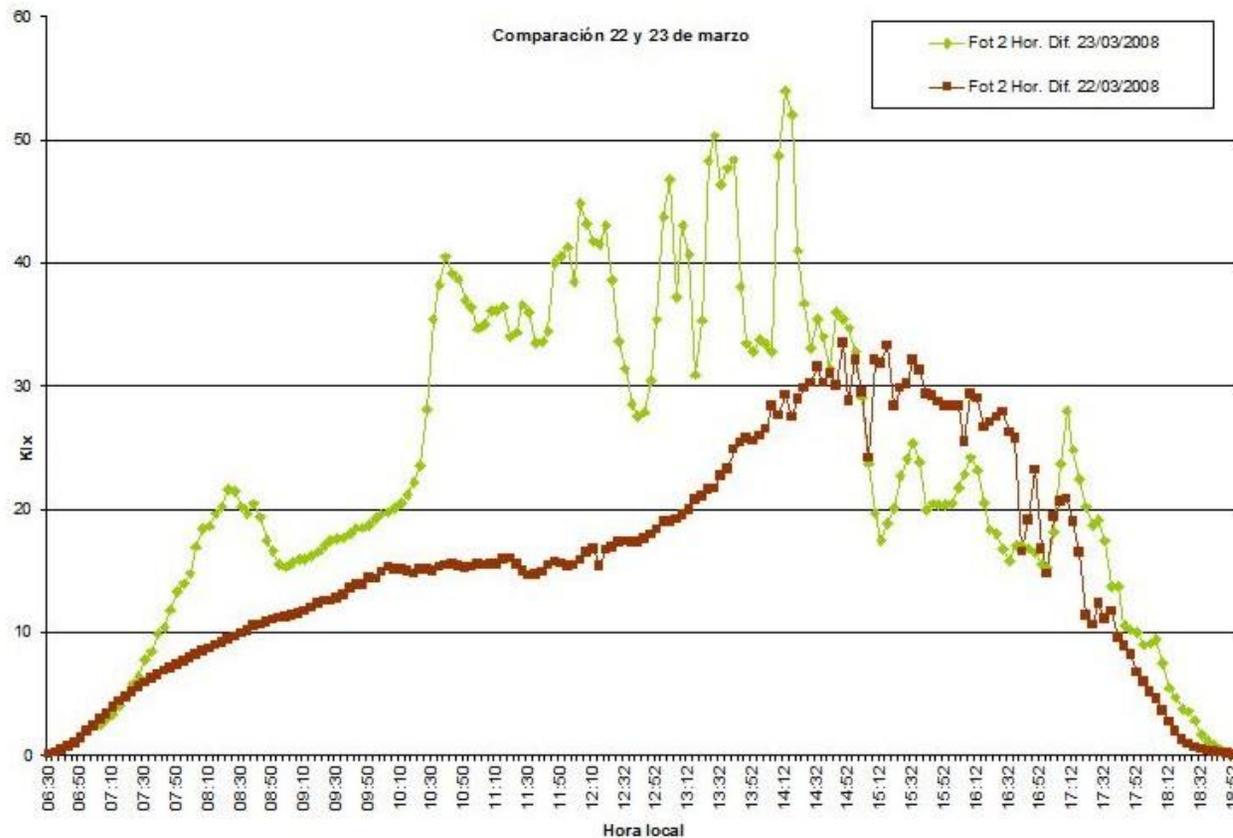
Este día comienza con una gran nubosidad desde muy temprano y ya a las 7:48 a.m. podemos observar como se alteran las gráficas, por una parte el sensor vertical N° 3 que mide la luz global proveniente del este tiene una caída considerable, de 36 klx baja a 21.69 klx, para luego recuperarse ascendiendo a 46.28 klx a las 8:20 hrs, posteriormente existe un periodo de crecimiento con cierta estabilidad y después los altibajos son la norma, este comportamiento es seguido casi a la perfección por los instrumentos ubicados en las ventanas con excepción de la primera hora, aunque con valores inferiores. En el mismo lapso la iluminación horizontal global, medida por el fotómetro 1 tiene un comportamiento totalmente anómalo si bien entre aproximadamente las 8:30 y las 10 hrs. su gráfica es bastante normal. Al hacerse más densa la nubosidad las



Gráfica N° 18 Condiciones exteriores 23/03/2008

variaciones son marcadas, pero los valores son altos pues se llega casi a 120 klx a las 11:44 hrs. cuando el registro muestra el mayor valor.

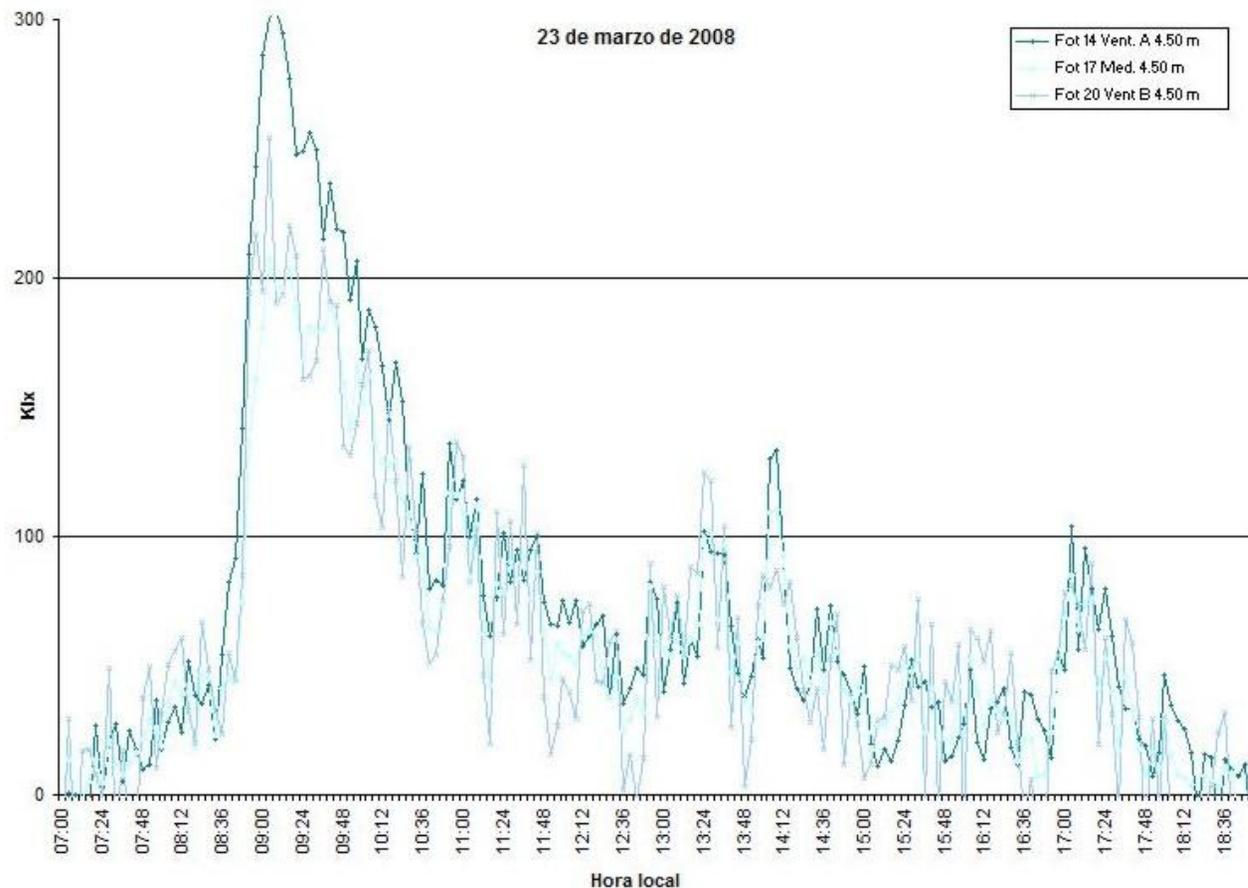
Es interesante observar que la luz difusa horizontal que mide el aparato N° 2 experimenta valores mayores a los esperados, muy cercanos a la luz global, esto se ve con claridad en la gráfica N° 19 donde se realiza una comparación para la iluminación difusa, entre



Gráfica N° 19 comparación de iluminación difusa exterior para dos días.

los días 22 y 23 de marzo. Cómo es posible observar, esta última fecha muestra valores muy superiores a la víspera, hasta cerca de las 15 hrs, momento en que la nubosidad es tan densa y oscura que la iluminación baja de forma muy importante. Es digno de destacar el punto más alto para el día 23, ya que se alcanza un máximo de 54 kiloluxes, muy por encima del mayor punto de inflexión del día 22, en que solo llega a 33.5 klx, lo que nos muestra la gran capacidad de las nubes para aumentar el nivel lumínico, sin embargo, la enorme variación producida, nos reduce la posibilidad de desarrollar estrategias que puedan contemplar éstas como un elemento mas para diseñar iluminación natural en la Ciudad de México, razón principal que podemos esgrimir para cuestionar el método del día claro, sin embargo, puesto que no contamos

con datos ni ha sido el interés de esta investigación, reforzamos la idea de un estudio destinado a conocer los niveles de iluminación en relación con el comportamiento de la nubosidad, que creemos la única forma certera de desarrollar estrategias de iluminación natural efectivas y con un alto grado de acierto en el momento de llevar a la práctica los proyectos arquitectónicos.



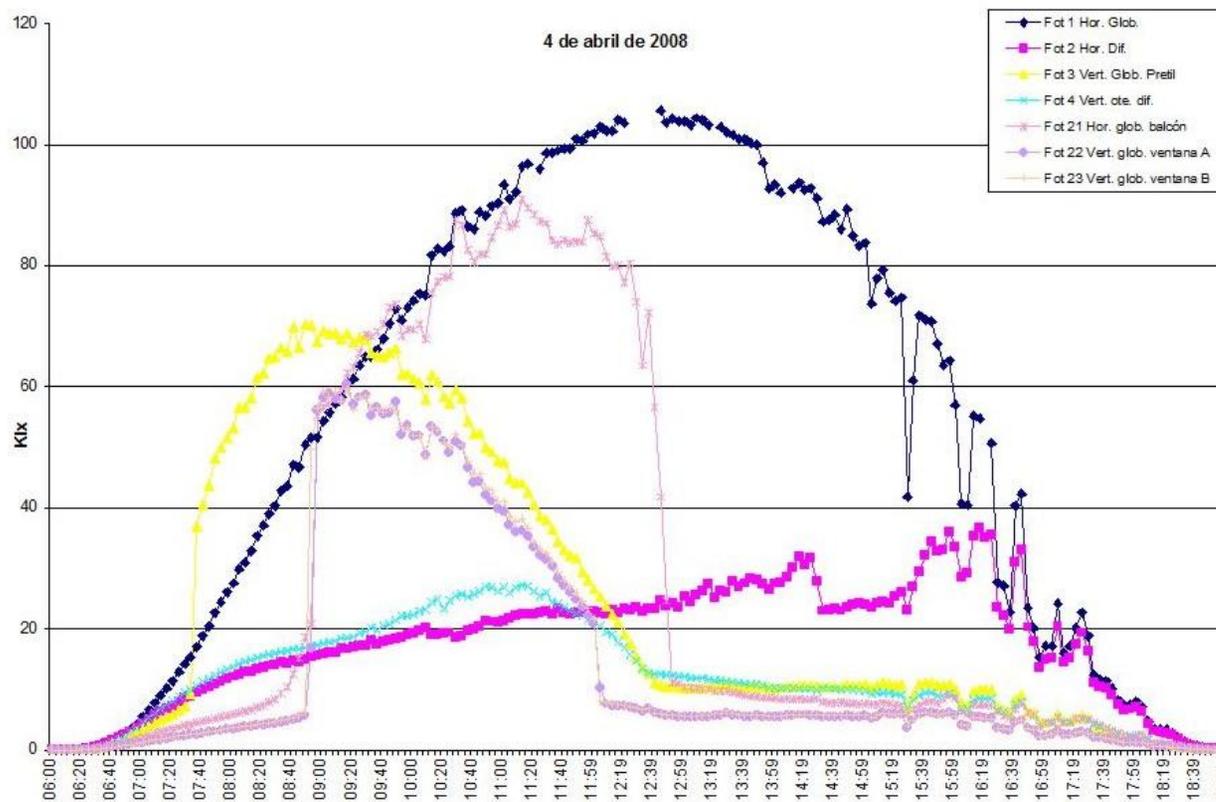
Gráfica N° 20 Condiciones interiores de iluminación 23/03/2008

En el interior de la habitación y en la parte trasera que es la que más nos interesa analizar, podemos observar que los niveles de iluminación se mantienen en valores cercanos a 50 luxes prácticamente durante todo el día, excepto en el momento en que ingresa luz directa a la habitación, cuando sube hasta cerca de 300 luxes, lo que ocurre aproximadamente entre las 9 y las 10:30 hrs. Es importante hacer notar que esta es la iluminación que penetra hasta la parte trasera de la habitación a través de las ventanas que están libres de toda obstrucción, lo que implica niveles inaceptables para cualquier tipo de trabajo.

Si nos detenemos en el lapso que va aproximadamente de las 10:30 a las 14:30 hrs. podemos observar en la gráfica N° 14 que los valores del día nublado para la luz difusa son muy superiores a aquellos para la jornada que se

presenta despejada, sin embargo esto no se traduce en aumento de niveles importantes en el interior y por el contrario, podemos observar una disminución en el mismo periodo.

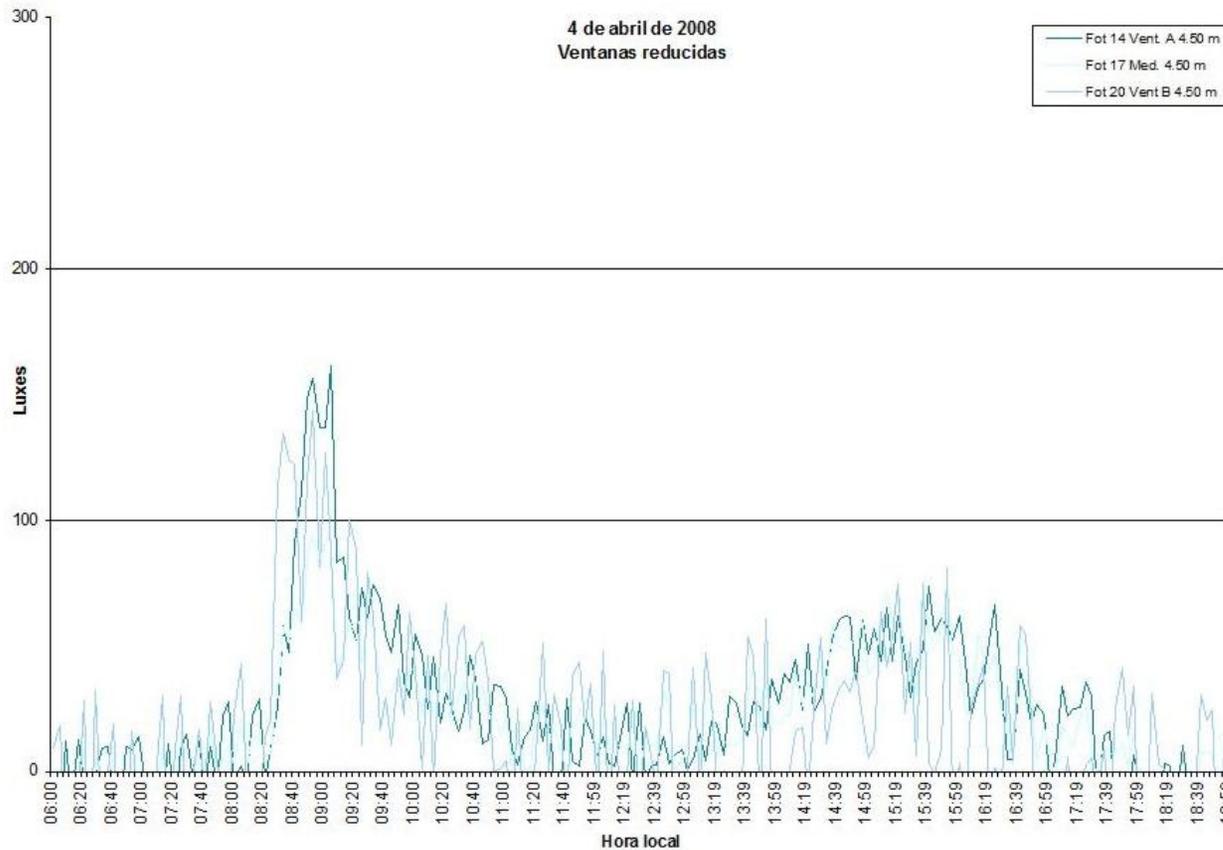
4.1.4.- Día despejado con nubosidad leve, salón en condiciones alteradas, ventanas reducidas; 4 de abril de 2008



Gráfica N° 21 Condiciones exteriores 23/03/2008

Este es un día muy similar en términos de iluminación al 22 de marzo ya que las gráficas de los valores exteriores correspondientes son coincidentemente parecidas, pero en el interior de la habitación se han realizado cambios importantes, debido a que se efectuó el tapiado de la parte inferior de las ventanas, con lo que el ingreso de luz se limitó a un área de 1.46 m², es decir se redujo a un 15 % de la entrada total de iluminación anterior. La razón para reducir el acceso de la luz está en que dadas las características del objeto de estudio (un inmueble), no era posible aumentar el ingreso del haz solar conservando las condiciones de la fenestra, pero sí era posible su disminución, por lo que se realizó esta última. Si consideramos el área de ventana, entendiendo como tal

sólo la parte vidriada, en relación al área del cuarto que es necesario iluminar, esta reducción pasa de un 9.78% originalmente a 3% con la alteración. En la gráfica N° 21 correspondiente al día 4 de abril de 2008, se puede apreciar el comportamiento de las diferentes variables que fueron analizadas para el 21 y 22 de marzo, por lo que no ahondaremos en ellas dada la similitud que presentan y más bien nos concentraremos en estudiar lo que sucede en el interior de la habitación, realizando comparaciones entre estas fechas.

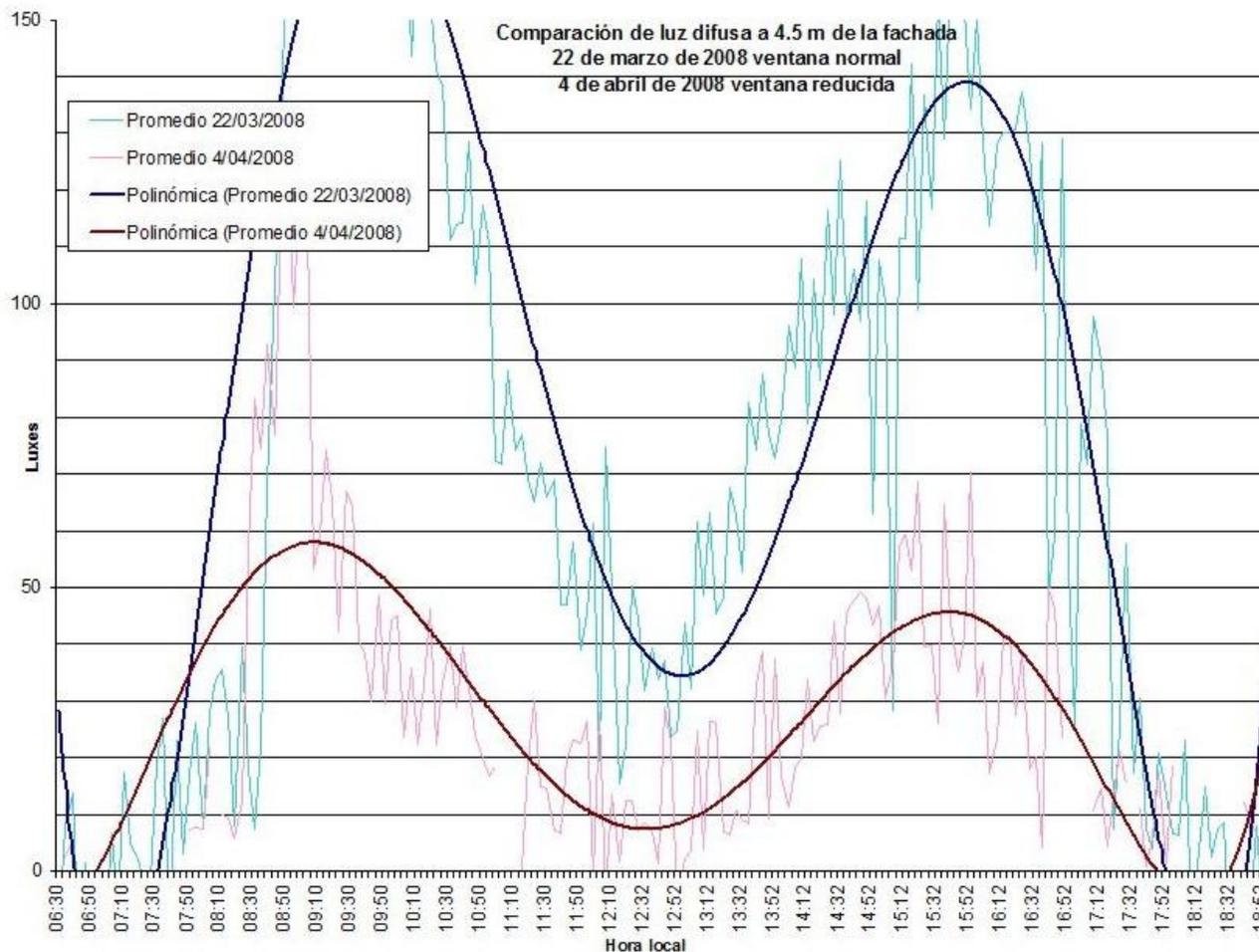


Gráfica N° 22 Condiciones interiores de iluminación 4/04/2008

Solo mencionaremos que en la curva correspondiente a la luz difusa existe una pequeña alteración alrededor de las 14 hrs. en que recibió ligeramente luz directa, lo que fue corregido alrededor de las 14:30, sin embargo por no tener la certeza de los momentos precisos en que esto ha ocurrido, hemos preferido no eliminar datos y presentar la gráfica tal como aparece con la pertinente aclaración.

Con los cambios realizados encontramos una baja considerable en los niveles de iluminación y si vemos mas específicamente los fotómetros que están ubicados a 4.5 m de la fachada, podemos observar que se mantienen por debajo de 100 luxes, con excepción de un pequeño momento entre las 8:30 y las 9:00 hrs. aproximadamente, esta

situación permanece hasta el último día del periodo en que se mantuvo la reducción.



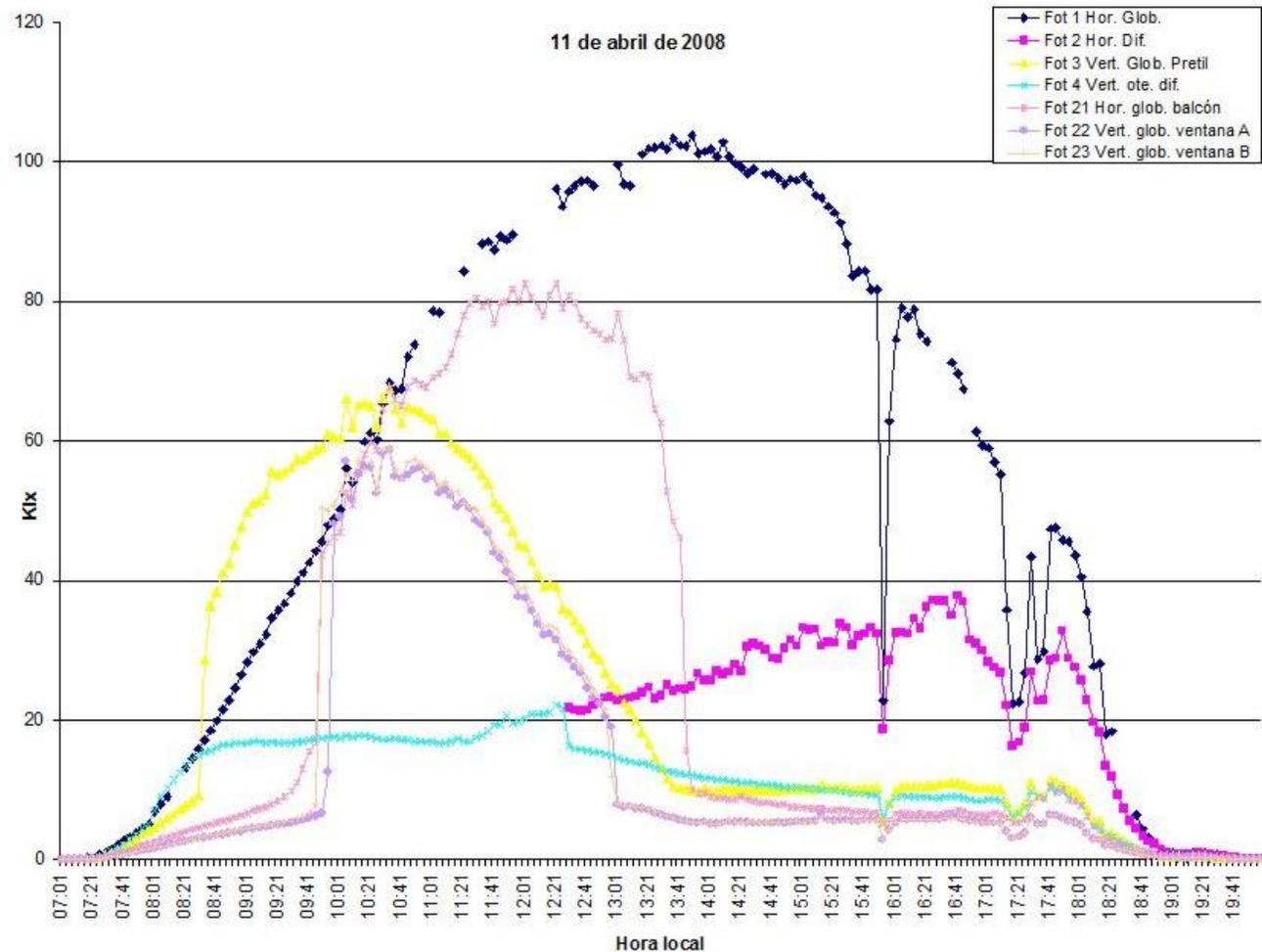
Gráfica N° 23 Promedio de los fotómetros ubicados a 4.5 metros de la fachada y su tendencia polinómica para los días 22 de marzo y 4 de abril de 2008.

Con la finalidad de tener una mejor apreciación de lo que sucede al reducir la ventana hemos concentrado en una sola gráfica los días 22 de marzo y 4 de abril para los instrumentos colocados a 4.5 metros de la fachada, pero dado que los valores obtenidos tienen una gran variabilidad, decidimos promediarlos y a la curva resultante le dibujamos una tendencia polinómica acercándonos lo más posible a las líneas originales. Debemos aclarar que si bien somos contrarios al uso de la estadística, creemos que en este caso podemos justificar su utilización ya que nos permite ver gráficamente la variación experimentada por la luz que recibe la zona más alejada de la ventana y aunque puede ser aventurado inferir conclusiones a partir de esta técnica, pensamos que podemos arriesgar al menos una hipótesis, dado que si el

ingreso de luz se redujo a una tercera parte y las líneas de tendencia de los promedios muestran aproximadamente esa proporción, podría ser congruente pensar que el ingreso de luz es proporcional a la reducción (o aumento) del vano por el cual penetra. Considerando que este estudio se emprendió más por un afán de búsqueda que de comprobación, una vez más dejamos la puerta abierta para corroborar o refutar lo anteriormente planteado, ya que esto implica la realización de experimentos que estén específicamente enfocados al cuestionamiento científico de esta situación.

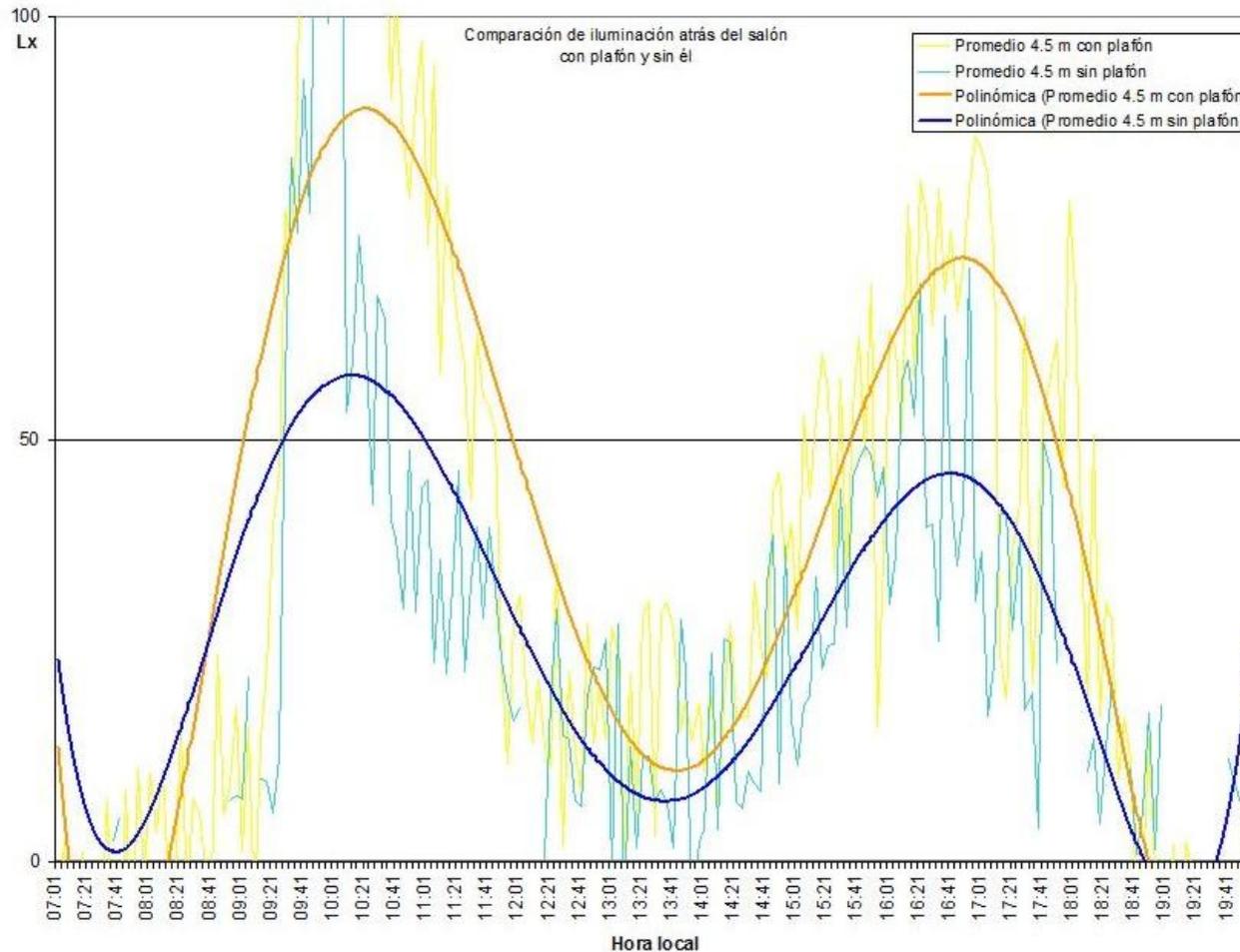
4.1.5.- Día despejado con nubosidad leve, salón en condiciones alteradas, ventanas reducidas y plafón de hule a 2.75m; 11 de abril de 2008.

Si bien se puede apreciar en la gráfica de condiciones exteriores, la falta de algunos puntos que fueron eliminados por representar fallas en la medición, en términos generales, estas omisiones no afectan la comprensión general de los datos, aunque en el caso de la luz difusa, hemos perdido la información de toda la mañana, pero a partir de las 12:30, ya se cuenta con estos valores.



Gráfica N° 24 Condiciones exteriores 23/03/2008

A grosso modo, las curvas que representan el comportamiento de las variables externas del 11 de abril, son muy similares a las del día 4 del mismo mes, razón principal para seleccionarlo, aún con las carencias ya descritas.



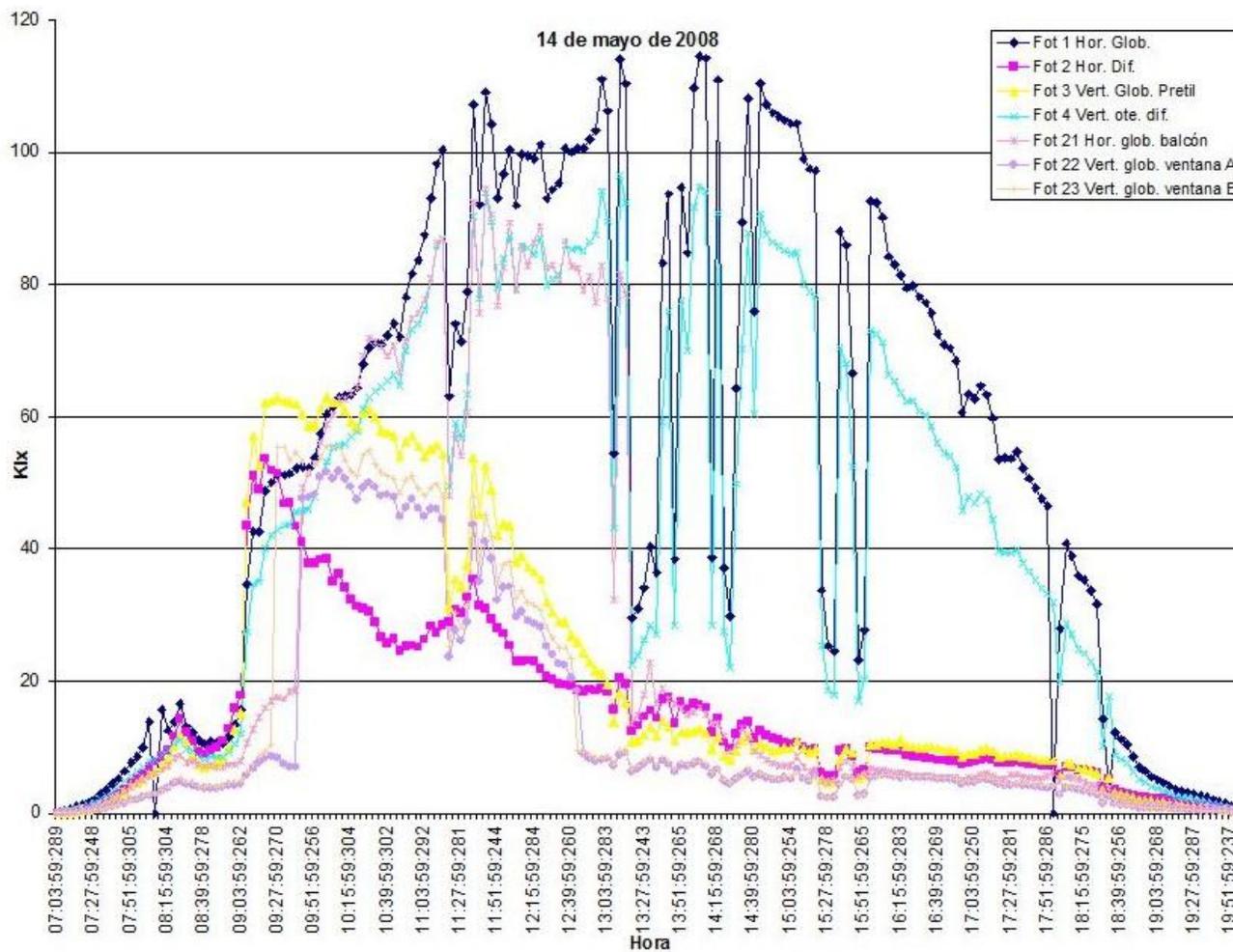
Gráfica N° 25. Tendencia polinomial del promedio de luz medida a 4.5 m de la fachada con y sin plafón.

Una vez instalado el plafón de hule blanco se aprecia un alza en las gráficas de los fotómetros ubicados a 4.5 m de la fachada de la habitación, sin embargo, debido a los bajos niveles de iluminación, precisamos realizar una comparación con el día 4 de abril y para una mayor visualización del efecto, hemos promediado los resultados obtenidos para cada jornada, aplicando a la curva obtenida una línea de tendencia polinomial. Así podemos ver



Imagen 88 Interior del salón a las 10:21 hrs, con plafón

que a pesar de estar trabajando con flujos lumínicos relativamente escasos, la curva del día con plafón es superior a aquella en la que no se cuenta con este aditamento, lo que es claro durante toda la jornada a partir de las 8:30 hrs. Es



Gráfica N° 26 Condiciones exteriores para el 14 de mayo de 2008

importante hacer notar que el plafón estaba ubicado exactamente al nivel superior de la ventana y debido a su peso propio y el sistema de colocación no quedó perfectamente horizontal, produciéndose una pequeña curva desde los costados hacia el centro del salón, por esta razón se colocó un cable entre la fachada y el muro trasero, que ayudó a corregir este problema en una medida importante sin llegar a la totalidad.

4.1.6.- Día muy nublado, salón en condiciones alteradas, ventanas reducidas y plafón a 3.05 m; 14 de mayo de 2008

Dado que la luz captada en el interior de la habitación es primero recibida en la fachada, nos enfocaremos en los datos que arrojan los aparatos situados en las ventanas, así como el ubicado en el pretíl, los que miden

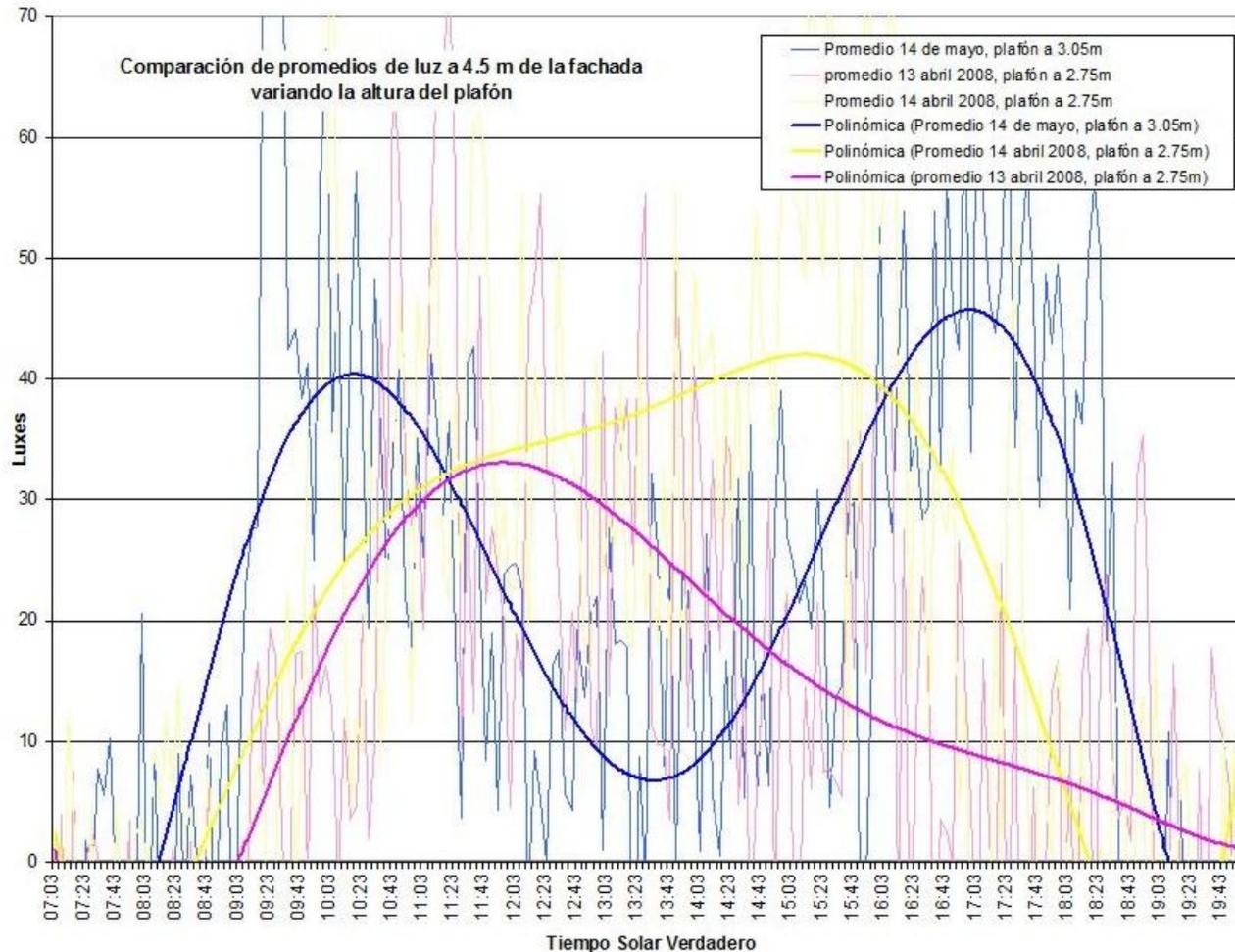
iluminación global oriente y por lo tanto nos permiten ver con claridad como se comporta nuestro objeto de estudio una vez que traspasa la ventana.

Por su posición estos fotómetros captan iluminación difusa una parte importante del día, sin embargo, en el lapso en que son iluminados directamente por el sol registrarán luz global hacia el oriente y posterior al paso del sol por el zenit, a la luz proveniente de la bóveda celeste se le sumará la luz reflejada, tanto por las fachadas ubicadas en frente como la proveniente del piso de la calle, incluidos los reflejos producidos por los vehículos que por ahí circulan, que no pueden ser despreciados dada la enorme cantidad de tráfico que tiene la calle Isabel La Católica. Sin embargo, estos últimos solo pueden afectar una parte reducida del plafón en el interior de la habitación, dado que los fotómetros ubicados en las puertas no reciben de manera directa los reflejos ni de la calle ni de los carros, gracias al balcón que sirve como pantalla que cubre dichos destellos.

En lo que se puede apreciar de las gráficas, el sol ilumina directamente el fotómetro ubicado en el pretil, entre las 9:03 y las 9:07, los ubicados en las puertas, por estar 5.35 metros mas abajo, son alumbrados de manera directa, 20 minutos después en el caso de la puerta B, que sucede a las 9:23, sin embargo en la puerta A ocurre a las 9:40, alrededor de 17 minutos posteriores, lo que se debe a la diferencia de altura de los edificios de la acera opuesta que en esta fecha y dada la distancia horizontal que separa los fotómetros, interfieren la luz solar directa, el mas bajo al ubicado en la puerta B y el mas alto al ubicado en la puerta A. Al momento de ser irradiados directamente por el sol se alcanza la mayor iluminación con un ángulo de inclinación del sol de 34.27° y 35.34° referido a la horizontal respectivamente. A partir de aquí la iluminación decrece de manera bastante regular, lo cual es explicable dado que si consideramos la luz solar como un vector, la componente horizontal que ilumina los fotómetros es cada vez menor, mientras crece la componente vertical que es paralela a ellos y por lo tanto no los ilumina.

Si bien, de la gráfica exterior es posible observar que prácticamente todo el día se mantiene un nivel de iluminación por encima de 5 mil luxes en las dos puertas y que al momento de recibir la luz directa sube por sobre 20 klx, hacia el interior de la habitación se da una situación muy diferente, dado que escasamente se superan los 500 luxes en una parte mínima del día, solo por los fotómetros ubicados a 1.50 m enfrente de las ventanas y en un lapso menor a 30 minutos, entre las 10:31 y las 10:55 hrs. Por su parte el aparato 19 ubicado a 3 m y enfrente de la ventana B logra superar de manera escasa 200 luxes, mientras todos los que se encuentran a 4.50 m, ni siquiera pueden alcanzar 100 luxes. Una mención especial requieren los equipos signados con los números 15 y 16 ubicados en medio de la habitación a 1.5 y 3m de la fachada respectivamente, dado que solo éste último marca en un tiempo muy corto mas de 100 luxes, de las 9:19 a las 9:59, mientras el que se encuentra mas cercano a la pared muestra un comportamiento similar a los que están en la parte trasera del cuarto, es decir los niveles de iluminación que alcanzan son muy reducidos, aún estando muy cerca de la fachada que capta el rayo solar, por lo que el muro, por su masividad se convierte en una barrera infranqueable para la luz, que nos habla de la necesidad de abocinamientos hacia el interior de las ventanas cuando los paramentos deben tener un grosor considerable, como sucede en

algunos sistemas ecológicos que usan neumáticos, pacas de heno o adobe, entre otros.

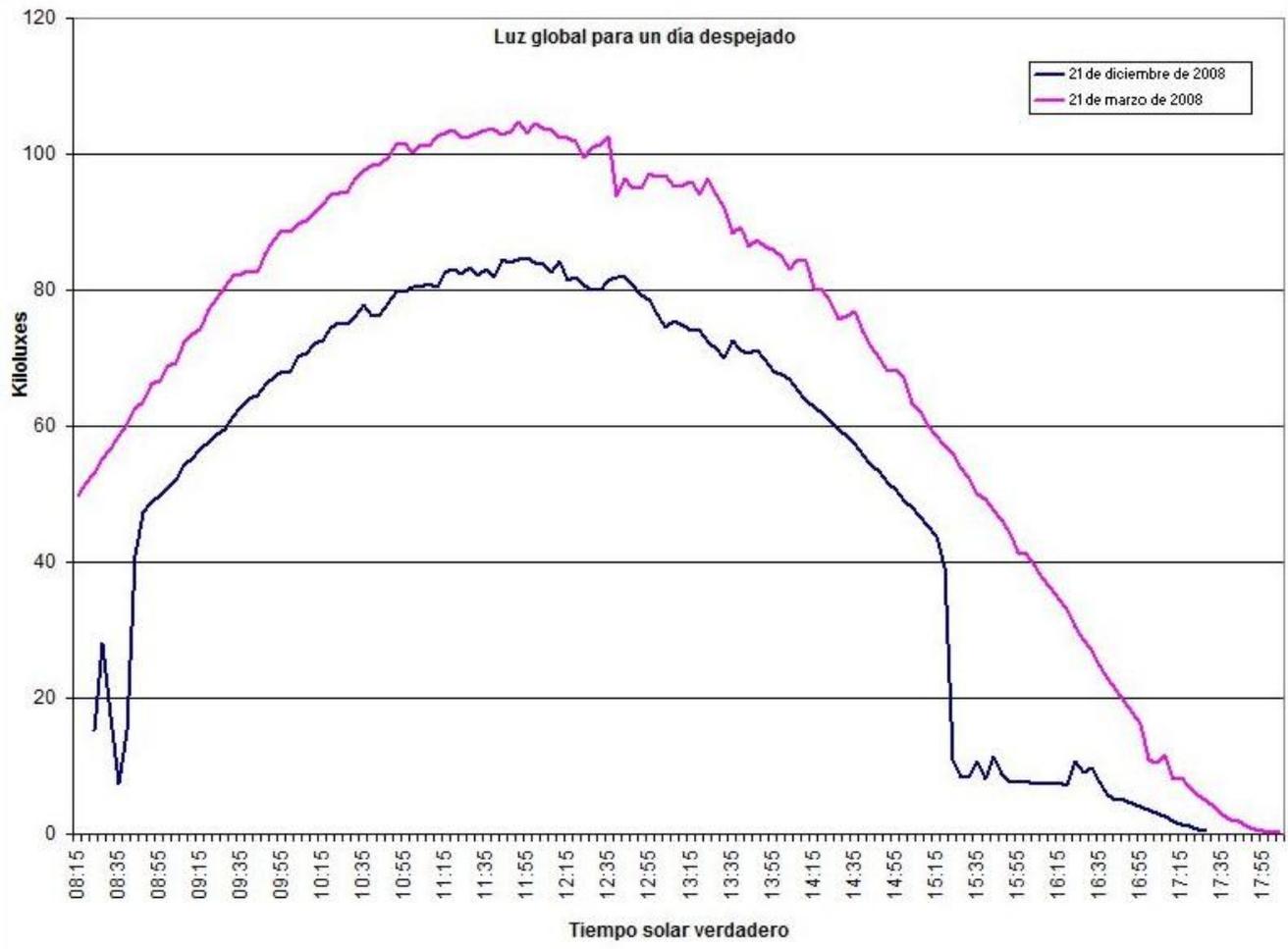


Gráfica N°27, Tendencia polinómica para fotómetros a 4.5m de la fachada

Con la finalidad de encontrar aquellas diferencias que teóricamente deberían producirse al alterar las condiciones interiores de la habitación, realizamos la comparación entre la luz captada por los fotómetros ubicados a 4.5 metros de las ventanas con el plafón colocado a 2.75 m y 3.05m, siendo esta la única modificación artificial, realizamos el promedio para cada día y a la curva resultante en la gráfica le aplicamos una línea de tendencia polinómica, las jornadas utilizadas para esto fueron el 13 y 14 de abril y 14 de mayo, considerados todos días con bastante nubosidad, en los dos primeros la cubierta interior se mantuvo en la posición más baja (2.75 m) y el 14 de mayo se había subido a 3.05 m.

Los resultados pueden ser

apreciados en la gráfica N° 27 y si bien en los picos la posición del plafón a mayor altura muestra valores superiores a aquellos en que está ubicado en la posición más baja, en la parte central de la misma curva se tiene una gran hondonada. Por su parte las tendencias del

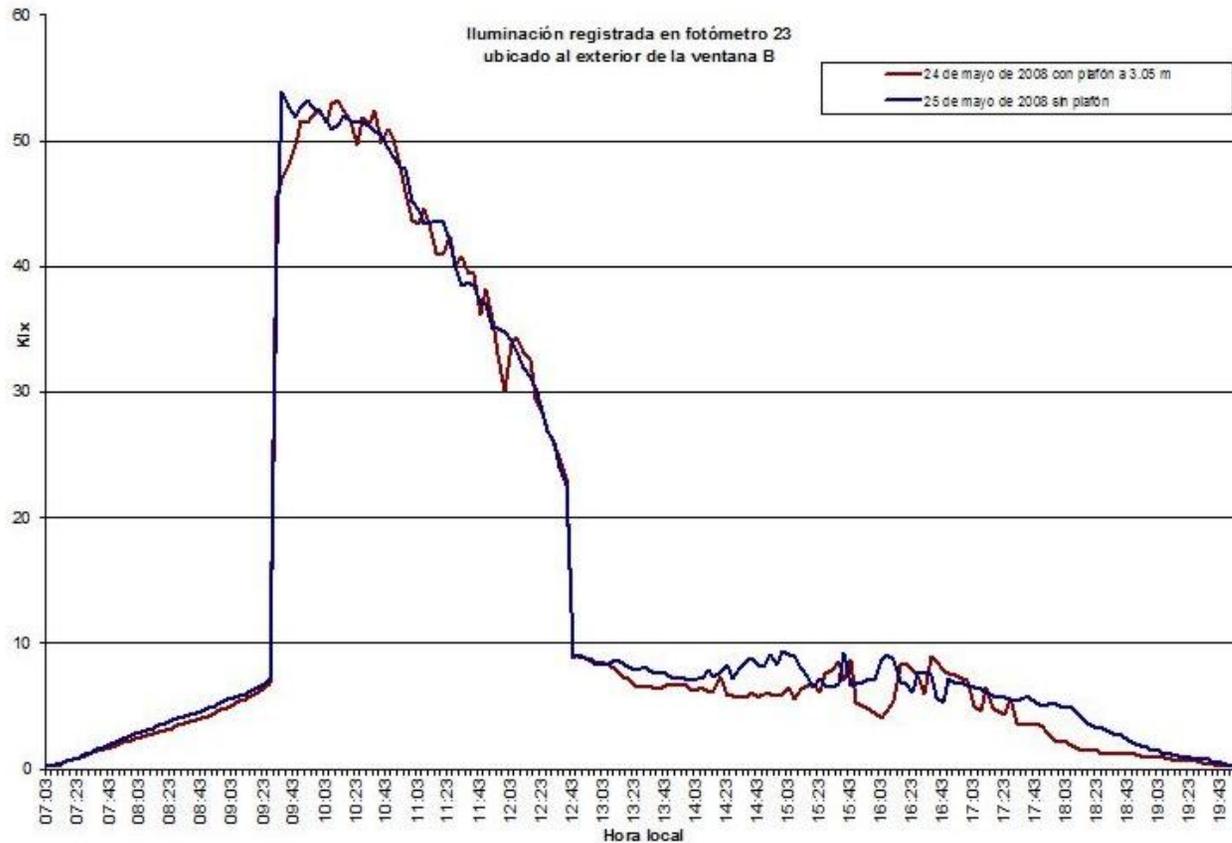


Gráfica N°28, Iluminación global captada en dos épocas del año en un día despejado.

plafón a 2.75 m tienen comportamientos muy disímiles, tanto con la posición más alta de este aditamento como entre ellas, todo esto, lo único que nos permite afirmar es la necesidad de desarrollar métodos de trabajo para realizar una óptima investigación, pues cualquier conclusión que pudiéramos ofrecer sería fácilmente descartable, por carecer de una metodología que le diera sustento. En primer lugar, se tendrían que establecer parámetros en términos de los niveles de iluminación solar, para la clasificación de los tipos de días, pues como es posible apreciar en la gráfica N° 28, si se compara la luz global de invierno (84 klx) con la de primavera (104 klx) a la hora de la culminación, vemos una variación considerable, teniendo en cuenta que en ambos casos el cielo está totalmente

despejado, (para los días nublados, no tenemos datos suficientes, pero hemos insistido en la necesidad del estudio de las nubes, que también debieran ser objeto de parametrización).

Además en verano se pueden obtener valores máximos cercanos a 120 kiloluxes para esta variable, de modo que la diferencia puede acercarse a 40000 unidades de luz, o dicho de otra forma, 50% más iluminación de una época a otra.

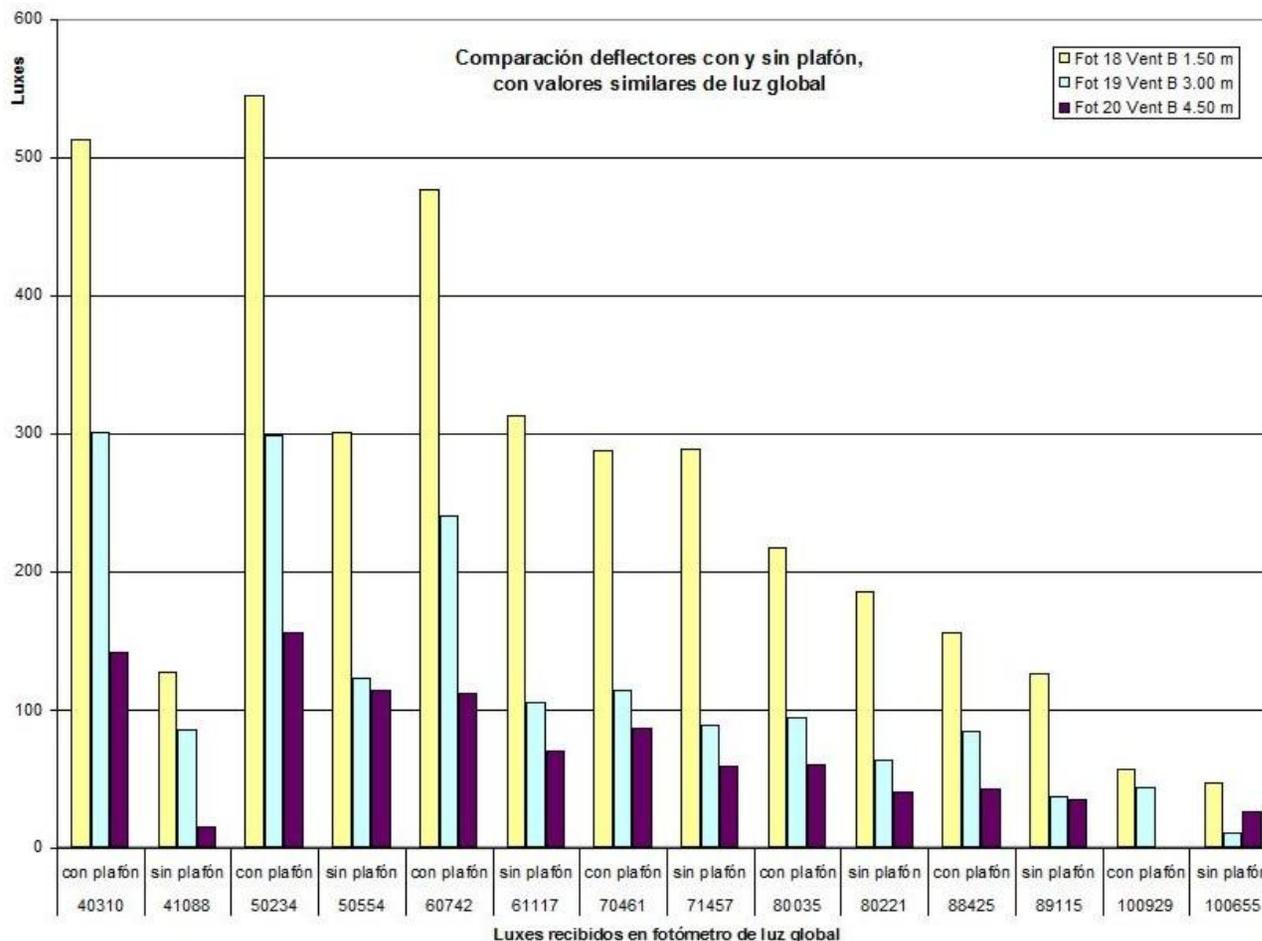


Gráfica N° 29, Iluminación global captada hacia el oriente desde el exterior de la ventana B los días 24 y 25 de mayo de 2008.

4.1.7.- Días parcialmente nublados, ventana B con deflectores de luz, con plafón a 3.05 m y sin plafón, 24 y 25 de mayo de 2008

Es necesario realizar la comparación de estas dos jornadas dado que es el momento en que se mantuvieron los deflectores, la diferencia entre ambos radica en que en el primero se contaba con el plafón colocado a 3.05 metros de altura y en el segundo este elemento fue retirado, contando en ambas ocasiones con los deflectores de luz. En la gráfica de los datos exteriores captados por el fotómetro 23 ubicado en la ventana B se observa que los dos días son muy semejantes en cuanto a las condiciones lumínicas, lo cual da una

mayor certeza a nuestro análisis y dado que el cálculo del tiempo solar verdadero arroja una diferencia de 10 segundos para los lapsos en cuestión, podemos realizar comparaciones para cada aparato en cualquier horario de ambos días considerando que se trata de la misma posición del gran astro, pues la captación de datos se realiza cada 4 minutos y el movimiento realizado por el sol en los 10 segundos mencionados puede ser despreciado, pues las condiciones del rayo incidente, geoméricamente hablando son iguales.

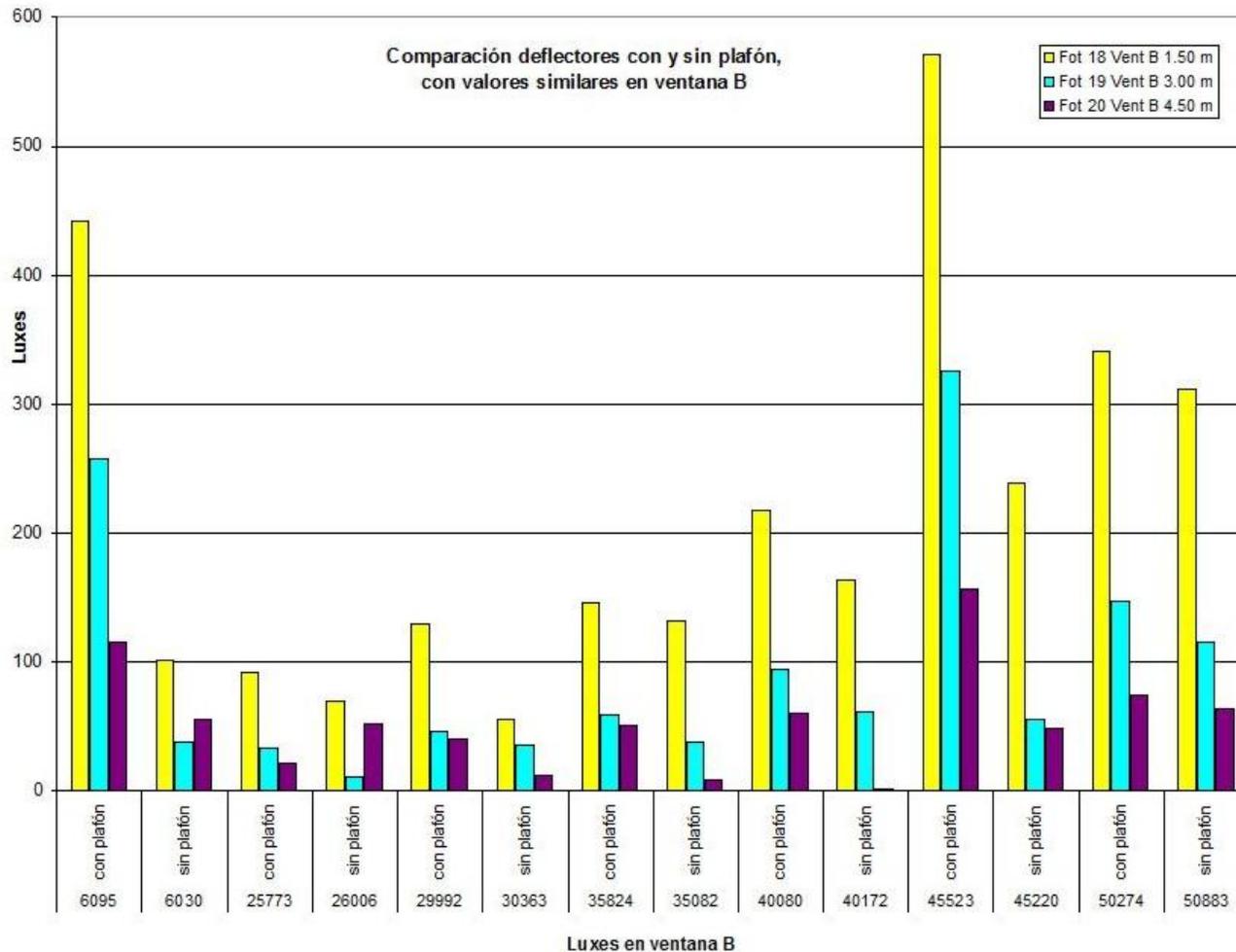


Gráfica N° 30. Comparación de valores interiores en igualdad de condiciones de luz global.

Además, es viable tomar como base para nuestro análisis el sensor ubicado hacia el exterior de la ventana B de la habitación, puesto que al estar enfocado hacia el oriente, recibe toda la luz que “ve” la ventana.

El análisis de la gráfica solar para ambos días nos permite afirmar que el sol comienza a incidir en el cuarto aproximadamente a las 9:07 a.m., esto coincide con el momento en que las gráficas de los fotómetros interiores incrementan su valor de forma considerable pues pasan en pocos minutos al máximo, pero es claro que los niveles de iluminación se mantienen muy por debajo de

los requerimientos para desempeñar cualquier trabajo visual en la mayor parte de la habitación, excepto por este momento en que se supera con dificultad los 500 luxes.



Gráfica N° 31. Comparación de valores interiores en igualdad de condiciones de luz en la ventana B

Los fotómetros 18, 19 y 20, ubicados en frente de la ventana B, en el interior, nos muestran la forma como decrece la iluminación en una línea recta perpendicular a la fachada. Así, podemos ver que a las 9:39 a.m. del día 24 de mayo, el primero mide la cantidad de 48 klx, mientras los aparatos ubicados en el interior marcan 567 lx, 310 lx y 160 lx respectivamente, al día siguiente, estas mediciones son, en el mismo orden; 52 klx, 300 lx, 123 lx y 114 lx, por lo tanto, aún cuando en la ventana se tiene un 9.6% mas de luz, en el interior ésta se ha reducido a 52 % en el fotómetro mas cercano a la ventana, a 39 % en el que ocupa la posición central y 71 % en el mas alejado.

La misma situación se repite como una constante a lo largo

del día, aún cuando no haya luz directa sobre los difusores, pues la culminación se da en estas fechas a las 13:32, pero cabe recordar que por el alero, en la parte superior, la luz directa deja de incidir antes, por lo que el sensor ubicado en la puerta cae a las 12:43 y observando la gráfica N° 31 podemos apreciar que si el estudio se realiza considerando para ambos días, el mismo nivel de iluminación en el fotómetro exterior, el resultado es semejante, dado que en todas las posiciones se obtiene una clara influencia del plafón, excepto cuando los niveles caen por debajo de 50 luxes, donde no podemos ser concluyentes, pues se producen saltos en el fotómetro 20, ubicado en la parte trasera, los que a nuestro juicio se producen por la extrema sensibilidad de los sensores que reaccionan a cualquier alteración, tal como podría ser el paso de un microbús cuyo techo pudiera reflejar mas luz hacia los deflectores y de estos al fotómetro en el momento de la lectura, (este hecho no fue medido experimentalmente, pero se percibió en el sitio como una potencial fuente de alteraciones) y tomando en cuenta la escasa cantidad de luz que significa menos de un centenar de luxes, no profundizaremos en estos aspectos, pues ni siquiera nos parece adecuado pretender obtener conclusiones.

Otra consecuencia que puede ser apreciada en las gráficas 30 y 31 es un énfasis de la influencia del plafón en el aumento de la iluminación al interior de la habitación, lo que es aún más claro cuando incide luz directa sobre los deflectores, pues cuando éste elemento de plástico blanco está presente los valores de los fotómetros muestran una marcada diferencia con aquellos en que no está, no obstante, este fenómeno también se produce en presencia de luz difusa, pero se requiere un elevado número de luxes para que esto se manifieste sin lugar a dudas, ya que al existir bajos niveles de iluminación, no es posible ser concluyentes.

A modo de conclusión, podemos decir que los deflectores en conjunto con el plafón juegan un papel de relevancia, pero solo en los momentos en que existe incidencia directa de los rayos solares sobre los primeros o elevados valores de luz difusa en el exterior, pero cuando no existen estas condiciones, los elementos horizontales colocados sobre la ventana pasan a ser una obstrucción, lo que nos lleva a establecer que los deflectores de luz nunca deberían ser fijos y más aún, requieren ser removidos cuando no hay incidencia solar.

Capítulo V

Estudios de iluminación natural en un modelo a escala

“lo único permanente en la iluminación
solar es su condición cambiante”

Henry Cabroler Sanhueza

5.1.- Estudio de campo en modelo a escala.

Con la intención de establecer comparaciones entre un modelo real y uno a escala se construyó una maqueta con una relación de 1:5 respecto del inmueble ILC67, la que fue ubicada sobre la azotea del edificio del Departamento de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, (en lo sucesivo DRS, ver imagen N° 90). La maqueta fue construida con madera aglomerada de 10 mm, con medidas exteriores de 1.60 m de ancho por 1.22 m de fondo y una altura de 0.85 m, la fachada se realizó con cartón corrugado para darle un grosor de 10 cm y emular así el espesor del muro en el edificio real, en el paramento frontal se insertaron dos ventanas de 32 cm de alto por 60 cm de ancho. La orientación que se le dio fue la misma del edificio ubicado en Isabel la Católica, sin embargo, por razones ajenas a nuestra voluntad y posibilidades no se consideraron fielmente las proporciones ni los materiales y colores interiores, de esta forma las relaciones que podemos establecer solo se pueden considerar con respecto a la geometría de la luz. El periodo de observación y colecta de datos se extendió del 17 de diciembre de 2008 al 22 de enero de 2009. Los números asignados a los sensores quedaron de la siguiente forma:

Fotómetro	Exterior	Interior de la maqueta
16	Horizontal global	
11	Horizontal difusa	
15	Vertical oriente	
19		Posición norte a 28 cm del paño interior de la ventana
18		Posición norte a 58 cm del paño interior de la ventana
17		Posición norte a 88 cm del paño interior de la ventana
12		Posición norte a 1.16 m del paño interior de la ventana
22		Posición central a 28 cm del paño interior de la ventana
21		Posición central a 58 cm del paño interior de la ventana
20		Posición central a 88 cm del paño interior de la ventana
13		Posición central a 1.16 m del paño interior de la ventana
25		Posición sur a 28 cm del paño interior de la ventana
24		Posición sur a 58 cm del paño interior de la ventana
23		Posición sur a 88 cm del paño interior de la ventana
14		Posición sur a 1.16 m del paño interior de la ventana

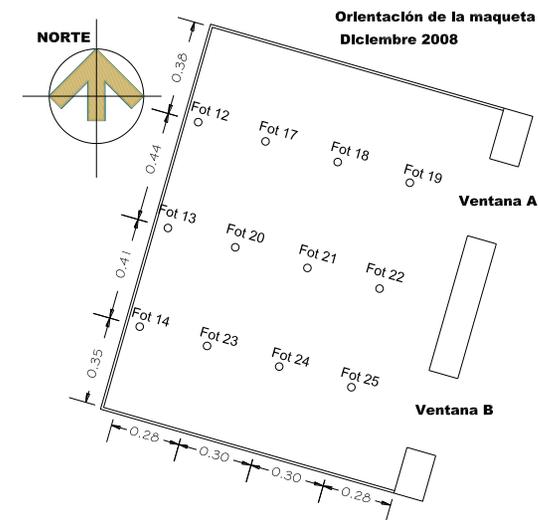


Imagen N° 89 Ubicación de los sensores al interior de la maqueta

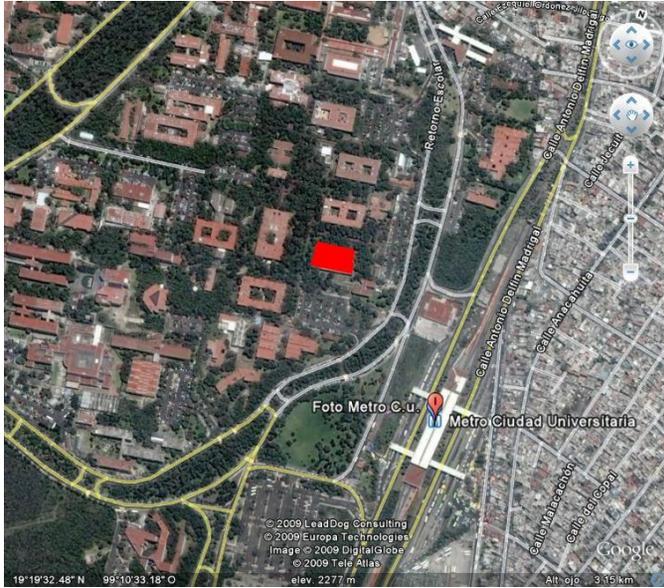


Imagen N° 90 Ubicación del edificio del Departamento de Radiación Solar(en rojo)

bajo a las 9 hora local que en tiempo solar verdadero corresponde a las 8:26 para el 21 de diciembre. Para cubrir el paso del sol se requirieron 5 elementos que por su grosor redujeron el área de ventana en 16.6%

b) deflector grueso (imagen N° 92), confeccionado con los mismos materiales que los anteriores, la diferencia consistió en aumentar el grosor de la sección, ya que tanto el ancho como el largo permanecieron iguales a aquellas usadas en el deflector delgado, en este caso se cortó un triángulo de cartón minagris de 10 cm de base por 6.5 de alto con los que se construyó el alma y del mismo modo que en el anterior, se les perforaron agujeros por los que se pasaron los palillos con los cuales se detuvo del marco. La esquina opuesta al cateto más largo se redondeó para permitir un mayor paso de la luz. En este caso la separación entre los elementos en el marco debió ser de 8 cm, con un total de tres piezas por ventana, pero es preciso hacer notar que por el espesor que adquirieron los deflectores se produce una

El trabajo realizado en este caso consistió en estudiar la influencia que distintos tipos de deflectores y vidrios pueden tener en el interior de la maqueta; con este fin se construyeron tres elementos para reflejar la luz solar; a) deflector delgado (imagen N° 91), con dimensiones de 10 cm de ancho, 29 cm de largo y 1 cm de espesor y en el corte transversal una forma cercana al ala de un avión, en la parte superior fue cubierto con papel metalizado plata y en la inferior por cartulina bond blanca, el cuerpo se realizó con unas tiras de cartón minagris con la forma indicada, con dos perforaciones de 5 mm, para colocar de lado a lado unos palillos de madera de 30.5 cm de largo que sirvieron de sujeción al marco de la ventana, donde fueron colocados cada 10 cm para cubrir un ángulo que de acuerdo con la proyección del haz solar, debía ser de 33° para no dejar pasar la luz directa al interior, ya que éste sería el rayo más

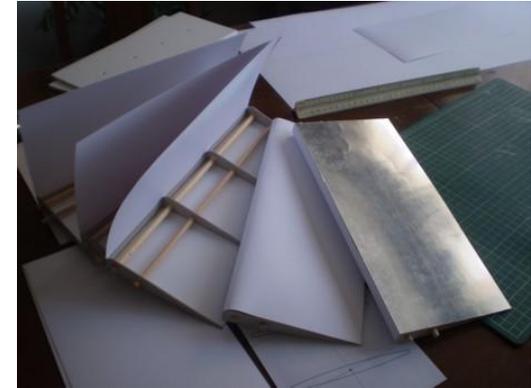


Imagen N° 91 construcción de los deflectores delgados

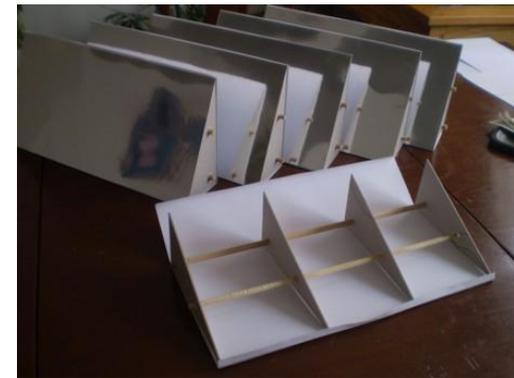


Imagen N° 92 Construcción de los deflectores gruesos

reducción de la ventana en un 32.5%.

c) deflectores verticales, una vez mas los materiales usados consistieron en papel bond, papel metalizado y cartón minagris como estructura, pero en este caso solo se usó un palillo en el eje de simetría, sobre el cual se colocaron dos láminas de cartón de 10 cm de ancho que se juntaron en los extremos, por lo que el palillo actuó como separador formando una sección transversal similar a la que es posible apreciar en la imagen N° 93 . Por su construcción, este elemento es el que menos área redujo de la ventana pues las cuatro piezas usadas en cada vano produjeron una disminución de 13.3% a la misma.

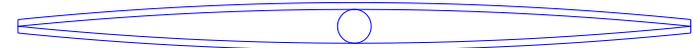


Imagen N° 93. Sección del deflector vertical

Además se realizó una combinación de vidrios para cada uno de los juegos de deflectores, de la siguiente forma;

- a) vidrio transparente de 3mm,
- b) vidrio esmerilado de 3 mm, el cual se utilizó por sus dos lados para confrontar los resultados y determinar si existe influencia perceptible entre la cara opaca y la brillante sobre el ingreso de luz.
- c) sin vidrio, es decir abierto, para intentar una comparación por la pérdida de luminosidad debida al material vítreo.

Dado que la construcción de la maqueta se realizó por parte de los alumnos del curso “Interacción con el medio” en el transcurso del semestre 2009-1 y fue utilizada por estos, solo una vez concluido dicho periodo lectivo fue posible nuestra utilización, en la que se llevaron a cabo las siguientes operaciones durante el proceso de campo, que se detallan a continuación de forma cronológica;

- 17 dic, colocación de los deflectores horizontales delgados sin vidrio.
- 19 dic, instalación de los vidrios esmerilados con la cara brillante hacia el exterior, además se cubrió la maqueta por el exterior con un plástico blanco para protegerla de las heladas y el rocío.
- 22 dic, se voltearon los vidrios, dejando la cara opaca hacia el exterior.
- 23 dic, se realizó el cambio de vidrios por los transparentes.
- 24 dic, retiro de los deflectores, se dejaron los vidrios transparentes.
- 26 dic, nuevamente se colocaron los vidrios esmerilados, en esta ocasión con la cara brillante hacia fuera.
- 27 dic, se voltearon los vidrios, cara opaca al exterior.
- 29 dic, se decidió no realizar cambios por ser un día totalmente nublado.
- 30 dic, este día se instalaron los deflectores verticales dejando el reflejo especular hacia fuera de la maqueta, también se colocaron vidrios transparentes en las ventanas.
- 2 ene, cambio de los vidrios transparentes por los esmerilados, dejando la cara brillante hacia fuera de la maqueta.
- 5 ene, se voltearon los vidrios, ahora la cara opaca queda afuera.
- 6 ene, se retiraron los vidrios, dejando los deflectores.

- 7 ene, se voltearon los deflectores, ahora la cara blanca de los mismos queda expuesta al exterior y la ventana sigue sin vidrio.
- 8 ene, colocación de los vidrios transparentes.
- 9 ene, cambio de los vidrios por esmerilados, dejando hacia fuera la cara opaca.
- 10 ene, se voltearon los vidrios para dejar la cara brillante al exterior.
- 12 ene, retiro de los deflectores y los vidrios, solo quedó el marco de la ventana.
- 13 ene, colocación de los deflectores gruesos, sin vidrio.
- 15 ene, se colocaron los vidrios transparentes.
- 19 ene, cambio de los vidrios, colocando los esmerilados con la cara opaca hacia fuera.
- 20 ene, se voltearon los vidrios, queda la cara brillante al exterior.
- 21 ene, retiro de los vidrios, dado que los días 13 y 14 hubo mucha nubosidad, para tener valores más homogéneos.
- 22 ene, concluye la recolección de datos.

Para determinar la separación de los deflectores se consideró el momento del rayo solar con el menor ángulo vertical, y puesto que la maqueta quedó frente a una conífera que le produjo sombra hasta las 9:50 hrs del día 19 de diciembre, se estableció este momento para decidir la separación de los deflectores horizontales, que para aquellos delgados se calcularon mediante una inclinación del ángulo vertical de sombra de 33° y para los gruesos de 35° (imágenes 94 y 95 respectivamente)

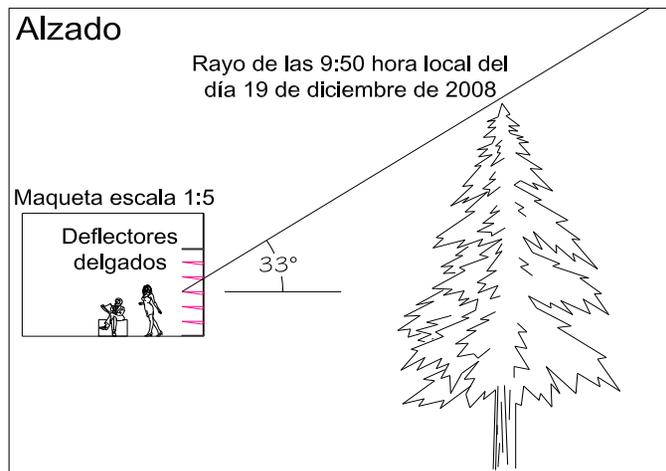


Imagen N° 94

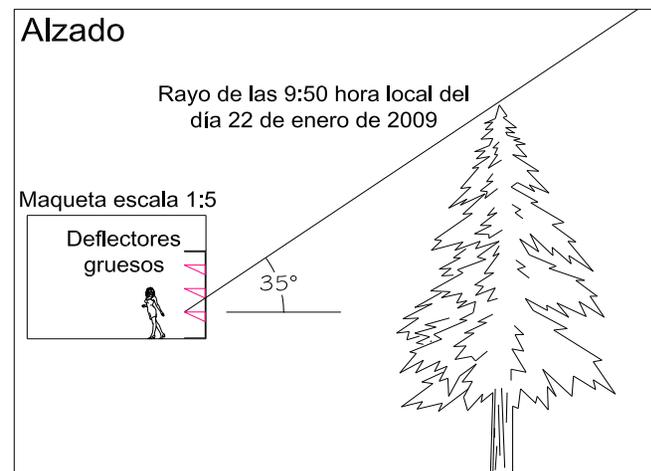


Imagen N° 95

La diferencia corresponde a los periodos en que los dispositivos fueron colocados, que para los primeros sucedió entre el 18 y el 23 de diciembre de 2008 y para los segundos ocurrió entre el 18 y 21 de enero de 2009. Para la separación de los deflectores verticales, se consideraron 4 piezas, pues el rayo solar podía ser detenido con tres, pero la posición de los mismos

para impedir que el rayo directo penetrara al interior, produciría un reflejo de la luz hacia el exterior, lo cual es contrario a nuestro interés, razón por la cual optamos por los 4 mencionados, colocados equitativamente en la ventana. De acuerdo con la proyección estereográfica, el ángulo horizontal de sombra, para el 10 de enero, fecha con la menor declinación para el periodo en que estos elementos se colocaron (31 de diciembre al 10 de enero), corresponde a un ángulo de 131.5° respecto del norte o 41.5° referido al sur y puesto que en esta posición los rayos más australes del 21 de diciembre no penetran al interior (imagen N° 96), el movimiento hacia el norte del paso solar, no producirá rayos que puedan penetrar al interior.

5.2.- Presentación de los datos y análisis de resultados

Producto de la forma en que se realizó la investigación en esta etapa, los datos graficados se presentan en matrices donde en las cinco columnas se ubican las diferentes alteraciones introducidas a la conformación de las ventanas y en las cuatro filas o renglones el tipo de vidrio utilizado en cada caso, lo que arroja un total de veinte variables para el estudio (cuadro N° 8), de acuerdo con el esquema del cuadro N° 8 que se mantuvo sin afectar el orden para facilitar el análisis visual. De esta forma se muestran en primer lugar la conducta de las componentes exteriores, es decir, luz global, difusa y vertical oriente ubicada en la fachada de la maqueta. Con la finalidad de tener un referente que permita realizar comparaciones, se buscaron aquellos días en que se presentaran las condiciones con mayor semejanza, sin embargo, dadas las condiciones cambiantes del cielo en la Ciudad de México, a las que ya nos hemos referido innumerables veces anteriormente, además del reducido tiempo disponible para la recolección de datos, esto no siempre ha sido posible.

La segunda matriz de gráficas exhibe los datos interiores en su totalidad, correspondientes a los 12 fotómetros ubicados en tres hileras de cuatro instrumentos a partir de la fachada de acuerdo con lo mostrado en la imagen N° 89. En las cuatro matrices siguientes es posible apreciar la representación de los sensores ubicados en filas, iniciando con la primera que comprende los tres más cercanos a la fachada y así sucesivamente hasta la cuarta en la que se ubican los que están junto a la pared posterior de la maqueta.

Para los tres últimos conjuntos de gráficas los datos se muestran en hileras paralelas a los muros laterales y son nominados de acuerdo con su posición geográfica, comenzando con los que se encuentran al sur, luego en el centro y finalmente al norte.

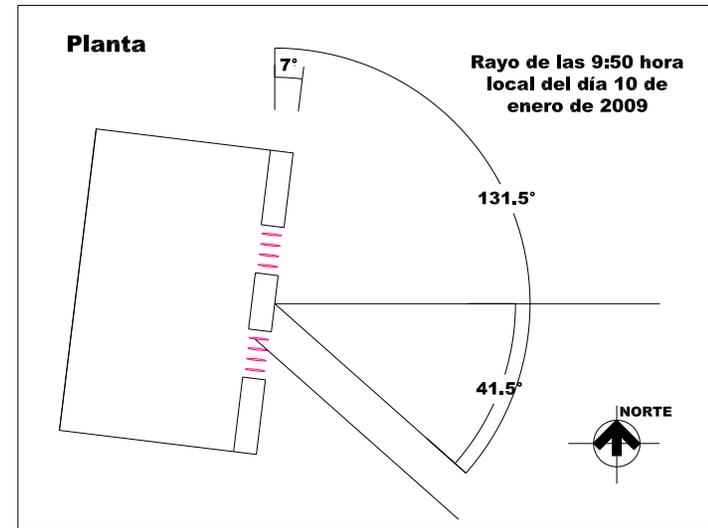


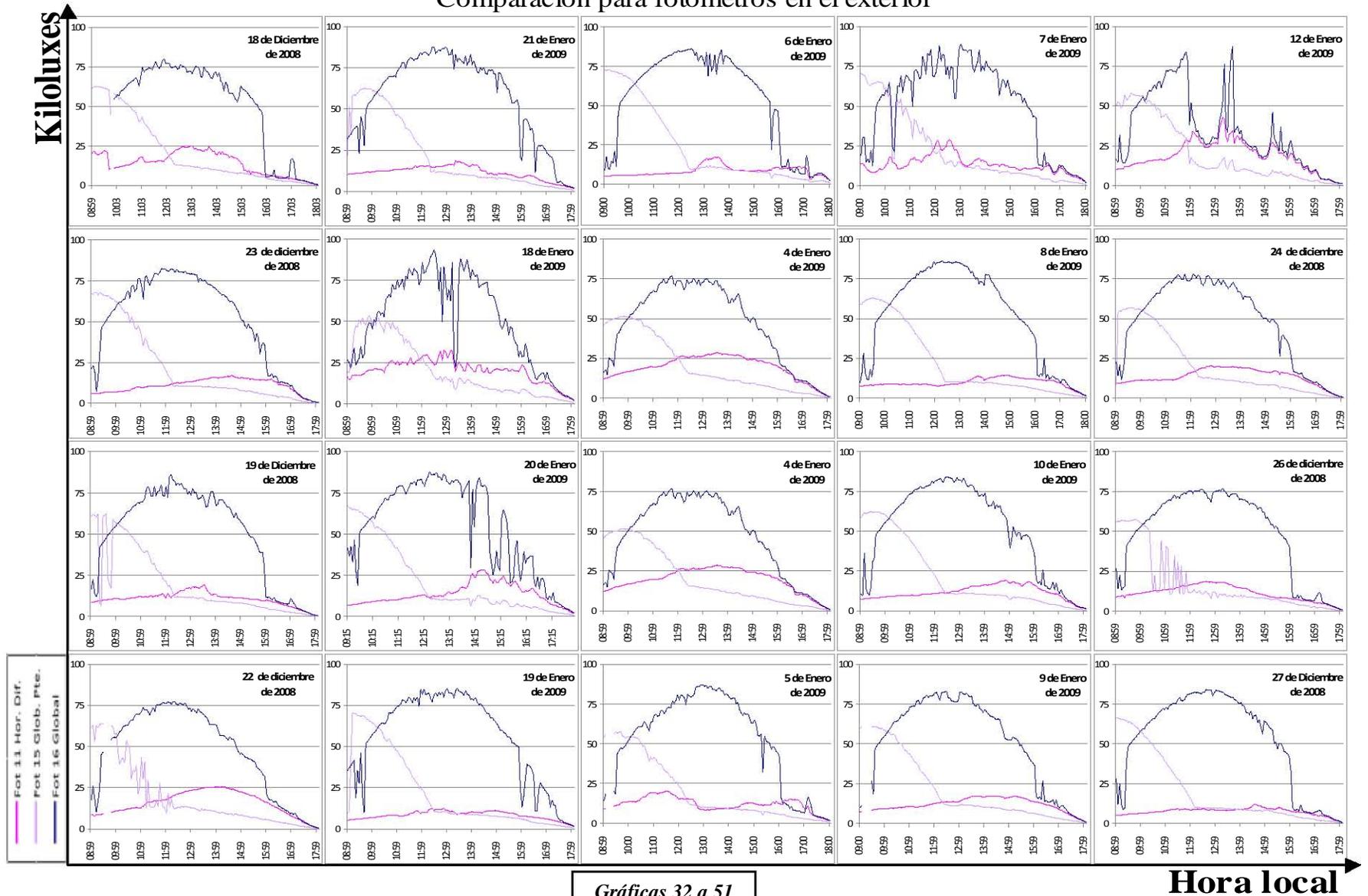
Imagen N° 96. Colocación de deflectores verticales

Así tenemos un total de nueve matrices con 20 conjuntos de datos cada una lo que nos arroja un total de 180 gráficas para realizar nuestros análisis

	Deflectores delgados	Deflectores gruesos	Deflectores verticales con reflejo especular hacia fuera	Deflectores verticales con reflejo especular hacia dentro	Vano abierto
Sin vidrio	18 diciembre de 2008	21 de enero de 2009	6 de enero de 2009	7 de enero de 2009	12 de enero de 2009
Vidrio transparente	23 diciembre de 2008	18 de enero de 2009	31 diciembre de 2008	8 de enero de 2009	24 diciembre de 2008
Vidrio esmerilado con cara brillante afuera	19 diciembre de 2008	20 de enero de 2009	4 de enero de 2009	10 de enero de 2009	26 diciembre de 2008
Vidrio esmerilado con cara opaca afuera	22 diciembre de 2008	19 de enero de 2009	5 de enero de 2009	9 de enero de 2009	27 diciembre de 2008

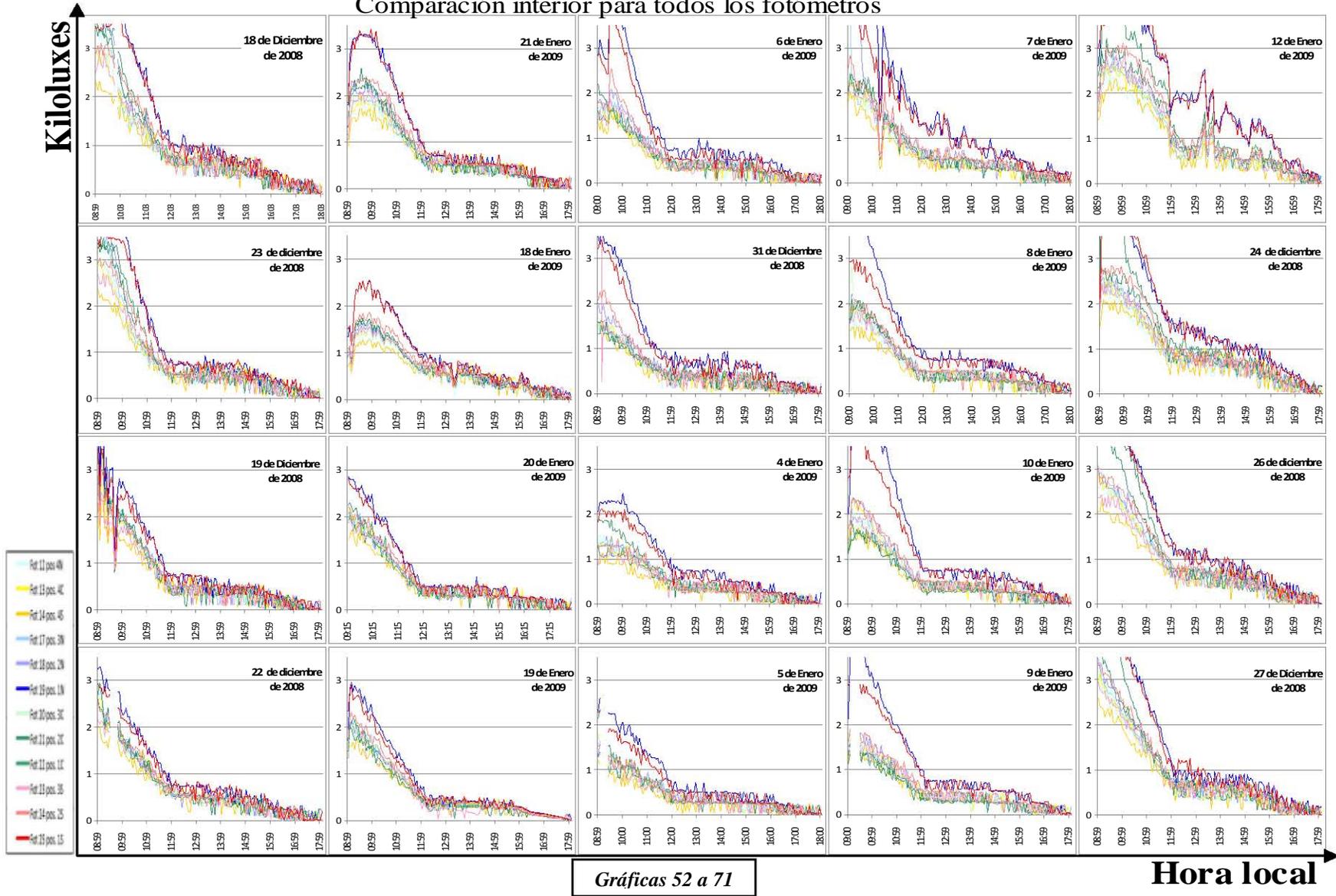
Cuadro N° 10. Conformación de la matriz de gráficas con días analizados y elementos que contienen las fachadas en cada caso

Comparación para fotómetros en el exterior



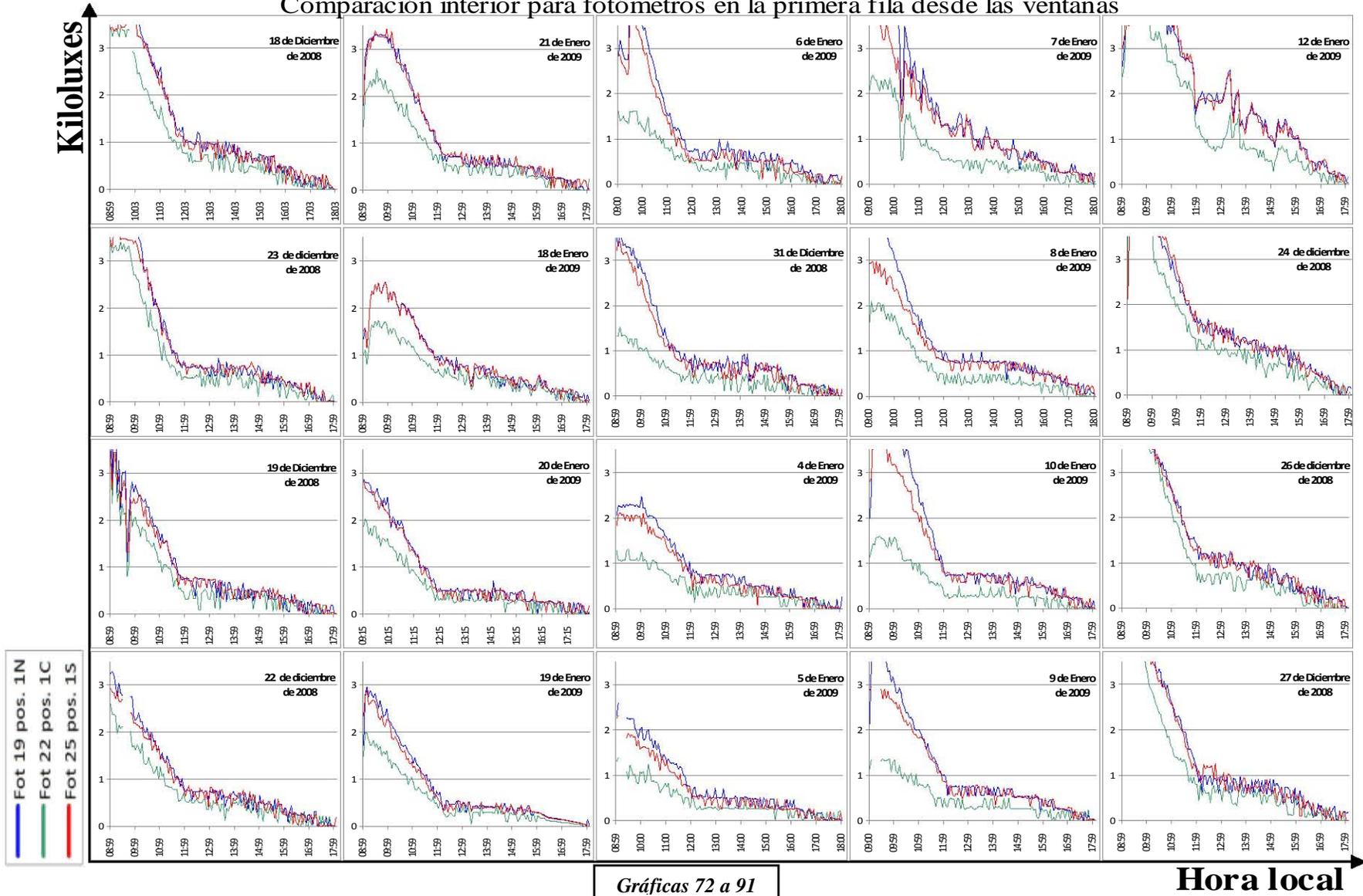
Gráficas 32 a 51

Comparación interior para todos los fotómetros



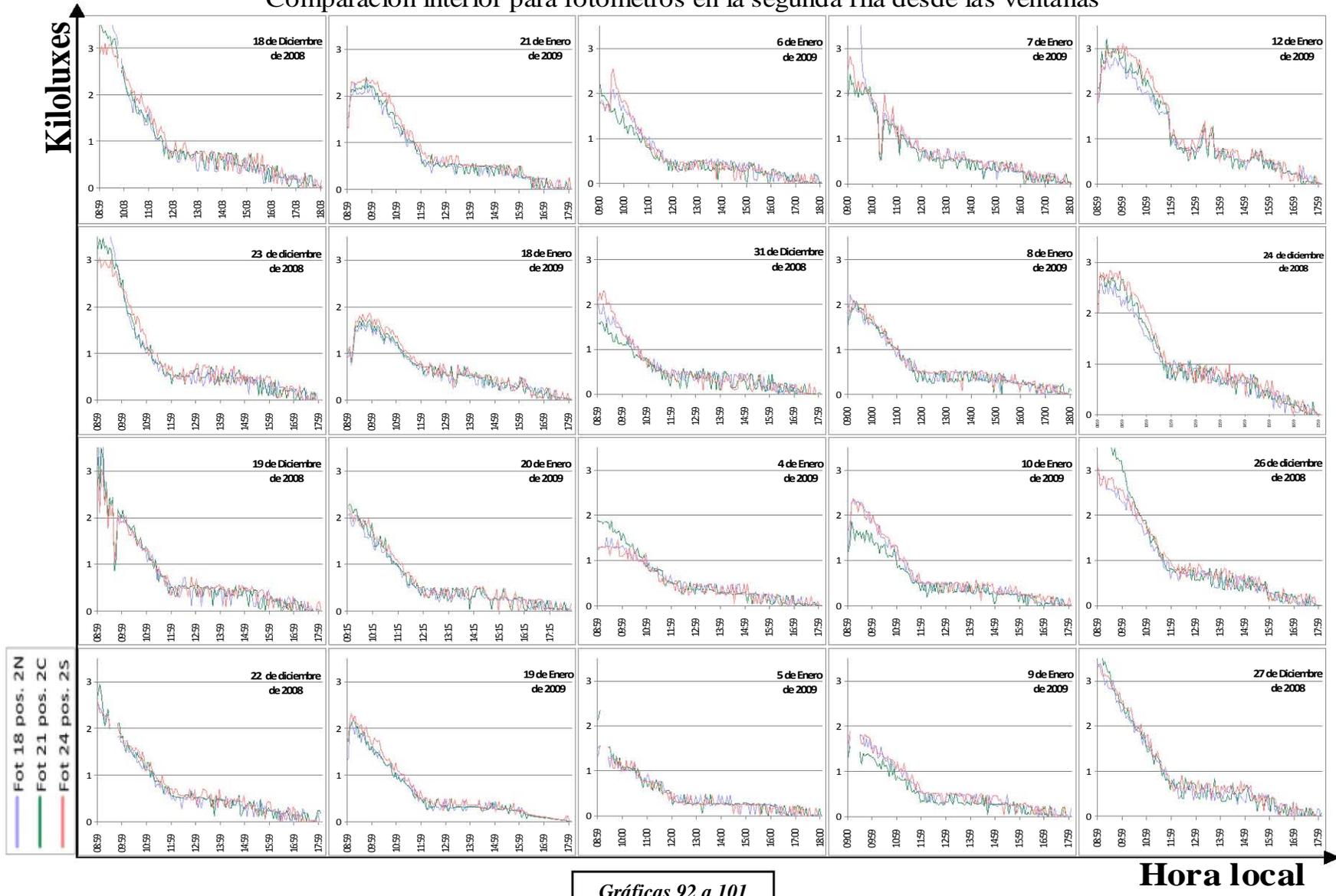
Gráficas 52 a 71

Comparación interior para fotómetros en la primera fila desde las ventanas



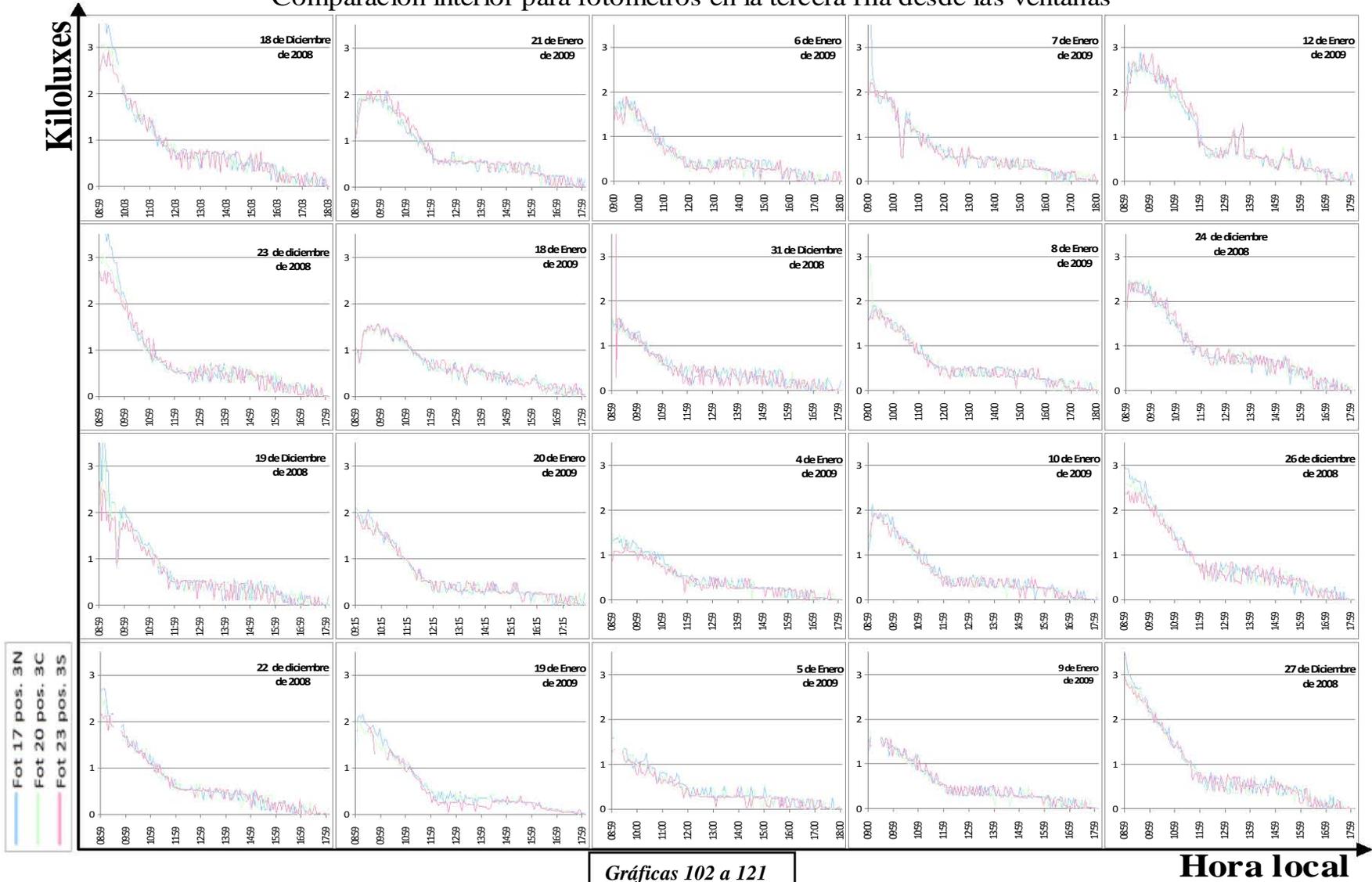
Gráficas 72 a 91

Comparación interior para fotómetros en la segunda fila desde las ventanas

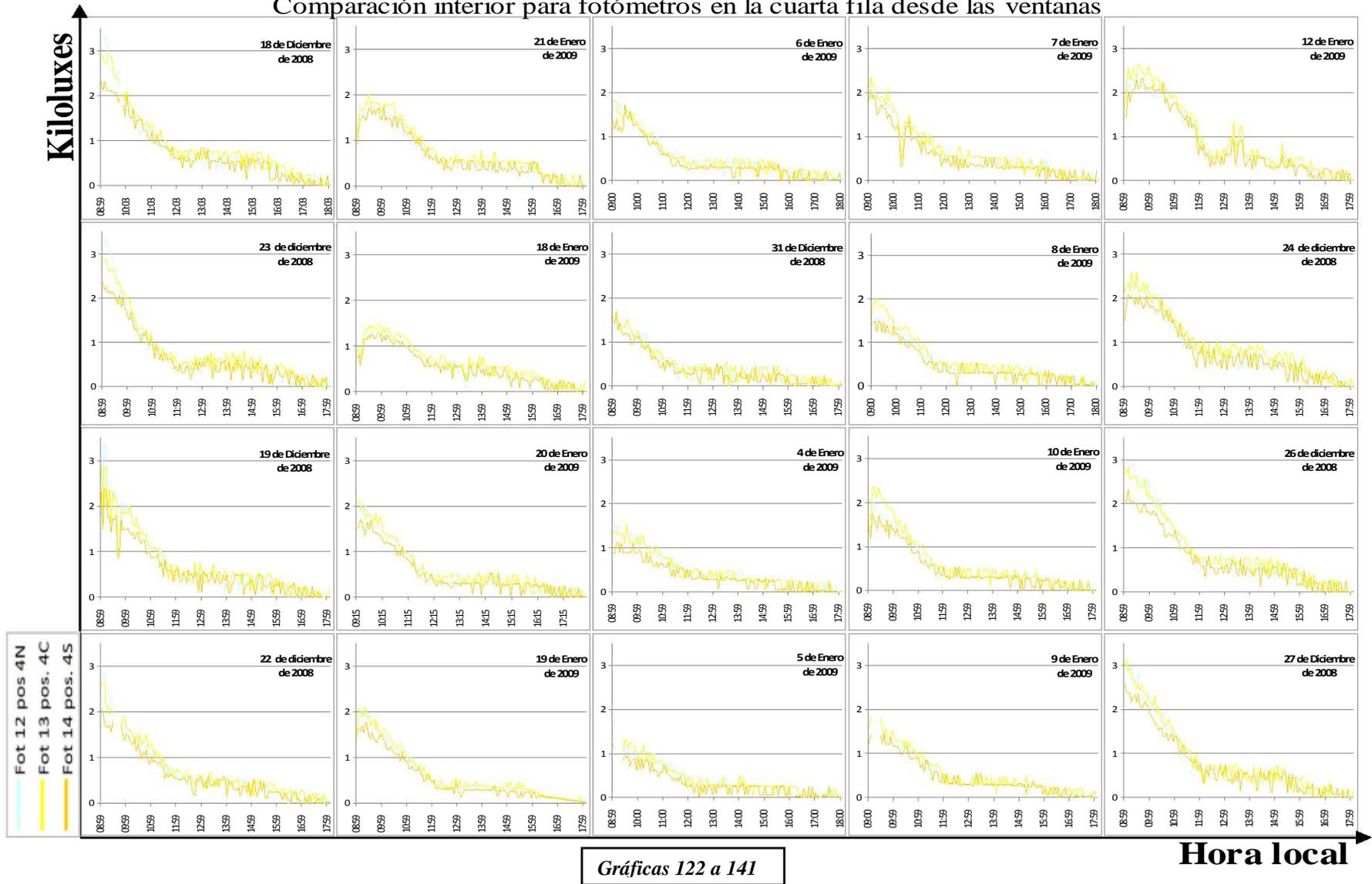


Gráficas 92 a 101

Comparación interior para fotómetros en la tercera fila desde las ventanas

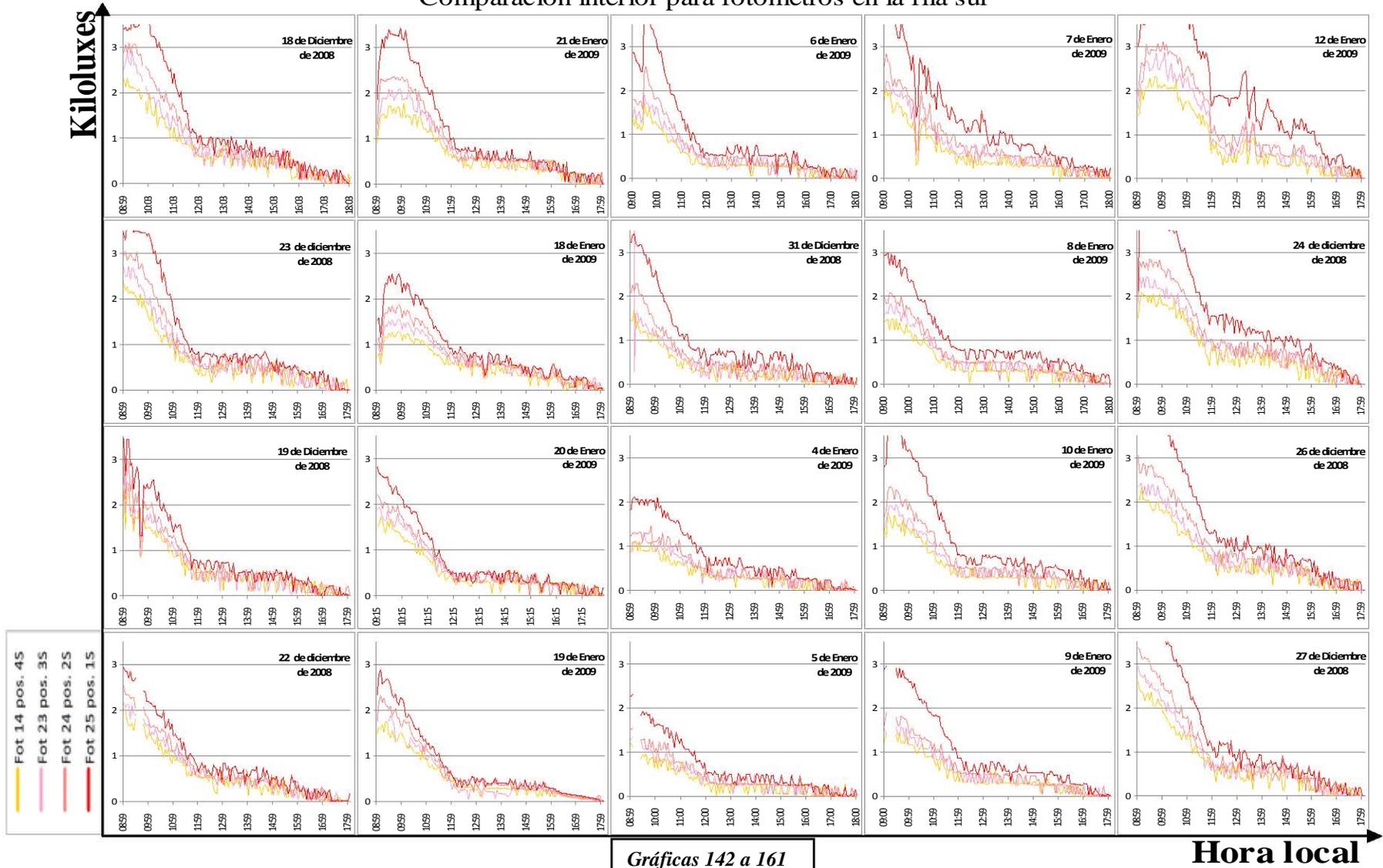


Comparación interior para fotómetros en la cuarta fila desde las ventanas

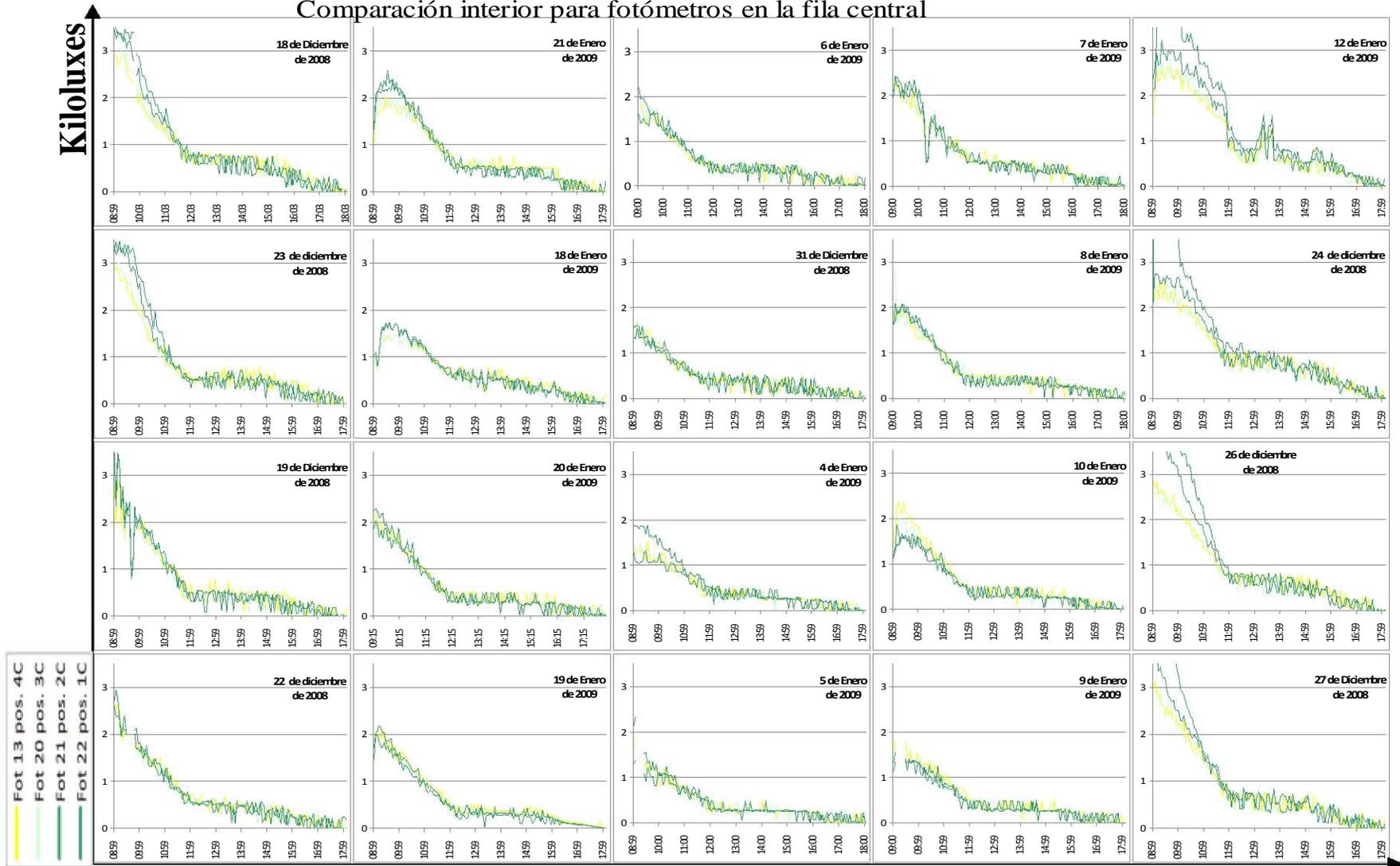


Gráficas 122 a 141

Comparación interior para fotómetros en la fila sur



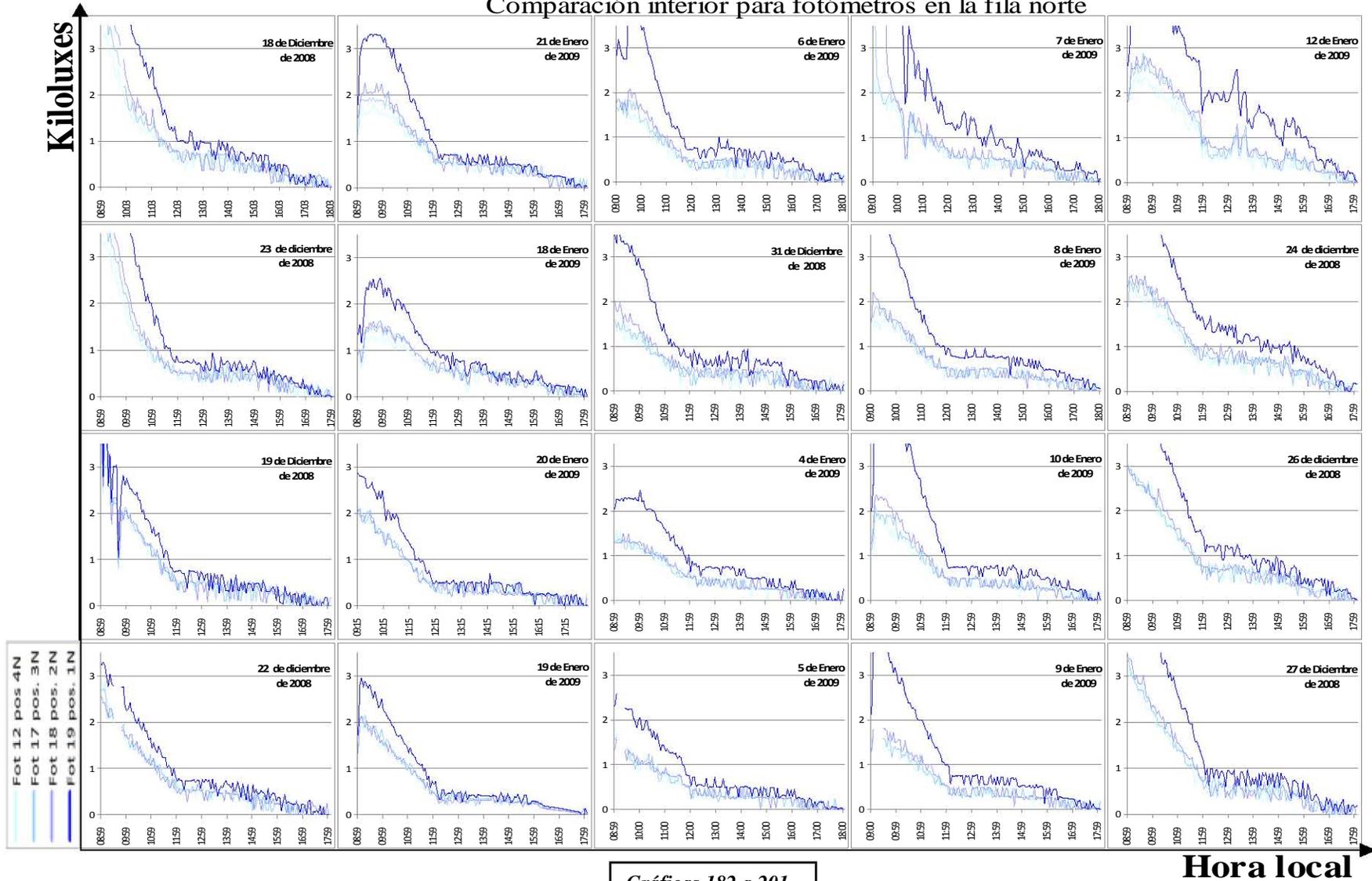
Comparación interior para fotómetros en la fila central



Gráficas 162 a 181

Hora local

Comparación interior para fotómetros en la fila norte



Gráficas 182 a 201

Del análisis de las matrices de gráficas, podemos decir que en términos generales cualquier elemento que obstruya el paso de luz producirá una reducción en la iluminación interior, esto que puede parecer obvio, se puede apreciar en todas las filas, pues la columna donde tenemos el vano abierto siempre es superior a sus pares, con cualquier tipo de deflector, lo que no es tan claro si realizamos esta comparación con relación a los vidrios, pues en el sentido vertical no percibimos diferencias significativas.

Otra cualidad que se muestra claramente es que al usar los deflectores la luz directa produce una mayor posibilidad de iluminación que la difusa, pues en todos los casos analizados cuando el rayo solar incide frontalmente sobre la fachada, la gráfica comienza con un valor superior y a partir de allí decrece conforme el astro se desplaza aumentando el ángulo vertical hasta llegar a la culminación donde se hace más homogénea la presencia de luz por un lapso variable, que podríamos considerar de alrededor de tres horas. La única excepción se produce con una presencia importante de nubosidad como la que se presenta el 12 de enero, cuando además la ventana está abierta sin obstrucción alguna, aquí la reducción de la iluminación es permanente pero después de la culminación es cercana al doble de la registrada en los otros días estudiados, pero a diferencia de estos, existe una gran variabilidad, registrándose saltos de hasta 1000 luxes en el interior de la maqueta. Sin embargo, es de llamar la atención que no hay una alteración significativa en el momento de la culminación, sino más bien prevalece una situación de estabilidad luminosa que corresponde a la componente difusa. Esto puede ser verificado observando la totalidad de las gráficas asentadas en las matrices, pues en mayor o menor grado esta situación se hace presente de manera independiente de los elementos que obstruyan la ventana.

Al igual que lo ocurrido en el inmueble real con el primer fotómetro ubicado en medio de las ventanas se produce un desfase importante entre este instrumento y los que enfrentan a los vanos, mostrándose su curva por debajo de aquellos en todas las gráficas, lo que revela con claridad la influencia que tiene un paño de muro en la reducción de la iluminación en el área inmediatamente contigua, pues a partir de la segunda fila esta variable se iguala con las que ocupan las posiciones norte y sur correspondientes.

Respecto de los deflectores horizontales podemos decir que los gruesos producen una mayor reducción de la luz que penetra por la ventana, al disminuir el área abierta y el ángulo más pronunciado que poseen en la cara inferior no tiene una influencia importante para que el rayo directo se refleje hacia la parte trasera de la maqueta, puesto que aún cuando el día en que se colocaron se recibe una mayor luminancia en el fotómetro 15, que mide la luz vertical oriente, en la fachada (ver gráfica N° 28), se produce en el interior un nivel de iluminación igual a la que producen aquellos delgados, donde se registran valores alrededor de 5000 luxes menores en la cara frontal en presencia del rayo directo. Esto puede ser comprobado revisando las gráficas comparativas para los días 18 de diciembre de 2008 y 21 de enero de 2009, en los dos casos no hay vidrio en la ventana, el primero corresponde a los deflectores delgados y el segundo a los gruesos; la gráfica N° 28 corresponde a los registros de luz proveniente del oriente y la N° 29 a los promedios recibidos por todos los fotómetros en el interior de la maqueta. Para una mayor certeza de nuestro análisis hemos ubicado las variables con respecto al tiempo solar verdadero, en el que las 8:59 hora local corresponde a las 8:25 y 8:12 respectivamente. Si obviamos la parte inicial del día, ya que

en la jornada de enero la fachada recibe sombra de la conífera hasta las 9 hrs TSV, el resto del día las curvas son prácticamente una línea, excepto en el lapso entre las 11 y las 14:30 hrs. donde hay una diferencia favorable a los deflectores delgados, es decir, que a pesar de recibir más luz en la fachada, nuestros elementos horizontales gruesos no logran introducir la luz al interior, lo que nos dice que la reflexión no se produce, al menos en la forma como esperábamos, es decir, solo el primer rebote puede ser considerado, a menos

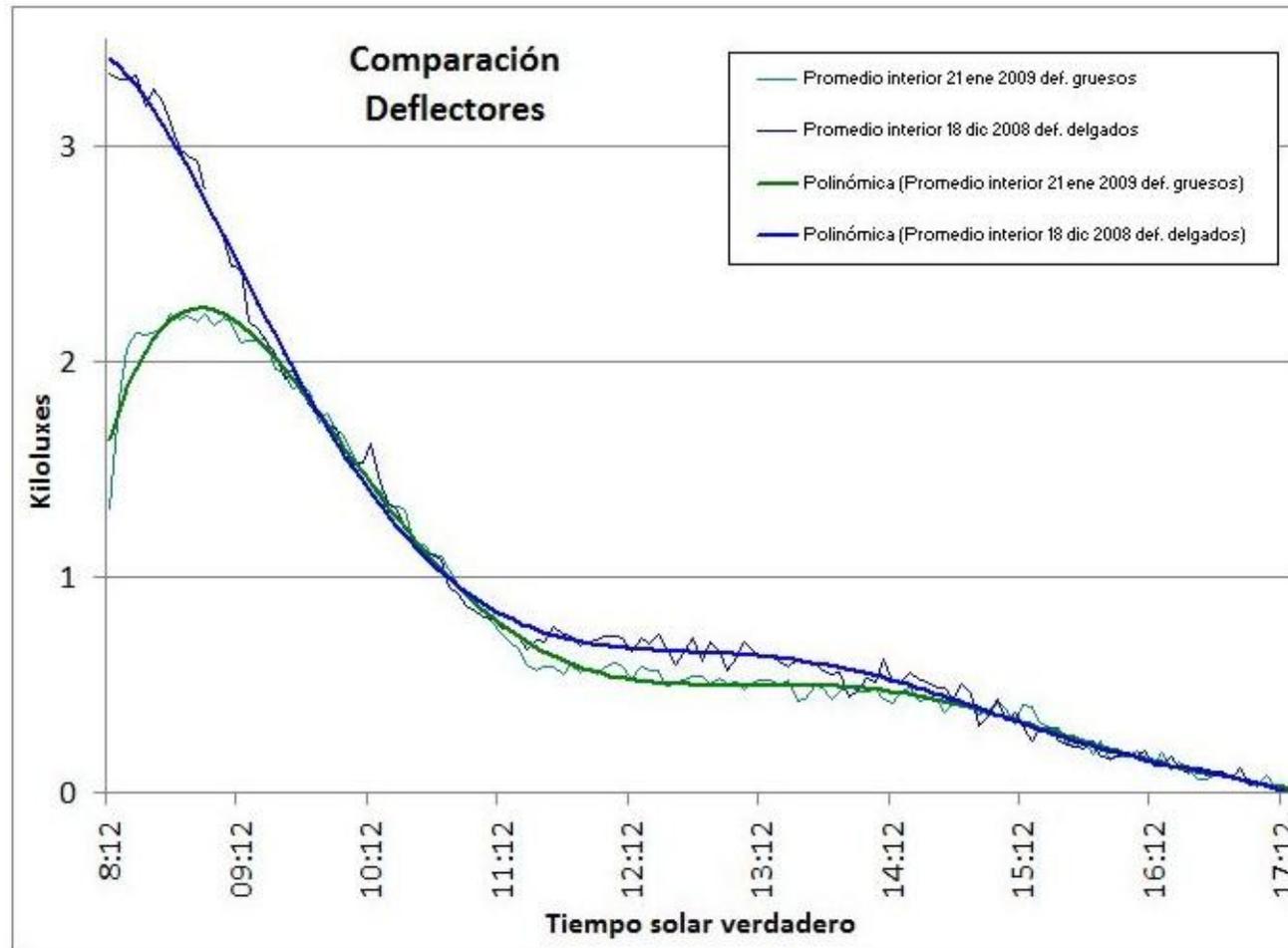


Gráfica N° 28. Comparación de los niveles de luz recibidos en la fachada de la maqueta.

que este se realice sobre espejo, en cuyo caso tendríamos que probar la eficacia del segundo, pero en lo que a nuestro ejercicio respecta, el reflejo en el deflector no produjo un aumento significativo en los niveles de luz.

No obstante, queda claro que el ángulo con el cuál se redirige el haz luminoso hacia el interior es un elemento de importancia, pero el ancho del deflector pasa a ser una variable que en nuestro caso se mantuvo constante (10 cm) y que sería preciso introducir en investigaciones futuras, pues los resultados nos llevan a la pregunta de que sucede cuando se aumenta la cantidad de deflectores y se disminuye su ancho y dado que la posición del sol es cambiante, estos elementos producirán mejores resultados

si son capaces de moverse siguiendo el camino de la gran estrella, lo que indudablemente nos lleva a un sistema computarizado, que a su vez implica un elevado costo del mismo, esto por supuesto, debe ser evaluado a la hora de diseñar el proyecto de iluminación de un edificio.



Gráfica N° 29 Comparación de deflectores horizontales

En relación con los deflectores verticales se observa un hecho que a priori puede ser evidente, pero que en las gráficas es demostrado y es que los mejores resultados se consiguen con el reflejo especular de la luz directa, esto es apreciable en todos los casos que se han analizado. En la parte de las gráficas que siguen al momento de la culminación, donde solo está presente la luz difusa existe una diferencia levemente mayor en favor del reflejo especular, que es apreciable de mejor forma si se realiza la comparación de las columnas de la matriz que van en el sentido este-oeste, es decir, la sur, central y norte, donde siempre los valores son favorables al reflejo especular, aún sin la presencia de la luz directa. Debemos mencionar que si bien este

reflejo produce mayor iluminación en las áreas que enfrentan a la ventana, en el paño que queda entre estas se produce la situación contraria, pues sus valores están por debajo de los registrados con los otros deflectores, lo que nos lleva a profundizar nuestra sospecha que estos dispositivos no son capaces de reflejar por segunda vez el rayo luminoso y contrario a nuestro interés, actúan como barrera que entorpece el paso de la luz, que se queda atrapada entre las piezas en referencia.

Una mención especial nos merece el tratamiento que se da por algunos autores a la luz difusa como un elemento de diseño, pues a lo largo de nuestra investigación hemos detectado que dicho factor para la Ciudad de México no es el principal elemento para decidir el diseño de iluminación natural de un espacio arquitectónico, especialmente si se considera que todas las habitaciones, (con raras excepciones), tienen una o a lo sumo dos orientaciones y que las gráficas muestran un comportamiento muy desigual entre lo que ocurre en el interior con los niveles de luz y la iluminación difusa exterior, incluso cuando existe una gran nubosidad que eleva el nivel luminoso general produciendo el alza en la componente refractada, esto no necesariamente incide en una reacción similar en la lectura de los aparatos ubicados en el interior, tanto de la maqueta en Ciudad Universitaria como del cuarto analizado en Isabel la Católica # 67. La disparidad entre luz difusa exterior e interior es algo que puede ser apreciado en la totalidad de las gráficas, donde nunca existe correspondencia ya sea que usemos o no algún tipo de dispositivo, pues se manifiesta cuando la ventana está libre de toda obstrucción o cuando analizamos algún elemento de control solar. Puesto que no contamos con datos confiables para otras orientaciones no tenemos seguridad para realizar aseveraciones respecto de lo que sucede en dichos casos, pero en lo que respecta a la fachada este, podemos afirmar con seguridad que la luz difusa se manifiesta de manera muy diferente a lo que sucede en el exterior, pues el comportamiento es el siguiente; en el interior, al amanecer hay un alza leve hasta el momento en que los rayos directos inciden sobre la fachada, lo que se manifiesta en una vertical que eleva la lectura al máximo y desde ahí comienza un declive con una pendiente cercana a los 45° que se prolonga hasta el momento de la culminación, en ese momento la pendiente cambia, de dos formas, si hay reflexiones como es el caso de ILC 67 vuelve a aumentar levemente para luego volver a decaer hasta el ocaso, si estas no están presentes como en IRS la gráfica muestra una disminución constante desde la culminación hasta el ocaso. La gráfica de la luz difusa exterior presenta un comportamiento en forma de curva de Gauss muy aplastada donde no hay alteraciones ni cambios de pendiente adicionales. Por este motivo, creemos que sería de gran utilidad realizar mediciones en las cuatro orientaciones que podría permitir el desarrollo de una metodología apropiada para esta ciudad.

Conclusiones

Por medio de la historia de la arquitectura podemos vislumbrar cómo los seres humanos pasamos de ser entes inmersos en los ecosistemas a asumir el control del entorno y especialmente de los espacios habitables, el trabajo de los diseñadores del hábitat se hizo más complejo y paulatinamente se alejó del medio natural, reemplazando con artefactos mecanizados lo que la naturaleza podía realizar y de esta forma surgieron las actuales urbes, que se supone deberían darnos protección, frente al medio natural agresivo, pero eso no ha sucedido, la prueba se encuentra cada día en los noticieros; violencia, corrupción, falta de valores, desempleo, carencia de vivienda para muchos. alienación, etc. La ciudad que debería cobijarnos nos impele a abandonarla, soñamos con el campo como un espacio profundamente romántico donde todos nuestros males desaparecen, pero lo único que de verdad deja de existir, es el campo.

Cuando comenzamos a caminar por el sendero de la arquitectura bioambiental todo en el horizonte se veía con grandes nubarrones que amenazaban con enormes y avasalladoras tormentas, sin embargo, en este trayecto Tlaloc y Ehecatl no han dejado de realizar su obra para que en la actualidad podamos vislumbrar el cielo más despejado y así Huitzilopochtli pueda resplandecer con todo su fulgor. Hemos comprendido que la vida en sociedad es una necesidad de la raza humana y la ciudad es en esencia el ecosistema propicio para su bienestar, pero el paso a un estadio superior implica reconocer que formamos parte de una cadena trófica en la que deberíamos ocupar el lugar de privilegio, pero con humildad, desarrollar ciudades que interactúen con el medio, devolviendo al ambiente productos susceptibles de ser procesados de manera benéfica para la naturaleza, con procesos altamente ecológicos, ¡tenemos la tecnología, existe mucho conocimiento, solo falta la voluntad!. Para ello hemos realizado este trabajo, deseábamos contribuir al conocimiento del medio natural para su aplicación en los espacios arquitectónicos y aunque la luz natural constituye una pequeña parte de los fenómenos climáticos creemos de relevancia por los importantes ahorros energéticos que puede motivar.

De los dos trabajos prácticos realizados y mediante el análisis de los datos hemos obtenido resultados que nos permiten realizar las siguientes aseveraciones:

La utilización de luz difusa para iluminar espacios arquitectónicos requiere de una gran presencia de nubes, para que el método empleado sea efectivo, pero dado que en México esto no es algo común, la forma más eficiente será entonces la distribución de la luz directa a través de las diferentes fachadas, sin embargo, será preciso controlar la componente térmica en las diferentes épocas del año, para provocar el confort sin recurrir a medios mecánicos la mayor parte del tiempo que sea posible.

El principal problema del espejo o las superficies pulidas es que pueden causar deslumbramientos que impidan o dificulten la tarea visual, por esta razón cualquier elemento que contemple este tipo de materiales para mejorar la iluminación interior, debería ubicarse a una altura superior a la de una persona de pie, aunque una forma de optimizar las posibilidades de éxito sería realizar

maquetas a una escala conveniente para estudiar el comportamiento de la luz, pero debe tenerse muy en cuenta que el prototipo debería estar construido con materiales y colores lo más cercano posible al modelo final, siendo esta la única manera de tener certeza de que las reflexiones producidas al interior de la maqueta serán idénticas a las del edificio una vez construido, lo que nos brinda la oportunidad de realizar correcciones que nos lleven a encontrar la mejor solución.

Después del vano abierto los mejores resultados se han conseguido con el vidrio transparente, por lo que el vidrio esmerilado queda rezagado con respecto a los antes mencionados, pero creemos que no fue suficientemente estudiado y pensamos que debería ser sujeto de más análisis, junto incluso a otros tipos de vidrio translúcidos que si bien sabemos, como lo hemos comprobado que reducirán el paso de la luz, pueden ser aplicados donde se requiere detener el rayo directo del sol, para producir una gran difracción, que podría tener aplicación en cubiertas de naves industriales, supermercados u otros similares, aunque en estos casos debería ser aplicado en vidrios de seguridad.

Analizar la luz interior en función de la componente difusa exterior puede conducir a errores, pues la orientación de la fachada tiene una importancia vital, ya que con el mismo nivel de este parámetro en la mañana o por la tarde se puede tener valores muy diferentes en una habitación que mira hacia el oriente, como es nuestro caso, o lo inverso sucedería con el poniente, por esta razón, que sin duda debe ser estudiada, es preciso el desarrollo de un método adecuado a la Ciudad de México, donde la iluminación directa o semidifusa debe ser contemplada como elemento clave para lograr resultados ajustados a la realidad y con posibilidades científicas de éxito. Con esto queremos remarcar nuestra diferencia con la utilización del “Método del día claro”, ya que los resultados muestran que su aplicación está muy lejos de ser útil para nuestra ciudad. donde la gran variabilidad de los cielos no ofrece una pantalla difusora de luz que pueda ser considerada como elemento de cierta permanencia, por esta razón creemos que cualquier estrategia cuya finalidad sea proporcionar luz natural a los espacios arquitectónicos, debe ir encaminada a difuminar los rayos directos del sol por medio de elementos de control en las fachadas este, sur y oeste combinándola con grandes ventanas

Dado que no es posible mantener condiciones exteriores homogéneas, por la diversidad de factores que alteran la iluminación que llega desde el sol a un espacio arquitectónico, sería conveniente usar tantas maquetas como variables se desee medir, pues esta es la única forma de tener la certeza que la situación externa de luz es igualitaria y así las comparaciones realizadas tendrían plena validez, además es muy recomendable que, al menos para las variables exteriores, que mantienen a los sensores sometidos a los agentes climáticos, se utilicen dos aparatos por cada posición que se desee medir, pues las inclemencias del tiempo provocan de manera bastante frecuente fallas en las lecturas, que hacen perder datos y como consecuencia, períodos de medición.

Los deflectores de luz merecen mayor atención para utilizarlos en el control de iluminación, pues de acuerdo con nuestra investigación, los efectos conseguidos fueron deficientes y nunca superan a la ventana en las mismas condiciones pero sin estos elementos, ya sea colocados de manera horizontal o vertical, sin embargo, no creemos que sea preciso descartarlos de antemano

pues en zonas de alta radiación solar, pueden prestar servicios invaluable, por lo que sería preciso ahondar en el estudio de estos dispositivos y especialmente en lo referente a formas, tamaños, colores y materiales reflejantes.

La investigación realizada en campo, nos permite asegurar que un dispositivo provisto de deflectores de luz podría dar una solución adecuada, pero necesitamos recalcar que debe ser móvil para un correcto funcionamiento pues como demostramos, la mayor penetración de luz difusa es lograda cuando el rayo incide directamente sobre el aditamento, sin embargo al pasar este efecto se convierte en una barrera que reduce la iluminación, razón por la que debe permitirse que en ese momento sea retirado, como sucede con las denominadas persianas venecianas, pero es necesario estudiar con detenimiento el material con el que debería estar construido este sistema para controlar la carga térmica, pues al recibir una gran insolación podría convertirse en un radiador que contribuya a aumentar la temperatura en épocas de calor, efecto que puede ser muy desagradable por estar obstruida la ventana y que puede llegar al punto de tenerse que optar entre calor o deslumbramiento, de las cuales ninguna opción es deseable, por lo que prever esta situación en la etapa de diseño es fundamental.

Otro elemento que es factible de ser manipulado para conseguir mejorar la iluminación natural al interior de los edificios, es el plafón, que de acuerdo con lo observado en nuestras investigaciones, proporciona mejores resultados si se eleva ligeramente por sobre el nivel superior de la ventana, aunque como apuntamos anteriormente, se requiere de mayor investigación para determinar la altura óptima. El color del plafón también será de relevancia pues aquellos claros reflejarán en mayor medida la luz con lo que es posible lograr la máxima penetración de ésta, lo que nos lleva a plantear lo necesario de un correcto y oportuno mantenimiento, pues, como es sabido los plafones pierden en poco tiempo su color oscureciéndose con la consiguiente pérdida de luminosidad al interior de las edificaciones.

Desde fines de marzo, el fotómetro de la puerta A recibe mas luz que el de la puerta B, sin embargo al acercarse abril la diferencia es cada vez menor, hasta llegar a confundirse los primeros días de este mes y a partir del 4 de abril, cambia la condición y se invierte el nivel de iluminación, siendo ahora el fotómetro B el que capta mas luz. Lo que nos lleva a concluir que existe una ligera desviación en el paralelismo de los dos fotómetros, que a simple vista no es apreciable, pero dado que son aparatos muy sensibles, se produce un pequeño error en las mediciones, que para nuestros efectos puede ser despreciado, no obstante nos indica la necesidad de tener mayor prolijidad a la hora de instalar los instrumentos, e incluso en el transcurso de la medición.

Las fachadas como elemento de iluminación tendrían que estar reglamentadas con relación a mecanismos de planificación urbana, sin embargo, aunque en un principio sostuvimos la idea que constituían importantes fuentes de reflexión de la luz, los datos nos demostraron que no era así, pues al igual que los deflectores actúan como pantallas reflejantes de relevancia solo en presencia del rayo solar directo y su influencia alcanza un reducido espacio, por lo cual, más importante que regular mediante la legislación este aspecto, sería consagrar el derecho al sol, es decir, que los planes urbanos no permitan cubrir con sombra

construcciones existentes, por parte de nuevas obras, o al menos establecer una cantidad mínima de asoleamiento para aquellas fachadas expuestas.

Las ventanas deben ser reconocidas como elementos con funciones diferentes, pues normalmente se asocia a este elemento con el ingreso de luz, pero el calor, las vistas y la ventilación también son particularidades que pueden incidir de manera especial haciendo especializada la función de los vanos que pueden realizar una o varias de estas, considerarlo así debe ser una característica propia de la teoría de la arquitectura actual.

Finalmente creemos de relevancia señalar que esta investigación ha sido realizada gracias a la posibilidad de haber contado con los instrumentos con los que se llevó a cabo, que fueron adquiridos por el Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM, a través del proyecto denominado “Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado”, (PAEP), pero sobre todo por los aportes y entusiasmo que alumnos y maestros hemos puesto para conseguir nuestros objetivos particulares de alcanzar el conocimiento. Sin embargo, la tarea es enorme y los recursos con los que hemos contado han sido insuficientes, mucho del instrumental o los elementos utilizados para experimentar han sido confeccionados por los propios investigadores, quienes hemos debido realizar desde trabajos absolutamente rudimentarios a aquellos de análisis propiamente adecuados a nuestra función, que si bien en el caso de los primeros, no tenemos sentimientos de molestia o malestar, creemos que han retrasado nuestro trabajo, que debería ser más enfocado a la producción intelectual y el diseño por sobre la confección de elementos. Esto nos lleva a plantear la necesidad urgente de contar con un laboratorio de arquitectura bioambiental, con espacios, equipos, instrumentos y personal técnico que pueda apoyar las investigaciones, pues como hemos mostrado en el presente trabajo, cada aspecto de la actividad constructiva que sea estudiado y genere reducciones energéticas que puedan ser aplicadas en el ámbito profesional, se traducirá en una mejor calidad de vida para la ciudad en general, así como la reducción de costos energéticos y ambientales.

En muchas ocasiones, la investigación es vista con desconfianza por quienes tienen la posibilidad de decidir los destinos de las instituciones, principalmente por que los frutos son inciertos e indudablemente no se verán mas que en el mediano y largo plazo, pero es un hecho que aquellos organismos e incluso estados donde se ha optado por el desarrollo de la ciencia, sus miembros han mejorado su calidad de vida e ingreso, por lo que no solo es meritorio, sino es altamente necesario exigir mayores presupuestos para contar con cada vez mas investigadores que sean capaces de desarrollar tecnologías con un sentido nacional y una visión realmente patriótica, que tiene que ver con el valor agregado que obtienen las cosas en un mundo donde el consumo es el motor de la economía.

Anexos

Tabla 1 Declinación calculada por Henry Cabroler S. de acuerdo a Spencer(1971) para año biciesto

Día	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1	-23.06	-17.34	-7.50	4.63	15.13	22.09	23.11	17.97	8.21	-3.25	-14.51	-21.85
2	-22.98	-17.05	-7.12	5.01	15.43	22.22	23.04	17.72	7.85	-3.64	-14.83	-22.00
3	-22.89	-16.76	-6.73	5.40	15.73	22.34	22.96	17.46	7.48	-4.03	-15.14	-22.14
4	-22.80	-16.47	-6.35	5.78	16.02	22.46	22.88	17.19	7.11	-4.42	-15.46	-22.27
5	-22.70	-16.17	-5.96	6.16	16.31	22.58	22.78	16.92	6.74	-4.80	-15.76	-22.40
6	-22.59	-15.87	-5.57	6.53	16.59	22.68	22.69	16.65	6.37	-5.19	-16.06	-22.52
7	-22.47	-15.56	-5.19	6.91	16.87	22.78	22.58	16.37	6.00	-5.57	-16.36	-22.64
8	-22.35	-15.25	-4.79	7.28	17.14	22.87	22.47	16.09	5.62	-5.95	-16.65	-22.74
9	-22.21	-14.93	-4.40	7.66	17.41	22.96	22.35	15.80	5.25	-6.33	-16.94	-22.84
10	-22.07	-14.61	-4.01	8.03	17.67	23.04	22.23	15.51	4.87	-6.71	-17.22	-22.93
11	-21.93	-14.29	-3.62	8.39	17.93	23.11	22.09	15.21	4.49	-7.09	-17.50	-23.01
12	-21.77	-13.96	-3.23	8.76	18.18	23.18	21.96	14.91	4.11	-7.47	-17.77	-23.09
13	-21.61	-13.63	-2.83	9.12	18.43	23.23	21.81	14.61	3.73	-7.84	-18.04	-23.16
14	-21.45	-13.29	-2.44	9.48	18.67	23.29	21.66	14.30	3.34	-8.22	-18.30	-23.22
15	-21.27	-12.95	-2.04	9.84	18.91	23.33	21.51	13.99	2.96	-8.59	-18.56	-23.27
16	-21.09	-12.61	-1.65	10.19	19.14	23.37	21.35	13.67	2.57	-8.96	-18.81	-23.32
17	-20.90	-12.26	-1.25	10.55	19.37	23.40	21.18	13.36	2.19	-9.33	-19.06	-23.35
18	-20.71	-11.91	-0.86	10.89	19.59	23.42	21.00	13.03	1.80	-9.69	-19.30	-23.38
19	-20.51	-11.56	-0.46	11.24	19.81	23.44	20.82	12.71	1.41	-10.06	-19.53	-23.41
20	-20.30	-11.20	-0.07	11.58	20.02	23.45	20.64	12.38	1.03	-10.42	-19.76	-23.42
21	-20.09	-10.84	0.33	11.92	20.23	23.46	20.44	12.05	0.64	-10.77	-19.98	-23.43
22	-19.87	-10.48	0.72	12.26	20.43	23.45	20.25	11.71	0.25	-11.13	-20.20	-23.42
23	-19.64	-10.12	1.12	12.60	20.62	23.44	20.04	11.38	-0.14	-11.48	-20.41	-23.41
24	-19.41	-9.75	1.51	12.93	20.81	23.42	19.84	11.03	-0.53	-11.83	-20.61	-23.40
25	-19.17	-9.38	1.90	13.25	20.99	23.40	19.62	10.69	-0.92	-12.18	-20.81	-23.37
26	-18.92	-9.01	2.30	13.57	21.16	23.37	19.40	10.34	-1.31	-12.52	-21.00	-23.34
27	-18.67	-8.63	2.69	13.89	21.33	23.33	19.18	9.99	-1.70	-12.86	-21.18	-23.30
28	-18.42	-8.26	3.08	14.21	21.50	23.29	18.95	9.64	-2.09	-13.20	-21.36	-23.25
29	-18.15	-7.88	3.47	14.52	21.65	23.24	18.71	9.29	-2.48	-13.53	-21.53	-23.19
30	-17.89		3.86	14.83	21.80	23.18	18.47	8.93	-2.87	-13.86	-21.69	-23.13
31	-17.61		4.24		21.95		18.22	8.57		-14.19		-23.06

Tabla 2 Declinación Henry Cabrolier S. de acuerdo a Spencer(1971) para año normal

dia \ mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1	-23.06	-17.34	-7.88	4.24	14.83	21.95	23.18	18.22	8.57	-2.87	-14.19	-21.69
2	-22.98	-17.05	-7.5	4.63	15.13	22.09	23.11	17.97	8.21	-3.25	-14.51	-21.85
3	-22.89	-16.76	-7.12	5.01	15.43	22.22	23.04	17.72	7.85	-3.64	-14.83	-22
4	-22.8	-16.47	-6.73	5.4	15.73	22.34	22.96	17.46	7.48	-4.03	-15.14	-22.14
5	-22.7	-16.17	-6.35	5.78	16.02	22.46	22.88	17.19	7.11	-4.42	-15.46	-22.27
6	-22.59	-15.87	-5.96	6.16	16.31	22.58	22.78	16.92	6.74	-4.8	-15.76	-22.4
7	-22.47	-15.56	-5.57	6.53	16.59	22.68	22.69	16.65	6.37	-5.19	-16.06	-22.52
8	-22.35	-15.25	-5.19	6.91	16.87	22.78	22.58	16.37	6	-5.57	-16.36	-22.64
9	-22.21	-14.93	-4.79	7.28	17.14	22.87	22.47	16.09	5.62	-5.95	-16.65	-22.74
10	-22.07	-14.61	-4.4	7.66	17.41	22.96	22.35	15.8	5.25	-6.33	-16.94	-22.84
11	-21.93	-14.29	-4.01	8.03	17.67	23.04	22.23	15.51	4.87	-6.71	-17.22	-22.93
12	-21.77	-13.96	-3.62	8.39	17.93	23.11	22.09	15.21	4.49	-7.09	-17.5	-23.01
13	-21.61	-13.63	-3.23	8.76	18.18	23.18	21.96	14.91	4.11	-7.47	-17.77	-23.09
14	-21.45	-13.29	-2.83	9.12	18.43	23.23	21.81	14.61	3.73	-7.84	-18.04	-23.16
15	-21.27	-12.95	-2.44	9.48	18.67	23.29	21.66	14.3	3.34	-8.22	-18.3	-23.22
16	-21.09	-12.61	-2.04	9.84	18.91	23.33	21.51	13.99	2.96	-8.59	-18.56	-23.27
17	-20.9	-12.26	-1.65	10.19	19.14	23.37	21.35	13.67	2.57	-8.96	-18.81	-23.32
18	-20.71	-11.91	-1.25	10.55	19.37	23.4	21.18	13.36	2.19	-9.33	-19.06	-23.35
19	-20.51	-11.56	-0.86	10.89	19.59	23.42	21	13.03	1.8	-9.69	-19.3	-23.38
20	-20.3	-11.2	-0.46	11.24	19.81	23.44	20.82	12.71	1.41	-10.06	-19.53	-23.41
21	-20.09	-10.84	-0.07	11.58	20.02	23.45	20.64	12.38	1.03	-10.42	-19.76	-23.42
22	-19.87	-10.48	0.33	11.92	20.23	23.46	20.44	12.05	0.64	-10.77	-19.98	-23.43
23	-19.64	-10.12	0.72	12.26	20.43	23.45	20.25	11.71	0.25	-11.13	-20.2	-23.42
24	-19.41	-9.75	1.12	12.6	20.62	23.44	20.04	11.38	-0.14	-11.48	-20.41	-23.41
25	-19.17	-9.38	1.51	12.93	20.81	23.42	19.84	11.03	-0.53	-11.83	-20.61	-23.4
26	-18.92	-9.01	1.9	13.25	20.99	23.4	19.62	10.69	-0.92	-12.18	-20.81	-23.37
27	-18.67	-8.63	2.3	13.57	21.16	23.37	19.4	10.34	-1.31	-12.52	-21	-23.34
28	-18.42	-8.26	2.69	13.89	21.33	23.33	19.18	9.99	-1.7	-12.86	-21.18	-23.3
29	-18.15		3.08	14.21	21.5	23.29	18.95	9.64	-2.09	-13.2	-21.36	-23.25
30	-17.89		3.47	14.52	21.65	23.24	18.71	9.29	-2.48	-13.53	-21.53	-23.19
31	-17.61		3.86		21.8		18.47	8.93		-13.86		-23.13

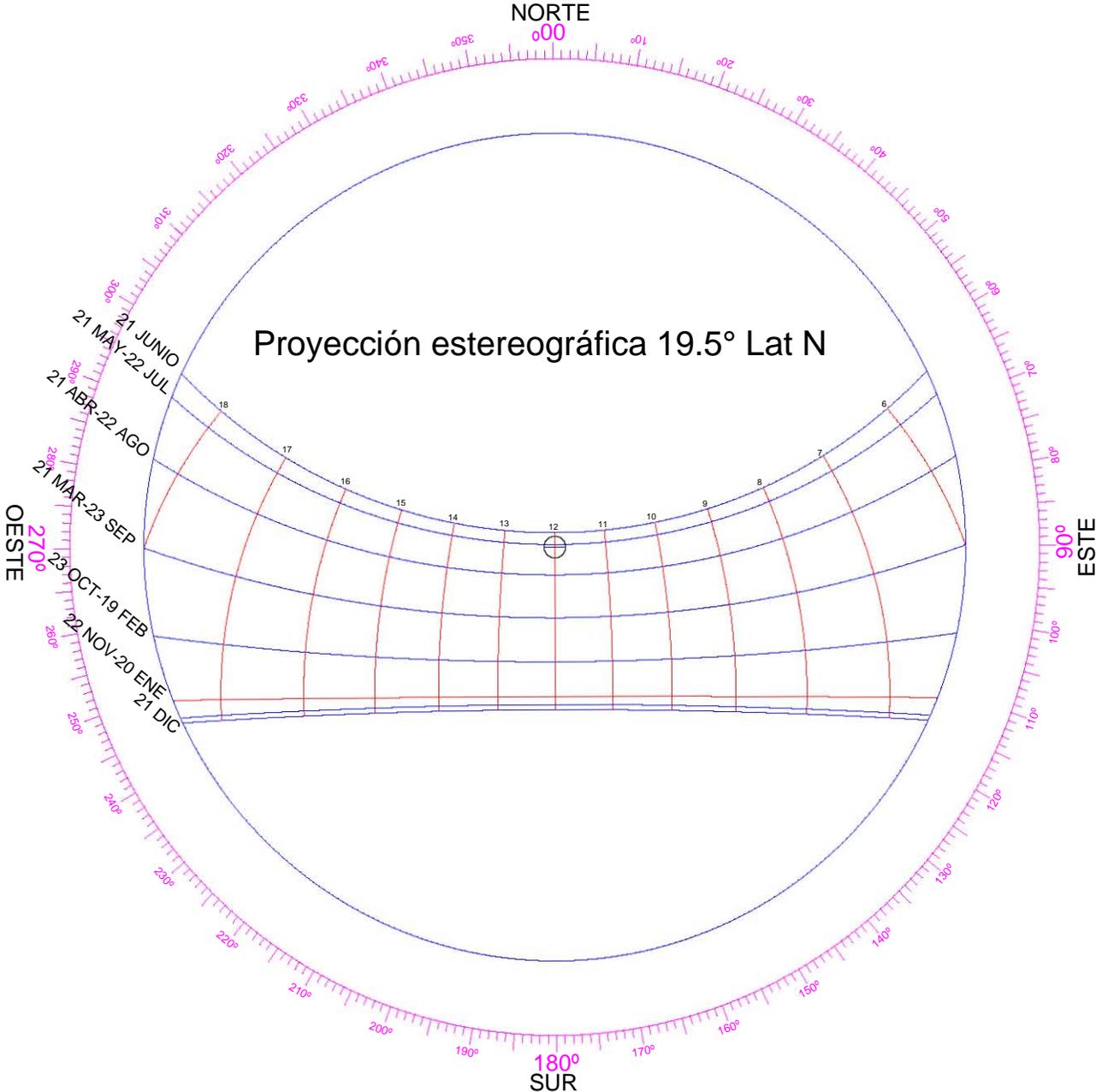
Tabla 3 Calculo de radios para el trazo de la estereográfica latitud 19.5°

radio lat cos lat sin lat tan lat
 10 19.50 0.340 0.943 0.334 0.354

mes	dec	radianes	cos dec	sin dec	r*cos dec	r*cos lat	lat+dec	rs	ds	rs-ds
22 JUNIO	23.46	0.409	0.917	0.398	9.173	9.426	0.732	12.533	12.879	-0.346
22 MAY / 23 JUL	20.20	0.353	0.938	0.345	9.385	9.426	0.679	13.820	13.881	-0.061
22 ABR / 23 AGO	11.80	0.206	0.979	0.204	9.789	9.426	0.538	18.184	17.511	0.673
21 MAR / 23 SEP	0.10	0.002	1.000	0.002	10.000	9.426	0.336	29.802	28.092	1.709
23 OCT / 20 FEB	-11.50	-0.201	0.980	-0.199	9.799	9.426	0.134	72.890	70.117	2.773
23 NOV / 20 ENE	-20.25	-0.353	0.938	-0.346	9.382	9.426	-0.012	-762.125	-765.740	3.615
21 DIC	-23.43	-0.409	0.918	-0.398	9.175	9.426	-0.064	-143.768	-147.700	3.932

horas	grados	radianes	sin(h)	tan(h)	sen(h)*cos lat	tan(h)*cos lat	rh	dh	dt
1	15	0.262	0.259	0.268	0.244	0.253	40.988	39.591	3.541
2	30	0.524	0.500	0.577	0.471	0.544	21.217	18.374	
3	45	0.785	0.707	1.000	0.667	0.943	15.003	10.608	
4	60	1.047	0.866	1.732	0.816	1.633	12.250	6.125	
5	75	1.309	0.966	3.732	0.911	3.518	10.983	2.843	
6	90	1.571	1.000	16324552277619100	0.943	15388200300387100	10.608	0.000	

Tabla 4 Proyección estereográfica



Glosario

- ⚙ *Acomodación; Acción y efecto de acomodarse el ojo para que la visión no se perturbe cuando varía la distancia o la luz del objeto que se mira.*
- ⚙ *Altitud; (Geogr.) Distancia vertical de un punto de la tierra respecto al nivel del mar.*
- ⚙ *Azimut; acimut (Astr.) Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.*
- ⚙ *Bóveda celeste;(firmamento) esfera aparente que rodea la tierra.*
- ⚙ *Candela; unidad fotométrica internacional, basada en la radiación de un cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino. Dicha radiación, por centímetro cuadrado, equivale a 60 candelas.*
- ⚙ *Cielo o día claro; Para la Oficina del Clima de los Estados Unidos es aquel cielo que tiene menos de 30% de nubes y para el comité Internacional de la Iluminación es una referencia a condiciones de día nublado teniendo la mayor luminancia alrededor del sol y la mínima a 90° de este, que se especifica en la formula adoptada por el CIE, propuesta por Richard Kittler en 1965.*
- ⚙ *Cielo o día nublado; estado del cielo con un porcentaje superior a 70% cubierto por nubes.*
- ⚙ *Confort;(definición de Victor Olgyay); zona en la cual no se produce un sentimiento de incomodidad.*
- ⚙ *Deslumbramiento; turbación de la vista por luz excesiva o repentina.*
- ⚙ *Estereorradián; unidad de ángulo sólido del Sistema Internacional, equivalente al que, con su vértice en el centro de una esfera, determina sobre la superficie de esta un área equivalente a la de un cuadrado cuyo lado es igual al radio de la esfera. (Símb. sr).*
- ⚙ *Factor de luz diurna; proporción de iluminancia interior respecto de la exterior en condiciones de cielo claro o nublado, expresada en porcentaje y referida a un punto en un plano horizontal.*

- ⚙ *Fenestra; ventana*
- ⚙ *Iluminación natural; en primera instancia es aquella en que la fuente de luz es el sol, pero empleada como método en la arquitectura implica estudios y elementos para proporcionar las mejores condiciones lumínicas sin afectar otros parámetros como el calor, las vistas o la ventilación.*
- ⚙ *Iluminancia; magnitud que expresa el flujo luminoso que incide sobre la unidad de superficie. Su unidad en el Sistema Internacional de medidas es el lux.*
- ⚙ *Lumen; unidad de flujo luminoso del Sistema Internacional, que equivale al flujo luminoso emitido por una fuente puntual uniforme situada en el vértice de un ángulo sólido de un estereorradián y cuya intensidad es una candela. (Símb. lm).*
- ⚙ *Luz directa; es la que llega a un punto determinado en línea recta desde la fuente luminosa.*
- ⚙ *Luz difusa; es toda aquella que llega a un punto determinado reflejada por diferentes elementos, en la que los rayos directos desde la fuente son obstaculizados para que no incidan en el punto referido.*
- ⚙ *Luz global; es aquella en que son consideradas tanto la luz difusa como la directa.*
- ⚙ *Plano de trabajo; se considera que la mayoría de las personas por su antropometría, realizan sus actividades laborales en un plano ubicado a 75 cm del piso, por lo que esta altura es considerada para los estudios de iluminación como estándar.*
- ⚙ *Refractar; hacer que cambie de dirección un rayo de luz u otra radiación electromagnética al pasar oblicuamente de un medio a otro de diferente velocidad de propagación.*
- ⚙ *Tarea visual; actividad que debe realizar el aparato visual humano, para una correcta traducción en el cerebro, de las imágenes capturadas por la retina, sin un esfuerzo adicional.*
- ⚙ *Zenit; cenit, (Astr.) Intersección de la vertical de un lugar con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador.*

Créditos de imágenes, cuadros y gráficas según números correlativos

Imágenes

Capítulo I

- 1 <http://www.fortunecity.es/>
- 2 <http://www.monografias.com/trabajos62/machu-picchu/machu-picchu2.shtml>
- 3 <http://sobreinglaterra.com/wp-content/uploads/2008/08/stonehenge-2.jpg>
- 4 Egipto, el mundo de los faraones, editado por Regine Schlulz y Matias Seidel, Ed. Könemann, Colonia, 1997, p. 82
- 5 <http://www.a-granada.com/es/abadia-hotel>
- 6 <http://www.granada.org/graficos/pmc/num04/011.jpg>
- 7 http://farm4.static.flickr.com/3411/3512764740_5571ed3d74_o.gif
- 8 <http://www.modelismoymaquetas.org/>
- 9 <http://www.xtec.es/~jcalvo14/index.htm>
- 10 Arquitectura griega y romana, D. S. Robertson, Ed. Cátedra, Madrid, 1979. p. 40
- 11 <http://www.xtec.es/~jcalvo14/casa.htm>
- 12 El románico, arquitectura, escultura, pintura, Rolf Toman, Ed. Köneman, Barcelona, 2004, p. 21.
- 13 Vitrales Catedral de Colonia, Xavier Barral i Altet, Las vidrieras medievales en Europa, Ed. Lumweg, p.105
- 14 <http://www.artehistoria.jcyl.es/ciudades/monumentos/1155.htm>
- 15 http://farm1.static.flickr.com/76/154833775_537d4d10b6_o.jpg
- 16 <http://www.amazingsights.net/wright-guggenheim.jpg>

Capítulo II

- 17 Imagen del autor
- 18 Architect's Handbook of Formulas, Tables, and Mathematical Calculations, Ballast, David, p. 169.
- 19 Imagen del autor
- 20 <http://campusvirtual.unex.es/>
- 21 Imagen del autor

22 Imagen del autor
23 <http://saludmiguelsschweiz.blogspot.com/2008/01/sentidos.html>
24 <http://www.promolux.com/espanol/images/spectrum.jpg>
25 Lighting and applied vision section, M. J. Perry, Lighting Research and Technology, Vol. 22, No. 3, 159-160 (1990)
26 Imagen del autor
27 Imagen del autor
28 a 30 Boletín Oficial del Estado, Gobierno de España, Documento básico HE 3, ahorro de energía, BOE 23/10/2007
31 Código de Edificación de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires
32 Imagen del autor
33 Imagen del autor
34 http://www.alhambraevasion.com/Imagens/imagenes/gr,las-mil-y-una---celosia-emb_0001.gif
35 <http://www.nysan.com/>
36 <http://www.tourre-architecte.com/>
37 Imagen del autor
38 Nysan Skylite shading
39 Imagen del autor
40 <http://www.torreagbar.com/>
41 United States Patent, Eijadi & Bennett, Passive solar lighting system.
42 <http://www.solostocks.com/>
43 <http://www.paginasprodigy.com.mx/sdgodinez/>
44 <http://www.izquierdolehmann.cl/>
45 <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4289/2/carlosalatorre.pdf>
46 <http://www.serraglass.es/>
47 <http://www.solartran.com.au/LGS.htm>
48 Trapholt art museum advanced roof lights, Danish Building Research Institute, Denmark
49 Demonstration of a Light-Redirecting Skylight System at the Palm Springs Chamber of Commerce
50 International Centre for Desert Architecture office building
51 <http://www.solartran.com.au/lasercutpanel.htm>

Capítulo III

- 52 a 58 Imágenes del autor
- 59 <http://www.recursos-pc.com.ar/husos.htm>
- 60 <http://cienciasuanzes.com/>
- 61 <http://cienciasuanzes.com/>
- 62 Imagen del autor
- 63 Imagen del autor
- 64 <http://www.flickr.com/photos/aldocastellanos/2845964308/>
- 65 <http://www.bogotadc.es/>
- 66 a 71 Imágenes del autor

Capítulo IV

- 72 Tomada de Google earth, modificada por el autor
- 73 a 87 imágenes del autor
- 88 Tomada por la cámara de video al interior del salón

Capítulo V

- 89 Imagen del autor
- 90 Tomada de Google earth, modificada por el autor
- 91 a 96 imágenes del autor

Cuadros

Capítulo II

- 1 Recopilación y diseño del autor
- 2 Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de octubre de 2004, p. 265.
- 3 Norma Oficial Mexicana nom-025-stps-1999, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. - 23/12/1999.
- 4 Comité Europeo Normalizador (CENTC 169)

- 5 Ley General de Urbanismo y Construcciones, artículo 105, República de Chile.
- 6 Código de Edificación de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- 7 Código de Edificación de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Capítulo III

- 8 y 9 Desarrollados por el autor

Capítulo V

- 10 Desarrollado por el autor

Gráficas

Capítulo II

- 1 Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, U.T.N. – Argentina. Manual de Iluminación Eficiente, cap. II Luz, color y visión, p. 4.
- 2 Szokolay, S. V. Environmental Science handbook for architects and builders, The construction press ltd. USA, 1980.

Capítulo III

- 3 Ecuación del tiempo, desarrollada por el autor
- 4 a 7 desarrolladas por el autor

Capítulo IV

- 8 a 31 desarrolladas por el autor

Capítulo V

- 32 a 203 desarrolladas por el autor