



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

LUZ NATURAL EN LA ARQUITECTURA
APORTACIONES CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS Y DE DISEÑO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTORA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
CECILIA GENOVEVA GUADARRAMA GÁNDARA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. MAURO VALDÉS BARRÓN, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO, INSTITUTO DE GEOFÍSICA
DR. DAVID RIVEROS ROSAS, INSTITUTO DE GEOFÍSICA
DRA. AZUCENA ESCOBEDO IZQUIERDO, POSGRADO EN INGENIERÍA
MTRO. EN. ARQ. LEONARDO ZEEVAERT ALCÁNTARA, POSGRADO EN ARQUITECTURA



CIUDAD UNIVERISTARIA, CD. MX., 2017



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.

JURADO

J

Director de tesis: Dr. Mauro Germán Valdés Barrón

Miembros del comité tutor: Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo

Dr. David Riveros Rosas

Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo

Mtro. en arq. Leonardo Bernardo Zeevaert Alcántara

AGRADECIMIENTOS

A

Agradezco a mi *alma mater*, la UNAM, a la Facultad de Arquitectura, al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, al Laboratorio de Interacción con el Medio, al Observatorio de Radiación Solar, ORS, del Instituto de Geofísica, al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado, PAEP, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la oportunidad y el apoyo otorgado para realizar esta investigación.

Agradezco al Dr. Roberto Bonifaz, al Dr. David Riveros, a la Dra. Azucena Escobedo y al Mtro. en arq. Leonardo Zeevaert por todo su apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Agradezco al Mtro. en arq. Leonardo Zeevaert por introducirme al tema de la luz natural en la arquitectura.

Agradezco a mi tutor, el Dr. Mauro Valdés, por ser mi guía durante este trabajo doctoral.

Gracias a los Bronfman, a los Lencer, a mis amigas y a cada una de las personas que me apoyaron durante estos años.

Gracias a mis abuelas y a mi abuelo por ser ejemplos de fortaleza.

DEDICATORIA



Para:

Daniel

Ana

Cecilia

Guillermo

Carlos Andrés

y Diana

Los amo con todo mi corazón, son la luz en mi camino.

EN HONOR



A Graciela Guadarrama Sixtos,
quien partió a un paso de obtener el grado de doctora.

CONTENIDO

C

PORTADA, JURADO, AGRADECIMIENTOS Y CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 15

1 SITUACIÓN ACTUAL 23

1.1 Importancia y antecedentes de la investigación

1.1.1 La importancia de la luz natural con énfasis en la arquitectura y el ser humano

1.1.2 La importancia de conocer el recurso lumínico disponible

1.1.3 ¿Por qué es importante realizar mediciones de luz natural *in situ*?

1.1.4 Temas de investigación ligados a las mediciones de luz natural

1.2 Problemática

1.2.1 La falta de mediciones de luz natural en la Cuenca de México

1.2.2 Las condiciones particulares de la Cuenca de México

1.2.3 Estimar valores de iluminancia a partir de mediciones de irradiancia

1.2.4 La normativa respecto al uso de la luz natural en la arquitectura del sitio

2 MARCO TEÓRICO 35

2.1 Radiación solar y el espectro solar fuera de la atmósfera

2.2 Factores astronómicos, geométricos, geográficos y físicos que explican la distribución temporal y espacial de la radiación solar en la superficie de la Tierra

2.3 Procesos de extinción de la radiación solar en la atmósfera terrestre: dispersión, absorción y reflexión

2.4 Factores y elementos climáticos que influyen en la radiación solar incidente en superficie: humedad, nubosidad, presión atmosférica y viento

2.5 Flujos de radiación: directa, difusa y global

2.6 Radiometría, fotometría y sistemas de medición

3 METODOLOGÍA 69

3.1 Descripción del sitio

3.1.1 La Cuenca de México: ubicación, orografía, división política, descripción del clima y contaminación atmosférica

3.1.2 Ciudad Universitaria: ubicación y extensión; características del microclima: climograma y tipo de microclima

3.2 “Plataforma de observación de luz natural”

3.2.1 “Plataforma de observación de luz natural”: descripción, estructuración, ubicación, descripción del terreno circundante (5 km a la redonda) y obstrucciones del horizonte inmediato

3.2.2 Parámetros de medición y su instrumentación

3.2.3 Diseño y fabricación de bases para los sensores de medición

3.2.4 Disposición de los instrumentos en la plataforma

3.2.5 Adquisición, recopilación y almacenamiento de datos

3.2.6 Preparación de los datos

4	VALIDACIÓN, RESULTADOS Y PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN	103
4.1	Validación de la información	
4.1.1	Descripción de las pruebas y su validez	
4.1.2	Implementación y resultados de las pruebas de validación	
4.2	Presentación de la información	
4.2.1	Irradiancia e iluminancia media horaria —global, difusa y directa normal— y en cuatro planos verticales —Este, Sur, Oeste y Norte—	
4.2.2	Relación entre la irradiancia y la iluminancia global	
5	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	167
5.1	Variabilidad de la temperatura ambiente y la precipitación total mensual de 2014 con la climatología del sitio y observaciones de la nubosidad del cielo	
5.2	Análisis de las trayectorias solares del sitio	
5.3	Comportamiento de la irradiancia e iluminancia global, directa, difusa y vertical al Este, Sur, Oeste y Norte con información medida de un ciclo climatológico	
5.3.1	Irradiancia e iluminancia global, directa y difusa	
5.3.2	Irradiancia e iluminancia vertical al Este, Sur Oeste y Norte	
5.4	Relación entre la irradiancia e iluminancia y determinación de la eficacia luminosa media mensual global y difusa	
5.4.1	Análisis de los diagramas de dispersión, la regresión mínimo cuadrática y el cuadrado de la correlación de la irradiancia e iluminancia global	
5.4.2	Eficacia luminosa media horaria mensual, promedios, máximos y mínimos	
5.5	Evaluación del recurso lumínico difuso de la Cuenca de México	
5.5.1	Iluminancia difusa vertical, simulada a partir de mediciones de la iluminancia vertical global y directa normal	

5.5.2 Iluminancia difusa horizontal medida

5.6 Aprovechamiento del recurso lumínico difuso en los interiores arquitectónicos

5.6.1 Determinación del “Factor de luz de día”, FLD , para diversos niveles de iluminancia interior, a partir del recurso lumínico difuso disponible en la Cuenca de México

5.6.2 Dimensionamiento de ventanas en la Cuenca de México, según su orientación y la iluminancia interior requerida

5.6.3 “Matriz de diseño con luz natural” para espacios con aberturas laterales en la Cuenca de México

5.6.4 Aplicación y verificación de la “Matriz de diseño con luz natural”

6 CONCLUSIONES 225

7 RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS 239

ANEXO 245

A1 Desarrollo tecnológico de bases para la medición de parámetros radiométricos y fotométricos

INTRODUCCIÓN



“... es indispensable que la Ciudad de México, como capital del país, comience a tener un registro de iluminación natural ininterrumpido por un largo periodo de tiempo. Esto puede ser posible a través de un observatorio el cual cuente con equipo de medición especializado para realizar mediciones constantes de diferentes parámetros fundamentales en el análisis de la luz natural para nuestra ciudad.”¹

Con este párrafo termina mi tesis de maestría, defendida en 2011. En esta realicé un trabajo experimental con mediciones de luz natural en un inmueble del siglo XIX, en el Centro Histórico de la Ciudad de México. Estas mediciones fueron comparadas con mediciones en un modelo a escala y con resultados fotométricos de un programa de cálculo lumínico. El director de la tesis fue el maestro Leonardo Zeevaert y el jurado estaba compuesto por el maestro Francisco Reyna, el doctor Diego Morales, el doctor Hermilo Salas y el doctor Mauro Valdés. Las conclusiones de este trabajo dejaban claro que, para un análisis completo de la disponibilidad del recurso lumínico natural y su aprovechamiento en la arquitectura, era necesario contar con un registro continuo y por un periodo largo de tiempo de este recurso y de parámetros relacionados con él.

De tal forma que, a partir de ese momento, me di a la tarea de promover la estructuración de una plataforma de medición con equipo especializado. Esta iniciativa comenzó en

1 Cecilia Guadarrama Gándara, “Luz natural: Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011), 218.

① introducción

la década de los ochenta y fue propuesta por el maestro Leonardo Zeevaert del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura y por el doctor Agustín Muhlia del “Observatorio de radiación solar”. Fue en 2005, al comenzar mis estudios de maestría, que me sumé al proyecto de medir la luz natural disponible de la Cuenca de México. En ese entonces, a través de fotómetros fabricados por nosotros mismos con diodos y resistencias se midió la iluminancia en el exterior y en el interior de diferentes ambientes. En 2006, gracias al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado, PAEP, a través del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, del maestro Leonardo Zeevaert, del maestro Francisco Reyna —entonces coordinador del campo de tecnología—, del maestro Arturo Valeriano, de la maestra Miriam García y de otros alumnos interesados en este tema, obtuvimos fotómetros especializados para realizar mediciones más certeras. Fue con este equipo que se realizaron las mediciones del trabajo experimental de mi tesis de maestría y mediciones que sustentan otras tesis y otros trabajos académicos. Conforme pasaron los años, fuimos adquiriendo más equipo especializado con el cual era factible planear una plataforma de observación. De tal forma que, para el 2012 —momento en el cual comienza esta investigación— y gracias al convenio de colaboración entre el Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura y el “Observatorio de radiación solar”, ORS, a cargo del doctor Mauro Valdés, fue posible estructurar, en conjunto, la “Plataforma de observación de luz natural”, ubicada en el nuevo módulo del ORS en el edificio del Instituto de Geofísica de esta universidad. El Posgrado de Arquitectura firmó un convenio con el ORS, ya que el observatorio cuenta con amplia experiencia en medir parámetros relacionados con la radiación solar y con técnicos especializados y encargados de todo el proceso de medición.

EL ORS ha medido la radiación solar y otros parámetros atmosféricos desde hace décadas. Su amplia experiencia les permite dominar la compleja instalación y los diferentes procesos de adquisición, recopilación y almacenamiento de datos para la evaluación de este recurso natural. Cuando se implementa en un observatorio o plataforma de observación un nuevo parámetro de medición —como en este caso, la iluminancia—, conlleva un proceso largo y detallado, en el cual es necesario comprender a profundidad el funcionamiento de los sensores,

su mantenimiento y la programación para la adquisición de los datos de medición, así como el comportamiento del parámetro en sí.

Después de seleccionar y adquirir el equipo especializado, así como conocer sus características y funcionamiento se llevó a cabo la cuidadosa instalación. Para la instalación de los sensores fue necesario diseñar y fabricar bases para la medición de diferentes parámetros y, ya instaladas, corroborar el buen funcionamiento y resistencia a la intemperie. El diseño, la fabricación y la comprobación del correcto funcionamiento de estas bases es un aporte más de este trabajo de investigación y puede convertirse en una patente. Posteriormente fueron conectados todos los instrumentos de medición a dos adquirentes de datos. Se programó la adquisición, recopilación y almacenamiento de datos y se realizaron varias pruebas para corroborar el correcto funcionamiento de los sensores y del programa de recopilación de mediciones. También se elaboró una rutina de mantenimiento diario de los sensores, de la cual está encargado el geógrafo Héctor Estévez del ORS.

A finales del 2013 se contaba con un registro de datos continuo de irradiancia y de iluminancia global, difusa, directa normal en cuatro planos verticales: al Este, Sur, Oeste y Norte. Con estas mediciones, de la primera “Plataforma de observación de luz natural” en territorio mexicano, se caracteriza el recurso lumínico disponible y su relación con la irradiancia en la Cuenca de México. De esta manera se puede analizar el aprovechamiento de este recurso en los recintos arquitectónicos de esta región.

En esta época, partimos principalmente de dos premisas: el alto consumo eléctrico de las edificaciones compromete la preservación del medioambiente y el aprovechamiento del recurso lumínico disponible en la arquitectura significa un ahorro energético. Al mismo tiempo, se ha comprobado que el uso adecuado de la luz natural en los interiores enaltece la arquitectura y, al proporcionar el flujo luminoso para realizar diferentes tareas visuales, aporta bienestar y favorece la salud de las personas que habitan estos espacios. Se considera que la luz natural varía de un sitio geográfico a otro, debido a ciertos factores climáticos —altitud y orografía—, los cuales determinan elementos climáticos como humedad, nubosidad y presión atmosférica.

Por otro lado, la variación del flujo lumínico de una región a otra también se ve afectada por las trayectorias solares por la variación en la inclinación de rayos solares incidentes y al periodo de exposición a estos rayos, así como por la contaminación atmosférica —a través de sus gases y partículas suspendidas en la atmósfera. Por lo tanto, se vuelve fundamental conocer el recurso lumínico disponible del sitio en cuestión para aprovecharlo en la arquitectura local, lo cual significaría un ahorro energético.

La única forma de conocer el recurso lumínico disponible de un sitio en específico es realizando mediciones fotométricas. En este sentido, la “Comisión internacional de iluminación”, CIE, inició un programa en la década de los ochenta para medir el recurso lumínico en varios puntos del planeta. Sin embargo, desde ese entonces hasta ahora, la mayoría de las estaciones de medición se establecieron en latitudes medias, dejando a la especulación el recurso lumínico en latitudes intertropicales. Esto trae como consecuencia que el recurso lumínico en estos sitios sea especulativo y, por la falta de precisión, no se aproveche por completo en la arquitectura local. Al realizar mediciones fotométricas en el sitio en cuestión se crea una fuente de información confiable con la cual es posible caracterizar el recurso disponible del sitio. Con esta información es posible analizar y evaluar estrategias de diseño con luz natural, así como distintas medidas de ahorro de energía en el uso de la luz natural en la arquitectura.

La problemática que reconoce esta investigación parte de que la Cuenca de México no cuenta con un registro continuo y por un periodo largo de tiempo del recurso lumínico. Por esta razón, los valores lumínicos son simulados —en el mejor de los casos a partir de la irradiancia medida en el sitio con valores de eficacia luminosa obtenidos en otros puntos geográficos— y no representan las características del sitio en su totalidad.² Como consecuencia, las edificaciones no aprovechan este recurso por completo. Se plantea que, a través de la caracterización del recurso lumínico, es posible aprovechar la luz natural en las edificaciones en la cuenca. Otra problemática está ligada a las particularidades que presenta la cuenca,

2 Arturo Valeriano Flores, “Iluminación natural en la arquitectura: Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010), 39-40.

ya que ninguna de las estaciones de medición del programa de la CIE reúne todas estas particularidades como son su latitud intertropical, su clima templado, su altitud de más de 2,000 msnm y su atmósfera contaminada. Por lo tanto, la cuenca requiere de un estudio detallado respecto a la disponibilidad de la luz natural. Otro problema importante se refiere a las normas de construcción del lugar. Se ha demostrado, a través de trabajos experimentales del Posgrado de Arquitectura, que la normativa respecto a iluminación natural no garantiza la adecuada incidencia de luz natural en los espacios interiores, ya que esta no se basa en mediciones del recurso lumínico realizadas en el sitio.³ Por último, es necesario contar con herramientas de diseño lumínico para el uso de arquitectos y diseñadores de la construcción, con lo cual sea posible aprovechar el recurso lumínico en las edificaciones de la cuenca. Estas herramientas deben ser desarrolladas con base en un registro sólido y confiable del recurso lumínico. Por ende, si medimos y evaluamos el recurso lumínico disponible en la Cuenca de México, se pueden desarrollar herramientas de diseño lumínico —como matrices o transportadores— para poder aprovechar la luz natural como recurso disponible en los espacios de este sitio según la actividad visual a realizar.

El objetivo general de esta investigación es caracterizar la iluminancia y su relación con la irradiancia, registradas en la Cuenca de México, y desarrollar herramientas de diseño para aprovechar este recurso lumínico disponible en la arquitectura local. Los objetivos particulares se enfocan en los siguientes puntos:

1. Generar una base de datos continua, permanente y confiable —con la posibilidad de hacerla pública— con las mediciones de iluminancia, en conjunto con la irradiancia, la nubosidad y parámetros atmosféricos y meteorológicos, a través de la estructuración de una plataforma de observación con equipo especializado.
2. Caracterizar y conocer el comportamiento de la irradiancia e iluminancia —global, directa y difusa—, así como la irradiancia e iluminancia en cuatro planos verticales —

3 Guadarrama Gándara, “Luz natural: Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México”, 218.

Este, Sur, Oeste y Norte— del sitio con datos de medición de un ciclo climatológico (un año).

3. Conocer y modelar la relación de la irradiancia e iluminancia global para determinar los valores de eficacia luminosa de la cuenca.
4. Desarrollar herramientas de diseño con luz natural para aprovechar el recurso lumínico disponible en la arquitectura del sitio.

Las hipótesis que guían este trabajo son dos y se describen a continuación:

1. La caracterización del recurso lumínico en la Cuenca de México permitirá conocer la disponibilidad de este recurso a fin de desarrollar herramientas de diseño con luz natural para su aprovechamiento en los ambientes arquitectónicos.
2. El conocimiento de la relación entre la iluminancia e irradiancia en la cuenca permitirá modelar la relación entre ambos parámetros para determinar y evaluar los valores de eficacia luminosa de la región.

Para lograr esto, esta tesis se divide en cinco capítulos, más las conclusiones, el desglose de los recursos bibliográficos y el anexo.

El primer capítulo destaca la importancia de esta investigación y menciona ampliamente los antecedentes, así como la problemática actual del tema de este trabajo de investigación.

El segundo capítulo, referente al marco teórico, analiza conceptos ligados a la radiación solar y la luz natural; describe los factores astronómicos, geométricos, geográficos y físicos que explican la distribución temporal y espacial de la radiación solar en la superficie de la Tierra, detallando fórmulas de la geometría solar. También explica los factores y elementos climáticos y cómo cada uno influye en la radiación solar incidente en la superficie terrestre. Lo anterior, con el fin de comprender los diferentes flujos de radiación: directa, difusa y global. Este marco teórico cierra con la definición y comparación de los sistemas de medición de la radiometría y la fotometría.

El tercer capítulo, referente a la metodología, describe la ubicación, orografía, división política, el clima y la contaminación atmosférica de la Cuenca de México. También comprende la ubicación, extensión, las características del microclima y el tipo de clima de Ciudad Universitaria, lugar donde se ubica la “Plataforma de observación de luz natural”, así como la descripción de las características de esta plataforma de observación, su proceso de estructuración y la preparación de la información recabada.

El cuarto capítulo detalla las pruebas de validación, las cuales fueron aplicadas a los datos de medición para conocer el rango de aceptación. Una vez validada la información se presentarán los productos finales para su evaluación en forma de: tablas con promedios horarios, máximos y mínimos anuales; figuras y gráficas de cada parámetro medido; gráficas mensuales con la relación entre la irradiancia y la iluminancia global, y una tabla con los coeficientes del cuadrado de la correlación mensual entre la irradiancia y la iluminancia global.

El quinto capítulo caracteriza la disponibilidad del recurso lumínico; relaciona el flujo radiométrico y fotométrico global para determinar los valores de la eficacia luminosa para la región, y evalúa el recurso lumínico difuso disponible. También presenta el desarrollo de la “Matriz de diseño con luz natural” para ser utilizada por arquitectos, ingenieros y diseñadores de la construcción con el fin de aprovechar el flujo difuso para iluminar naturalmente los interiores arquitectónicos de la Cuenca de México.

Para finalizar este documento, se presentan las conclusiones del trabajo de investigación y una recopilación de los recursos bibliográficos empleados en el escrito. El anexo incluye una descripción detallada del desarrollo tecnológico de las bases de medición de parámetros radiométricos y fotométricos fabricadas. Este desarrollo fue necesario, ya que no existen productos similares en el mercado de empresas dedicadas al suministro de equipo especializado de medición.

1.1 IMPORTANCIA Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1 La importancia de la luz natural con énfasis en la arquitectura y el ser humano

Para comprender la importancia que tiene la luz natural en la arquitectura y para el ser humano es preciso comenzar mencionando lo que entendemos por luz y por luz natural.

La luz es radiación electromagnética con propiedades ondulatorias y fotónicas, la cual en combinación con el ojo —que es sensible a esta y transmite al cerebro la información captada— producen el fenómeno de la visión.¹ Este fenómeno nos ha permitido conocer, entender y apreciar el mundo y su belleza.

La luz natural proviene de una fuente inagotable que es el Sol y se refiere a una angosta franja del espectro electromagnético de radiación solar. El espectro electromagnético es la descomposición de la energía proveniente del Sol, el cual está constituido por una gama de longitudes de onda.² El rango de esta angosta franja, llamada luz visible, abarca de los 380 a los 780 nm, fuera de este rango quedan las radiaciones que no son percibidas por el ojo humano.

1 Ana María Cetto, *La luz: en la naturaleza y en el laboratorio*, 2.^a ed. (México, DF: Fondo de Cultura Económica, 2012), 17, 92 y 120.

2 Teresa Ayllón, *Elementos de meteorología y climatología*, 3.^a ed. (México, DF: Trillas, 2013), 33.

La luz natural viaja, a través de la atmósfera, mientras no se encuentre con ningún obstáculo que le impida el paso. Si entendemos, que los volúmenes y formas arquitectónicas concebidas modifican el paso de la luz, reflejándola, absorbiéndola y transmitiéndola, comprenderíamos la importancia que tiene diseñar la arquitectura contemplando la luz natural del sitio en cuestión; estos fenómenos luminosos —reflexión, absorción y transmisión— generan un juego de luces y sombras que es lo que detecta y asombra nuestra mirada.³ No es para sorprenderse, que arquitectos con renombre como Alvar Aalto, Louis Kahn y Luis Barragán entre otros, que presumen de haber diseñado considerando la luz natural, nos maravillen con sus obras, principalmente por los contrastes de luz y sombras y distintas tonalidades que percibimos a través de ellas.

La luz natural transmitida al interior de los volúmenes arquitectónicos —a los espacios habitables— es la que nos permite ver y desarrollar nuestras actividades diurnas al interior de estos. Actualmente, este hecho ha cobrado especial interés debido al ahorro energético que puede representar utilizar más luz natural en vez de suplirla con luz artificial para la realización de tareas diurnas en los espacios intramuros. Por ejemplo, según estudios, edificios comerciales y de oficinas con horarios diurnos, pueden ahorrar del 20 al 40% en consumo de luz y refrigeración con el uso apropiado de luz natural en los interiores arquitectónicos.⁴

También ha tomado especial interés los efectos que tiene la luz natural y la luz artificial en los seres humanos. Investigaciones muestran como privar a las personas del ciclo luminoso natural día-noche, genera trastornos fisiológicos y psicológicos; y como el espectro completo y único de la luz natural propician la salud y el bienestar humano.⁵

“Se entiende que el ser humano segrega, gracias al ciclo día-noche, hormonas que mantienen en equilibrio al organismo. Si este ciclo se altera, por ejemplo, al alargar el periodo luminoso natural a través del uso excesivo de luz eléctrica por las noches o al disminuir el flujo

3 Cecilia Guadarrama y Daniel Bronfman, “Sobre la luz natural en la arquitectura”, *Bitácora* 29 (2014), 077.

4 Mohamed Boubekri, *Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies* (Oxford: Architectural Press, 2008), 5; Tariq Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 2.^a ed. (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004), xxxv.

5 Boubekri, *Daylighting, Architecture and Health*, 78-80.

luminoso natural requerido por el día —sustituyéndolo con luz eléctrica—trae como resultado desajustes en la salud y en el bienestar psicológico de las personas. Por otro lado, se han realizado varias investigaciones referentes a la influencia positiva que tiene la luz natural en las personas.”⁶ Estas investigaciones han mostrado como esta crea sensación de bienestar y genera mejor desempeño laboral y escolar y en el caso de enfermos, como la luz natural podría acelerar el proceso de recuperación.⁷

Por lo antes mencionado, concluimos que en una época en donde el alto consumo eléctrico de las edificaciones compromete la preservación del medioambiente, el ahorro energético que puede significar el uso adecuado de la luz natural en los interiores arquitectónicos es de suma relevancia. Aunado al hecho de que considerar la luz natural del sitio en cuestión para el diseño arquitectónico, enaltecería la arquitectura. Así mismo, el uso adecuado de la luz natural en los interiores arquitectónicos aportaría bienestar y propiciaría la salud de las personas que habitan estos espacios; lo cual es en sí la finalidad de la ciencia en conjunto con la técnica.⁸

1.1.2 La importancia de conocer el recurso lumínico disponible

La luz natural varía de un sitio geográfico a otro, debido a la presencia e intensidad de factores y elementos climáticos; a la trayectoria solar; y a la contaminación atmosférica, de cada sitio.

Los factores climáticos como la altitud y la orografía son factores que determinan la cantidad de luz de un sitio. La altitud del sitio condiciona la luz, ya que los rayos del Sol —fuente de la luz natural— tienen que atravesar menor espesor de la atmósfera, si la altitud del sitio es mayor que el nivel del mar, lo que significa menor absorción y dispersión de los rayos solares por la atmósfera. Por otro lado, altos relieves orográficos retrasan la salida y anticipan la puesta del Sol para un sitio, condicionando la luz que recibe.

6 Guadarrama y Bronfman, “Sobre la luz natural en la arquitectura”, 081.

7 Boubekri, *Daylighting, Architecture and Health*, 101-109.

8 Héctor G. Riveros Rotgé, Adriana Julián Sánchez y Héctor Riveros Rosas, *Método científico experimental* (México, DF: Trillas, 2009), 24.

Los elementos climáticos, como la humedad, la nubosidad y la presión atmosférica también condicionan la cantidad de luz que recibe un sitio, ya que estos atenúan a través de los 3 mecanismos de extinción —dispersión, absorción y reflexión— la radiación solar a su paso por la atmósfera del sitio. La humedad, entendiéndola como la cantidad de vapor de agua existente en la atmósfera en un tiempo y un lugar determinado, absorbe la radiación solar incidente y reflejada en la ventana del visible y del infrarrojo, respectivamente, atenuando este flujo de energía. Según la presión atmosférica del sitio, la dispersión de la radiación solar por la densidad de las moléculas de aire será menor o mayor, ocasionando una mayor o menor atenuación de la radiación solar. La nubosidad define el tipo de cielo del sitio. Este puede ser en general nublado, parcialmente nublado o despejado, lo que condiciona en mayor medida la luz natural disponible.

La posición del Sol en la bóveda celeste define la cantidad y calidad de luz natural que recibe un sitio. La posición del Sol, desde el punto de vista del observador, cambia en cada momento a lo largo del año —debido a los movimientos de translación y rotación de la Tierra alrededor del Sol— generando trayectorias solares, las cuales son distintas para cada latitud geográfica, debido a la forma de la Tierra y a la inclinación de su eje de rotación, principalmente.

La contaminación atmosférica afecta la luz del sitio. Esta, a través de sus gases y partículas suspendidas, absorben y dispersan la luz solar. Estudios en Inglaterra, demuestran que la luz solar directa se atenúa según la claridad de la atmósfera de una zona rural en comparación con una zona urbana e industrial, por la dispersión causada por el vapor de agua, gases y partículas suspendidas de la atmósfera.⁹

Por las particularidades que presenta la luz natural de cada punto geográfico, se vuelve fundamental conocer el recurso lumínico del sitio en cuestión.

9 Peter Tregenza y David Loe, *The Design of Lighting* (Londres: Spon Press, 2004), 34.

1.1.3 ¿Por qué es importante realizar mediciones de luz natural *in situ*?

La única forma de conocer el recurso lumínico disponible de un sitio en específico es realizando mediciones fotométricas en este.

Tal es el caso, que desde mediados de los años 80', se organizó un programa de colaboración internacional para realizar mediciones de luz natural en conjunto con otros parámetros atmosféricos, con el fin de conocer este recurso disponible en diferentes partes del mundo, bajo una serie de directrices comunes.¹⁰ Lanzado oficialmente en 1991, el “Programa Internacional de Mediciones de Luz Natural” (*International Daylight Measurement Programme*, IDMP), creado por un comité técnico de la “Comisión Internacional de Iluminación” (*Commission Internationale de L'Eclairage*, CIE), proporciona convenciones para la medición práctica, recomendaciones sobre el control de calidad de los datos y su difusión, a través de su documento “*Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*” publicado en 1994.

El trasfondo de la necesidad de conocer el recurso lumínico disponible, comienza con la crisis energética de los años 70', donde diseñadores y propietarios de edificaciones buscaron en la iluminación natural una forma eficiente de ahorrar energía.¹¹ A partir de este momento, se llevaron a cabo numerosos proyectos de investigación, los cuales se enfocan en la medición del recurso natural disponible; la caracterización de este; el desarrollo de modelos matemáticos —que representen el recurso disponible— y la validación de estos; así como la interacción del recurso con las edificaciones.

Las mediciones se llevaron a cabo en países ubicados, principalmente, en latitudes medias, dejando en el terreno de las especulaciones, la disponibilidad del recurso lumínico en otros territorios, como los más cercanos a los trópicos, por ejemplo.¹² Así, los valores lumínicos en estos territorios son, en general, estimados y no se basan en mediciones realizadas *in situ*, lo que representa un mal aprovechamiento del recurso disponible. Por lo tanto, es necesario

¹⁰ CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement* (Viena: CIE Central Bureau, 1994), VII.

¹¹ *Historia*, en The IDMP Network, <www.idmp.entpe.fr> (consulta: 13/05/2013).

¹² Pipat Chaiwiwatworakul, *Daylighting in the Tropics: Daylight Availability, Sky Luminance Distribution, Daylight Application with Automated Blind* (Sarrebruck: Lambert Academic, 2011), 7.

contar con más puntos de medición en regiones ecuatorianas e intertropicales¹³, para caracterizar la luz natural y sus condiciones especiales en estos territorios y con esto aprovechar el recurso lumínico disponible de cada sitio.

A través de las mediciones de luz natural y su registro, se genera una fuente confiable del recurso. Esta fuente es la base para el desarrollo de modelos y su validación.¹⁴ El desarrollo de modelos y su validación tiene especial importancia actualmente en el diseño de edificaciones, ya que especialistas en el campo, recurren a simulaciones en computadora —las cuales se basan en estos modelos para representar los fenómenos naturales— para simular la interacción de la arquitectura con su medio y a través del análisis de esta simulación, encontrar el equilibrio energético.¹⁵ La importancia radica en que los modelos representen adecuadamente el fenómeno natural de acuerdo a las condiciones particulares del sitio y para esto es necesario medir el recurso de forma regular y por un periodo largo de tiempo.

Por lo tanto, y debido a la clara necesidad que exponen las conclusiones de mi tesis de maestría —de contar con un registro de datos de luz natural ininterrumpido por un largo periodo de tiempo en la Ciudad de México— este trabajo de investigación tiene como uno de sus objetivos comenzar a medir la luz natural y su relación con la radiación solar e implementar esta variable lumínica en una plataforma de observación de manera permanente. Este registro se convierte en el primer banco de datos del recurso lumínico natural y su relación con la radiación solar en territorio mexicano.

Aunque investigadores mencionan que es necesario realizar mediciones de un periodo de cinco, diez y óptimamente treinta años, con información recopilada regularmente, para determinar cambios anuales, estacionales, mensuales y diarios del recurso de luz natural¹⁶, consideramos que con el registro de un ciclo (un año) será posible comenzar a caracterizar la luz natural de la cuenca.

13 Richard Kittler, Miroslav Kocifaj y Stanislav Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology* (Nueva York: Springer, 2011), 84.

14 *Historia*, en The IDMP Network, <www.idmp.entpe.fr> (consulta: 13/05/2013).

15 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 1.

16 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 84.

1.1.4 Temas de investigación ligados a las mediciones de luz natural

A lo largo de los años, los datos obtenidos en las estaciones de medición del programa IDMP, han permitido determinar a detalle las características y condiciones locales de la luz natural¹⁷, por ejemplo, algunos temas de investigación han sido los siguientes: la disponibilidad de la iluminancia, irradiancia y distribución de la luminancia del cielo con sus cambios diarios y estacionales; la probabilidad de ocurrencia de tipos de cielo en el sitio, entre otros.¹⁸

El registro del recurso lumínico disponible también ha permitido el desarrollo de modelos matemáticos —los cuales representan el fenómeno natural— y su validación en diferentes puntos geográficos, bajo diferentes condiciones. Algunos temas de investigación en este campo son, por ejemplo: modelos de irradiancia e iluminancia y de la distribución de irradiancia y luminancia bajo diferentes condiciones de cielo; modelos de irradiancia e iluminancia en superficies inclinadas; modelos de eficacia luminosa en distintos planos y bajo diferentes tipos de cielo; así como la validación de estos en diferentes partes de mundo.¹⁹

Al caracterizar y modelar la luz natural del sitio, ha sido posible analizar, evaluar y monitorizar estrategias de diseño y soluciones innovadoras, así como distintas medidas de ahorro de energía en el uso de la luz natural en la arquitectura y el urbanismo. A su vez, esta información ha servido para la generación y aplicación de normativas y criterios para el diseño de iluminación natural. Este es otro alcance que han tenido las mediciones del recurso lumínico disponible.

17 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 31.

18 Roberta Vieira Gonçalves de Souza y Fernando Oscar Ruttkay Pereira, “Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento”, *Ambiente Construído* 4, n.º 3 (2008): 79–94; Pilar Oteiza y Ana Pérez-Burgos, “Diffuse Illuminance Availability on Horizontal and Vertical Surfaces at Madrid, Spain”, *Energy Conversion and Management* 64, n.º C (2012): 313–19; A. Bartzokas, H D Kambezidis, S Darula y R Kittler, “Comparison Between Winter and Summer Sky-Luminance Distribution in Central Europe and in the Eastern Mediterranean”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, n.º 7 (2005): 709–18.

19 Norio Igawa, Yasuko Koga, Tomoko Matsuzawa y Hiroshi Nakamura, “Models of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution”, *Solar Energy* 77, n.º 2 (2004): 137–57; Surapong Chirattananon, Pipat Chaiwiwatworakul y Singthong Pattanasethanon, “Daylight Availability and Models for Global and Diffuse Horizontal Illuminance and Irradiance for Bangkok”, *Renewable Energy* 26, n.º 1 (2002): 69–89; Ana Pérez-Burgos, Argimiro de Miguel y Julia Bilbao, “Daylight Illuminance on Horizontal and Vertical Surfaces for Clear Skies: Case Study of Shaded Surfaces”, *Solar Energy* 84, n.º 1 (2010): 137–43; Hyo Joo Kong y Jeong Tai Kim, “Modeling Luminous Efficacy of Daylight for Yongin, South Korea”, *Energy & Buildings* 62 (2013): 550–58.

Por lo antes mencionado, el avance en el uso adecuado de la luz natural en la arquitectura y urbanismo —que tienen los sitios que cuentan con mediciones del recurso disponible— es gracias al registro continuo de este en conjunto con otros parámetros atmosféricos; a su caracterización; y al desarrollo y validación de modelos matemáticos.

1.2 PROBLEMÁTICA

1.2.1 La falta de mediciones de luz natural en la Cuenca de México

La problemática comienza en que la Cuenca de México no cuenta con un registro del recurso lumínico natural continuo y por un periodo prolongado de tiempo, aun con la importancia que tiene incorporar la luz natural en las edificaciones de esta ciudad, como revisamos en el inciso correspondiente.

La disponibilidad de la luz natural del cielo de la cuenca ha sido simulada, utilizando técnicas de modelado basadas en modelos empíricos y a partir de mediciones de radiación solar. Estas simulaciones presentan valores promedio y no representan las particularidades del sitio en su totalidad²⁰, por lo que las edificaciones no aprovechan en su totalidad este recurso lumínico.

En ese sentido, tener un registro del recurso lumínico natural continuo y por un periodo prolongado de tiempo, se vuelve fundamental para la caracterización de la luz natural del sitio. Es a través de esta caracterización, que será posible aprovechar la luz natural en las edificaciones de esta cuenca.

20 Arturo Valeriano Flores, “Iluminación natural en la arquitectura: Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010), 39-40; Cecilia Guadarrama Gándara, “Luz natural: Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011), 102.

1.2.2 Las condiciones particulares de la Cuenca de México

Las condiciones particulares de la Cuenca de México como su clima templado, su latitud intertropical, su altitud de más de 2,000 metros sobre el nivel del mar y su atmósfera contaminada, requieren de un estudio detallado respecto a la disponibilidad de luz natural según las diferentes condiciones de cielo que se presentan en esta urbe.

En general, existen tres condiciones de cielo definidas por la CIE, cielo nublado, cielo despejado y cielo parcialmente nublado. La primera condición de cielo adoptada por la CIE fue el cielo nublado en 1955 y posteriormente, el cielo despejado en 1973. El cielo parcialmente nublado aún no ha sido adoptado como modelo de esta comisión, pero está integrado dentro de los 15 cielos estándar de la CIE (CIE Standard General Sky²¹). Estos 15 cielos se dividen de la siguiente forma: cinco en el rango de los nublados, cinco en el rango de los parcialmente nublados y cinco en el rango de los despejados.

Para definir los 15 cielos estándar, los investigadores Kittler y Darula recopilaron información de varias estaciones de medición del programa IDMP respecto a la disponibilidad de luz natural y la distribución de la luminancia de la bóveda celeste, entre otros parámetros.²² Estos 15 cielos están diseñados para cubrir todas las posibles condiciones de cielo, considerando diferentes dispersiones difusas en la atmósfera y sus efectos en el rayo solar.²³ A la falta de mediciones regulares, por un periodo prolongado de tiempo, y a la falta del equipo de medición especializado —para medir la distribución de la luminancia del cielo—, aún no ha sido posible clasificar las condiciones del cielo de la Cuenca de México dentro de estos 15 cielos estándar, lo cual es la base para cualquier cálculo de luz natural.

Sin embargo, por el momento, con el registro de datos que se obtendrá de la “Plataforma de observación de luz natural”, esta investigación tiene como alcance caracterizar la dispo-

21 CIE S 011/E, *Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky* (Viena: CIE Central Bureau, 2003).

22 Stanislav Darula y Richard Kittler, “CIE General Sky Standard Defining Luminance Distributions”, *Bi-annual International Building Performance Simulation Association Conference Montreal, IBPSA* (2002), 2.

23 Darula y Kittler, “CIE General Sky Standard Defining Luminance Distributions”, 1.

nibilidad de luz natural —en otras palabras, la iluminancia exterior— en relación a la radiación solar del sitio y analizar el aprovechamiento de este recurso en los recintos arquitectónicos.

1.2.3 Estimar la luz natural disponible a partir de mediciones de radiación solar

La problemática se enfoca en suponer que al ser la luz natural una parte del espectro electromagnético completo de radiación solar, la relación de ambas será igual en todo momento.

Esta suposición ha llevado a modelar la luz natural disponible a partir de mediciones de radiación solar. Aunque los modelos contemplan diferentes factores involucrados en los procesos de extinción de la energía solar a su paso por la atmósfera²⁴; los valores de iluminancia obtenidos del modelado, en general, no representan la disponibilidad de la luz natural del sitio en su totalidad.²⁵

La relación de la radiación solar y la luz natural dependerá del contenido y composición de la atmósfera en un momento y sitio en específico, ya que los gases y la forma, tamaño y génesis de las partículas suspendidas interactúan de distinta manera con diferentes longitudes de onda. Esto quiere decir que los procesos de absorción, dispersión y reflexión de la energía emanada del Sol, en su paso a través de la atmósfera, son selectivos a diferentes longitudes de onda; por lo que la relación radiación solar y luz natural cambiará según el tipo y densidad de gases y partículas suspendidas en la atmósfera en un momento dado. Por lo anterior, es de suma importancia medir y conocer la luz natural independiente del espectro completo de radiación solar.

1.2.4 La normativa respecto al uso de la luz natural en la arquitectura del sitio

Otra de las problemáticas radica en la normativa respecto a la interacción de la luz natural con las edificaciones en la cuenca, la cual no se basa en mediciones fotométricas *in situ* y por un largo periodo, para proponer normas y criterios de diseño con luz natural. Trabajos académicos

24 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 103-115.

25 Valeriano Flores, "Iluminación natural en la arquitectura", 39-40.

micos y experimentales, realizados en el Posgrado de Arquitectura de esta universidad, han demostrado —aun con mediciones en periodos menores a un año— la deficiencia de los criterios y normas de luz natural que propone el “Reglamento de construcciones para el Distrito Federal” para las edificaciones de esta urbe.²⁶

La normativa debería distinguir entre los diferentes componentes del flujo lumínico, esto quiere decir que debería de diferenciar entre el flujo directo —que se refiere a los rayos solares, luz directa— y el flujo difuso —el cual proviene de la bóveda celeste, excluyendo los rayos solares, luz difusa—. Esto con el fin de poder considerar la incidencia de luz difusa y luz directa por separado. La incidencia de luz difusa en un espacio intramuros proporcionaría valores lumínicos mínimos aceptables y relativamente estables, la estabilidad de estos dependería del tipo de cielo y nubosidad de este. Mientras que la incidencia de luz directa es ocasional —esta depende principalmente de la orientación de la abertura, la fecha del año y hora del día—, incrementa los valores lumínicos considerablemente e impide en momentos la realización de ciertas actividades visuales, ya que ocasiona deslumbramientos y calor excesivo. La luz directa puede ser excluida del espacio a través de mecanismos de control solar y de esta forma regular su incidencia y al mismo tiempo podría permitirse la incidencia de luz difusa en los interiores arquitectónicos.

La normativa de la cuenca a través de la “Norma técnica complementaria del proyecto arquitectónico” del “Reglamento de construcciones para el Distrito Federal” establece un porcentaje de abertura tanto lateral como cenital en relación al área del espacio. Este establece una abertura mínima de 17.5% del área del espacio para la incidencia lateral de luz natural —a excepción de los locales complementarios donde el porcentaje mínimo es del 15%— en cualquier orientación; y mínimo un 4% del área para aberturas cenitales —excluyendo industrias, donde será mínimo del 5%—. ²⁷ Estas aberturas permitirán la incidencia de luz difusa y de luz directa. Por lo tanto, dependiendo de la orientación, de la fecha del año y del momento

26 Guadarrama Gándara, “Luz natural”, 210.

27 Gaceta Oficial del Distrito Federal, “Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico” (México, DF: Gobierno del Distrito Federal, 8 de febrero de 2011), 47.

del día, la abertura permitirá la incidencia de los rayos solares —aumentando los valores lumínicos significativamente— o permitirá solo luz difusa de la bóveda celeste. Si la normativa distinguiera criterios según cada flujo —ya sea difuso o directo— podría establecer valores lumínicos mínimos aceptables al dejar incidir la luz difusa a través de ciertas dimensiones y orientaciones de las aberturas, proponiendo mecanismos solares para controlar la incidencia de la luz directa, si así se requiere. Con esto, garantizaría que los espacios intramuros cuenten con valores lumínicos mínimos aceptables, al incidir solo luz difusa, para realizar diferentes tareas visuales por ciertas horas al día. Aparte, podría requerir, dependiendo de las actividades dentro del espacio, que las aberturas admitieran ciertas horas de Sol al día para garantizar el bienestar de las personas.

Por lo tanto, al controlar la incidencia de luz directa y permitir la incidencia de luz difusa, es posible obtener valores lumínicos mínimos aceptables dentro de los espacios, según las dimensiones y orientaciones de la abertura. Las dimensiones de las aberturas dependerán de cada actividad visual y del recurso lumínico disponible en cada orientación. Por ende, conocer el recurso disponible en cada orientación y caracterizarlo en la cuenca, es de suma importancia para evaluar su aprovechamiento en los interiores arquitectónicos. Solo conociendo el comportamiento de este recurso lumínico en este sitio será posible incidir en la reglamentación para la construcción de edificaciones en este enclave urbano.

Para comenzar la caracterización del recurso lumínico y su relación con el recurso solar, es necesario comprender las características de la radiación solar, lo que entendemos por el espectro visible y las diferencias principales de la radiometría y la fotometría. Así como, los factores que explican la distribución temporal y espacial de la radiación solar en la superficie de la Tierra. Analizar los tres procesos de extinción de la radiación solar a su paso por la atmósfera y los factores y elementos climáticos que modifican la radiación solar es fundamental para comprender los tres principales flujos de energía de radiación que llegan a la superficie de la Tierra y poder evaluarlos.

2.1 RADIACIÓN SOLAR Y EL ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR FUERA DE LA ATMÓSFERA

La radiación solar es la energía emitida por el Sol —que se propaga en forma de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda y en paquetes llamados fotones— a consecuencia de las continuas reacciones de fusión nuclear que ocurren al interior de esta estrella a extremas altas presiones y temperaturas; durante estas reacciones, una pequeña fracción de la masa se transforma en la radiación electromagnética y viento solar.¹ La energía radiada desde la fotosfera solar viaja en todas direcciones, de forma isotrópica, hasta encontrarse con la órbita de la Tierra —a una distancia promedio de 149.5 millones de kilómetros— en donde

1 David Riveros Rosas, “Notas de solarimetría” (Chihuahua: Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2011), 3; Agustín Muhlia Vázquez, “Notas para el curso de solarimetría” (Oaxaca: Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2004), 3.

por cada metro cuadrado de superficie, en el “tope” de la atmósfera, recibe alrededor de 1,367 W, lo que conocemos como la *Constante Solar*.²

Diversas determinaciones de la temperatura de la fotosfera se ubican en el rango de los 5,500 a 6,300 K;³ al modelar la distribución espectral de la radiación solar —conforme a la ley del cuerpo negro de Max Planck, donde la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la energía radiante varían según la temperatura del cuerpo— con una temperatura de la fotosfera solar igual a 5,834 K, la distribución espectral calculada simula la irradiancia espectral medida, ambas fuera de la atmósfera terrestre. (Figura 2.1)

En el espectro de radiación solar, fuera de la atmósfera, predominan la radiación visible —de 380 nm a 780 nm— con aproximadamente el 47%, la infrarroja —de 780 nm a 1,000,000 nm— con aproximadamente el 46% y en menor medida la ultravioleta —de 100 nm a 380 nm— con aproximadamente el 7%. (Figura 2.1 y tabla 2.1)

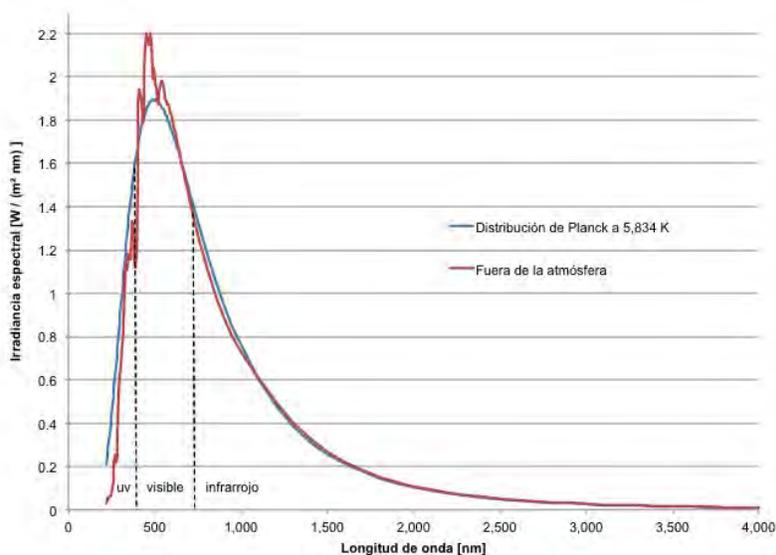


Figura 2.1: Irradiancia espectral fuera de la atmósfera y la distribución de Planck a 5,834 K, retomado de Riveros, *Notas de solarimetría*, 7, con modificaciones.

2 Definición del espectro de radiación solar, irradiancia espectral y la Constante Solar: Cecilia Guadarrama Gándara, “Luz natural” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011), 237.

3 Richard Kittler, Miroslav Kocifaj y Stanislav Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology* (Nueva York: Springer, 2011), 52.

Tabla 2.1 Clasificación de la radiación de acuerdo a su longitud de onda y su contribución al espectro solar fuera de la atmósfera terrestre.

Longitud de onda	Tipo de radiación	% del flujo de radiación
< 100 nm	Rayos X y rayos gama	
100 nm - 280 nm	Ultravioleta C	0.5 %
280 nm - 315 nm	Ultravioleta B	1.4 %
315 nm - 380 nm	Ultravioleta A	5.3 %
380 nm - 780 nm	Visible	47.3 %
780 nm – 1,500 nm	Infrarrojo cercano	32.5 %
1,500 nm – 5,600 nm	Infrarrojo medio	13.0 %
5,600 nm – 1,000,000 nm	Infrarrojo lejano	0.02 %
> 1,000,000 nm	Micro y ondas de radio	

Retomada de Riveros, “Notas de solarimetría”, 5, con modificaciones según análisis por el mismo Dr. Riveros.

2.2 FACTORES ASTRONÓMICOS, GEOMÉTRICOS, GEOGRÁFICOS Y FÍSICOS QUE EXPLICAN LA DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

La cantidad y calidad de radiación solar que recibe la Tierra está determinada en parte por factores astronómicos, geométricos, geográficos y físicos. Estos generan que un punto de interés sobre la Tierra reciba radiación solar en diferentes lapsos de tiempo y con diferentes intensidades, como resultado principalmente, de los múltiples ángulos de incidencia de los rayos solares sobre este punto a lo largo del año. Aunado al efecto de estos factores, la cantidad de la radiación solar que recibe un punto de interés dependerá de las condiciones atmosféricas que atravesarán los rayos solares desde el “tope” de la atmósfera hasta la superficie de la Tierra.

A continuación, se describen estos factores y se detallan las ecuaciones para calcularlos, en el caso que sea oportuno, que no se hayan mencionado en la tesis de maestría o se hayan actualizado y modificado a partir de esta última. En este apartado es importante mencionar las ecuaciones utilizadas, ya que estas fueron empleadas para realizar los procesos de validación descritos en el capítulo cuatro.

Distancia Tierra-Sol

El Planeta Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica con el Sol en uno de sus focos. Cuando la Tierra se encuentra en el punto más cercano al Sol se le conoce como *perihelio* —correspondiente al invierno en el hemisferio Norte, aproximadamente el 3 de enero—⁴ y la distancia Tierra-Sol es de 147 millones de kilómetros; mientras que cuando la Tierra se encuentra en el punto más lejano al Sol se le conoce como *afelio* —correspondiente al verano en el hemisferio Norte, aproximadamente el 4 de julio—⁵ la distancia Tierra-Sol en este caso es de 152 millones de kilómetros.⁶ La *distancia media Tierra-Sol* está definida como el promedio de la distancia del perihelio y del afelio, correspondiente a 149.5 millones de kilómetros, este valor es utilizado como unidad de distancia y se le conoce como *unidad astronómica (UA)*.⁷ Al variar la distancia media Tierra-Sol, la irradiancia que llega al exterior de la atmósfera también varía a lo largo del año, estas variaciones de irradiancia pueden significar como máximo 6.6%.⁸ (Figura 2.2)

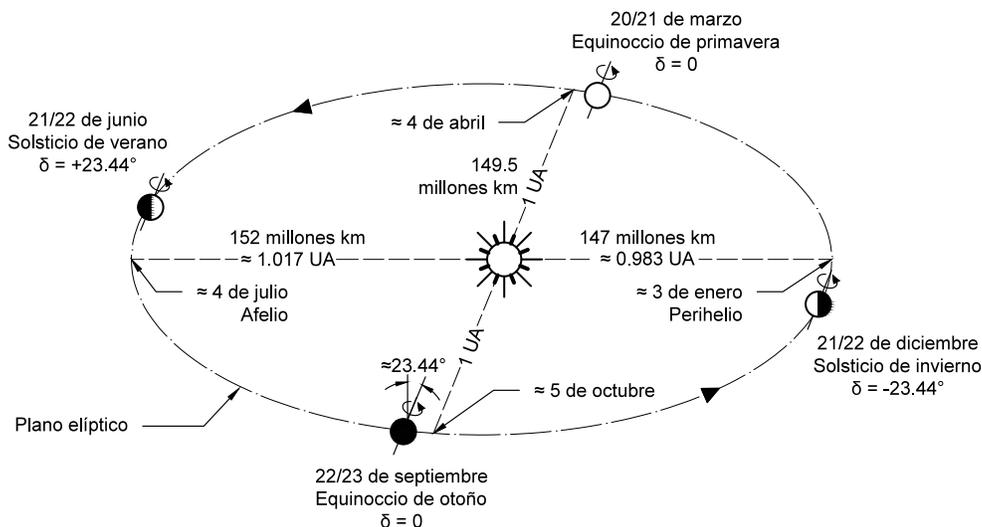


Figura 2.2: Movimiento de la Tierra alrededor del Sol, basada en Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 2.

4 Muhammad Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation* (Ontario: Academic Press, 1983), 3.

5 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 3.

6 Riveros Rosas, David, Mauro Valdés Barrón, Camilo Alberto Arancibia Bulnes y Roberto Bonifaz Alfonso, *La radiación solar* (México, DF: UNAM y Editorial Terracota, 2012), 25 y 26; N. Robinson, ed., *Solar Radiation* (Amsterdam: Elsevier, 1966), 29.

7 Robinson, *Solar Radiation*, 29.

8 Riveros, "Notas de solarimetría", 27.

Día juliano

Para los cálculos de radiación solar es necesario conocer el número de día del año, correspondiente a una fecha en específico, a este se le conoce como *día juliano* (j).

$$j = 1, 2, 3, \dots, 365$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, 366, \text{ año bisiesto.}$$

Factor de corrección distancia Tierra-Sol

El *factor de corrección de la distancia Tierra-Sol* (F_{cd}) se obtiene a través de la ecuación propuesta por Dogniaux y Page, ya analizada en la tesis de maestría, la fórmula es la siguiente⁹:

$$F_{cd}(j) = 1 + \sum_{i=1}^{i=3} [(a_i \cos(qji) + b_i \sin(qji))] / 1353 \quad (2.1)$$

En donde:

$$q = 2\pi/366$$

$$a_1 = 45.326$$

$$a_2 = 0.88018$$

$$a_3 = -0.00461$$

$$b_1 = 1.8037$$

$$b_2 = 0.09746$$

$$b_3 = 0.18412$$

Declinación solar

La Tierra, además de girar sobre un plano elíptico alrededor del Sol, también rota sobre su mismo eje, a este se le conoce como eje polar o eje de rotación. Este está inclinado aproximadamente 23.44° de la normal al plano elíptico y mantiene su orientación relativamente constante a lo largo de su trayectoria alrededor del Sol.¹⁰ Sin embargo, el ángulo entre la línea que une el centro del Sol y el centro de la Tierra en relación al plano ecuatorial de esta, cambia todos los días, a este ángulo se le conoce como *declinación solar* (δ).¹¹ Este ángulo presenta un valor máximo de $+23.44^\circ$ alrededor del 21/22 de junio y un valor mínimo de -23.44° alre-

9 Guadarrama Gándara, "Luz natural", 52.

10 Riveros, "Notas de solarimetría", 11.

11 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 6.

dedor del 21/22 de diciembre. La declinación solar es igual a 0 alrededor del 20/21 de marzo y del 22/23 de septiembre (figura 2.2). Una fórmula sencilla para calcular la declinación solar para cada día juliano la propone Dogniaux y Page, esta se describe en la tesis de maestría, aquí se presenta la ecuación¹²:

$$\delta(j) = \sum_{i=1}^{i=3} (c_i \text{Cos}(qji) + d_i \text{Sen}(qji)) + 0.33281 \quad (2.2)$$

En donde:

$$q = 2\pi/366$$

$$c_1 = -22.9840$$

$$c_2 = -0.3499$$

$$c_3 = -0.1398$$

$$d_1 = 3.78720$$

$$d_2 = 0.03205$$

$$d_3 = 0.07187$$

Declinación solar y estaciones del año

La declinación solar genera en parte, que la incidencia de los rayos solares en la superficie de la Tierra tenga diferentes inclinaciones a lo largo del año. Esto conlleva a una variación en la intensidad de la radiación solar, ya que al aumentar el ángulo de incidencia con respecto a la normal a una superficie horizontal, disminuye la densidad de energía, que impacta sobre esta de forma proporcional al coseno del ángulo de incidencia.¹³ Durante el invierno en el hemisferio Norte, la radiación solar incide con mayor ángulo de inclinación a diferencia del hemisferio Sur, donde la incidencia en el trópico de capricornio es prácticamente perpendicular.¹⁴ (Figura 2.3)

La variación en la inclinación de los rayos solares y el periodo de exposición a estos sobre la Tierra es lo que da lugar a las diferentes estaciones del año.¹⁵

12 Guadarrama Gándara, "Luz natural", 51.

13 Riveros, "Notas de solarimetría", 11.

14 Riveros, "Notas de solarimetría", 11.

15 Riveros, "Notas de solarimetría", 11.

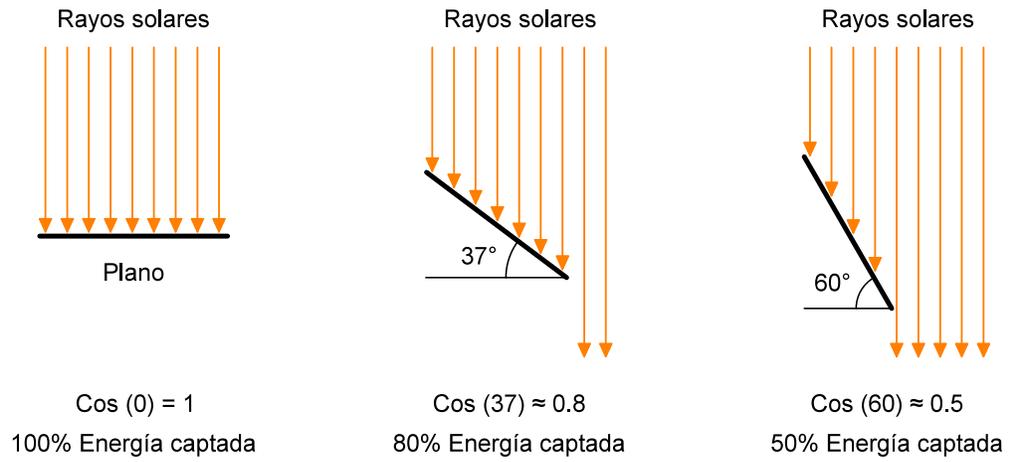


Figura 2.3: Esquema para ejemplificar la incidencia de rayos solares sobre una superficie y la duración del día y la noche en los solsticios, basada en Riveros, "Notas de solarimetría", 12.

Ecuación del tiempo

Para calcular la *ecuación del tiempo* (ϵ)¹⁶ se utiliza la fórmula de Dogniaux y Page, analizada en la tesis de maestría, la fórmula es la siguiente¹⁷:

$$\epsilon(j) = \sum_{i=1}^{i=3} (e_i \text{Cos}(qji) + f_i \text{Sen}(qji)) + 0.00037 \quad (2.3)$$

En donde:

$q = 2\pi/366$	
$e_1 = 0.43177$	$f_1 = -7.3764$
$e_2 = -3.1650$	$f_2 = -9.3893$
$e_3 = 0.07272$	$f_3 = -0.24498$

Latitud y radiación solar

Para explicar los siguientes conceptos es necesario primero describir la *latitud* (φ). Esta se define como el ángulo que se mide desde el centro de la Tierra hasta el paralelo que contiene el punto de interés; la latitud 0 corresponde al paralelo de mayor diámetro, conocido como línea del ecuador.¹⁸

A consecuencia del movimiento de traslación Tierra-Sol y la rotación de la Tierra sobre su mismo eje, las distintas partes de la superficie terrestre reciben distintas cantidades de radiación solar. Como resultado del perihelio y el afelio, enero debería recibir más intensidad de radiación que julio, por lo tanto, los inviernos del hemisferio Norte debería de ser más cálidos que los del hemisferio Sur y los veranos del hemisferio Sur más cálidos que los del hemisferio Norte (figura 2.2); en la realidad, por la circulación de calor de la atmósfera y la continentalidad, el contraste observado entre las estaciones y los hemisferios, es el inverso al descrito.¹⁹

16 Definición de la ecuación del tiempo: Guadarrama Gándara, "Luz natural", 50.

17 Guadarrama Gándara, "Luz natural", 51.

18 Riveros, "Notas de solarimetría", 13.

19 Roger G. Barry y Richard J. Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 9ª. ed. (Oxon: Routledge, 2010), 44.

La latitud juega un rol importante sobre la radiación, porque la situación geográfica de un sitio determina la duración del día —y con esto la cantidad de radiación recibida diaria— y la incidencia de los rayos solares en este punto a lo largo del año.²⁰ La combinación de estos factores se traduce en la configuración de radiación solar recibida en el “tope” de la atmósfera para todo el globo, (figura 2.4); las regiones polares reciben máxima radiación durante los solsticios —por los periodos de días continuos—, mientras que el ecuador tiene dos máximos en los equinoccios y dos mínimos en los solsticios.²¹

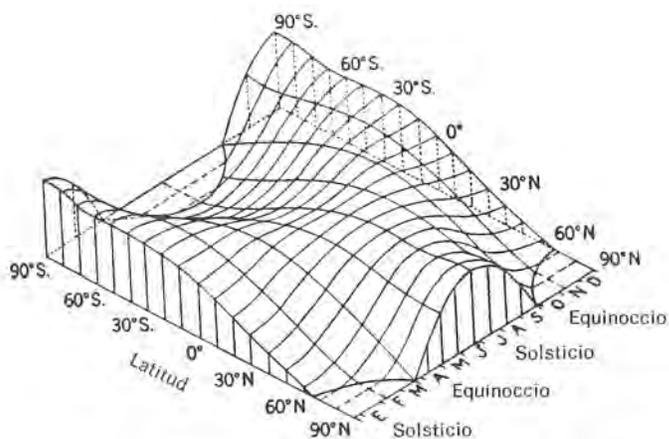


Figura 2.4: Variación de la radiación solar con la latitud y estación para todo el globo sin contemplar la atmósfera, retomada de Barry, *Atmósfera, tiempo y clima*, 31.

Tiempo solar verdadero y hora local

En este punto es importante describir unos conceptos y hacer referencia a la *longitud* (λ). Esta es un ángulo que forma la línea del meridiano del punto de interés —*meridiano del lugar o local*— con el *meridiano de referencia* llamado *meridiano de Greenwich*. Su rango varía de 0 a 180° Este —en el sentido rotatorio de la Tierra— y de 0 a -180° Oeste —en sentido contrario a la rotación de la Tierra.²² Se le conoce como *huso horario* a la división de la Tierra en 24 secciones de 15° grados cada una²³; en cuyo centro se encuentra el *meridiano oficial* (M_o) —15° al Este y Oeste del meridiano de referencia—. El meridiano oficial define la *hora local o del reloj*,

20 Barry y Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 50.

21 Barry y Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 46.

22 Riveros, “Notas de solarimetría”, 13.

23 Instituto de Astronomía, “Anuario del Observatorio Astronómico Nacional, AOAN” (México, DF: UNAM, 2010), 214.

en relación al meridiano de referencia.

Una fórmula para calcular el *tiempo solar verdadero*²⁴, en fracción de hora, a partir de la hora local es la siguiente²⁵:

$$T_{SV} = \left(H_{loc} + \frac{M_{loc}}{60} + \frac{S_{loc}}{3600} \right) + \left(\frac{M_0 - \lambda}{15} \right) + \left(\frac{\epsilon}{60} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

H_{loc} , Min_{loc} y Sec_{loc} = hora local

M_0 = meridiano oficial, en grados

λ = longitud del lugar, en grados

ϵ = ecuación del tiempo, en minutos

A diferencia de la fórmula descrita en la tesis de maestría, la aquí presentada detalla las unidades de cada variable.

Ángulos solares desde el punto de vista del observador

Para evaluar la radiación solar que incide sobre una superficie sobre la Tierra es necesario conocer ciertos ángulos. En el punto de interés sobre la Tierra, se sitúa un observador, el cual aprecia la trayectoria solar en la bóveda celeste, la cual es definida por una serie de ángulos. (Figura 2.5)

El *ángulo horario* (ω) se refiere al ángulo desde la posición del Sol medido sobre la trayectoria solar respecto al meridiano local; su rango varía de -180° a 0° para la posición del Sol antes del medio día y de 0° a 180° para la posición del Sol después del mediodía y se obtiene con la siguiente fórmula, en grados²⁶:

24 Definición del tiempo solar verdadero: Guadarrama Gándara, "Luz natural", 52.

25 Muhlia, "Notas para el curso de solarimetría", 37.

26 Riveros, "Notas de solarimetría", 15 y 16.

$$\omega_{-/+} = 15(T_{sv} - 12) \quad (2.5)$$

Donde:

T_{sv} = tiempo solar verdadero, en horas

El *ángulo cenital* (θ) se mide desde el cenit del observador hasta el centro del Sol, su rango varía de 0° en el cenit hasta 90° en el horizonte y se obtiene con la siguiente fórmula, en radianes²⁷ —la cual ya fue analizada en la tesis de maestría, en este caso se detallan las variables y sus unidades—:

$$\theta = \text{Cos}^{-1} \left(\text{Sen}(\phi) \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\phi) \text{Cos}(\delta) \text{Cos}(\omega) \right) \quad (2.6)$$

Donde:

ϕ = latitud, en radianes

δ = declinación solar, en radianes

ω = ángulo horario, en radianes

La *altura solar* (α) es un ángulo que se mide desde el horizonte hasta el centro del Sol, se obtiene al restarle a 90° el ángulo cenital o por la siguiente fórmula, en radianes²⁸ —la cual ya fue analizada en la tesis de maestría, en este caso se detallan las variables y sus unidades—:

$$\alpha = \text{Sen}^{-1} \left(\text{Cos}(\phi) \text{Cos}(\delta) \text{Cos}(\omega) + \text{Sen}(\phi) \text{Sen}(\delta) \right) \quad (2.7)$$

Donde:

ϕ = latitud, en radianes

δ = declinación solar, en radianes

ω = ángulo horario, en radianes

27 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 15.

28 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 15.

② capítulo

El *ángulo acimutal* (γ) se obtiene a partir de una línea que baja perpendicular desde el centro del Sol hasta el horizonte, por lo que la intersección de esta línea y el horizonte hasta el punto cardinal Sur geográfico darán como resultado el ángulo acimutal. Este es negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste y su rango varía de -180° hasta 180° y se obtiene con la siguiente fórmula, en grados²⁹:

$$\gamma = C_1 C_2 \gamma' + \frac{180 C_3 (1 - C_1 C_2)}{2} \quad (2.8)$$

Con el ángulo acimutal modificado, en radianes:

$$\gamma' = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{\text{Cos}(\delta) \text{Sen}(\omega)}{\text{Sen}(\theta_c)} \right) \quad (2.9)$$

Con C_1 , C_2 y C_3 , en grados:

$$C_1 = \frac{\omega_\omega - |\omega|}{|\omega_\omega - |\omega||}, \quad |\delta| < |\phi| ; \quad C_2 = \frac{\phi - \delta}{|\phi - \delta|} ; \quad C_3 = \frac{\omega}{|\omega|} \quad (2.10)$$
$$1, \quad |\delta| \geq |\phi|$$

Con el ángulo horario modificado, en radianes:

$$\omega_\omega = \text{Cos}^{-1} \left(\frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

ϕ = latitud, en radianes o grados según la ecuación

δ = declinación solar, en radianes o grados según la ecuación

ω = ángulo horario, en radianes o grados según la ecuación

ω_ω = ángulo horario modificado, en radianes o grados según la ecuación

θ = ángulo cenital, en radianes

29 Riveros, "Notas de solarimetría", 15 y16.

Como se mencionó anteriormente, depende en parte de la incidencia de los rayos solares — excluyendo la influencia de los procesos de extinción atmosféricos— la cantidad de radiación solar que recibe la superficie de la Tierra, dado que al aumentar la inclinación de los rayos, respecto de la perpendicular, disminuye la densidad de energía que incide sobre cierta superficie.

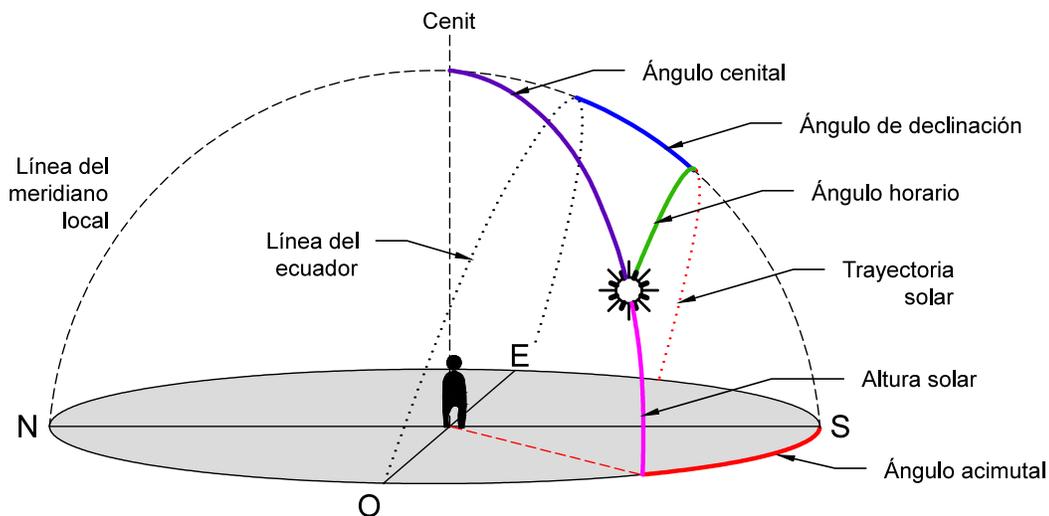


Figura 2.5: Ángulos solares desde el punto de vista del observador, basada en Riveros, “Notas de solarimetría”, 15.

Masa óptica

Con el fin de evaluar o calcular la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, a lo largo del día solar, es importante describir el concepto de *masa óptica*.

En teoría, la atmósfera homogénea o estándar es aquella donde la densidad del aire es constante.³⁰ A esta densidad constante multiplicada por la longitud del camino óptico —o distancia que deben atravesar los rayos solares desde el “tope” de la atmósfera hasta la superficie de la Tierra— se le conoce como masa óptica.³¹ Una unidad de masa óptica es la distancia que deben atravesar los rayos solares, desde el “tope” de la atmósfera hasta la superficie de

30 Riveros, “Notas de solarimetría”, 8.

31 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 97.

la Tierra a nivel del mar cuando el Sol se encuentra en el cenit.

La *masa óptica relativa* (m_r), representa la razón entre el cambio de intensidad a lo largo de cierto camino óptico, entre el cambio de intensidad a lo largo de la vertical, en dirección del cenit.³² Como se menciona en el párrafo anterior, si el Sol estuviera en el cenit, la masa óptica equivale a una unidad, mientras que en cualquier otra posición, el camino óptico que recorren los rayos solares es mayor, por lo que la masa óptica fuera de la vertical es mayor a la unidad.³³ (Figura 2.6)

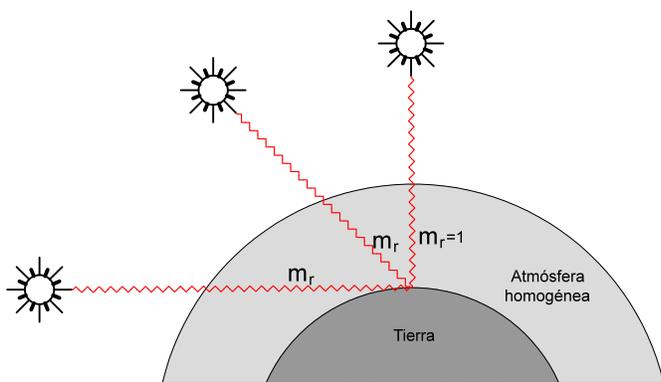


Figura 2.6: Atmósfera homogénea y masa óptica, basada en Riveros, “Notas de solarimetría”, 8.

Para calcular la masa óptica relativa de una atmósfera no homogénea se utiliza la siguiente ecuación, conocida como fórmula de Kasten, para presiones atmosféricas de 1,013.25 mbar, a nivel del mar³⁴:

$$m_r = \left[\cos(\theta) + 0.15 * (93.885 - \theta)^{-1.253} \right]^{-1} \quad (2.12)$$

Donde:

θ = ángulo cenital, en radianes

Para otras altitudes —si la diferencia entre la presión atmosférica estándar de 1013.25 miliba-

32 Riveros, “Notas de solarimetría”, 8.

33 Riveros, “Notas de solarimetría”, 8.

34 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 100; Fritz Kasten y Andrew T. Young, “Revised Optical Mass Tables and Approximation Formula”, *Applied Optics* 28, n.º 22 (1989): 4735-4738, 4735.

res (mbar) y la presión del sitio es más de 20 mbar— se debe corregir la masa óptica relativa. Por lo tanto, la corrección por presión se debe realizar para localidades por arriba de los 2,000 msnm³⁵, como en el caso de la Cuenca de México, según la siguiente fórmula³⁶:

$$m_a = m_r \left[\frac{\rho}{1013.25} \right] \quad (2.13)$$

Donde:

m_r = masa óptica relativa

ρ = presión atmosférica, en milibares

La *presión atmosférica* (p) puede ser medida o calculada por la siguiente fórmula, en milibares³⁷:

$$p = 1013.25 * \exp(-0.0001184 * h) \quad (2.14)$$

Donde:

h = altitud del sitio, en metros

Altitud

Si un lugar se encuentra a mayor altitud que la del nivel del mar, este presenta menor masa de aire por encima de él. Esto significa que a mayor altitud, menor masa óptica y por consiguiente, mayor será la radiación solar que recibirá este sitio en comparación con un sitio a nivel del mar, bajo una atmósfera limpia y seca.³⁸ Por lo tanto, es importante considerar la altitud del lugar de estudio para analizar la modificación cuantitativa que sufre la radiación solar desde el “tope” de la atmósfera hasta la superficie terrestre de este lugar.

35 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 100.

36 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 100.

37 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 100.

38 Barry y Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 60.

Perfil orográfico

El relieve del terreno también puede influir en la cantidad de radiación solar que recibe un sitio, debido a que las barreras montañosas pueden privar, durante cierto tiempo, de los rayos solares a ciertas regiones dentro de la cuenca o valle y sobre las laderas, dependiendo de la orientación de estas y de la latitud del sitio, principalmente. Este tema es de interés para esta investigación por la ubicación del sitio de estudio dentro de la Cuenca de México.

Los factores climáticos como la altitud y la orografía son factores que determinan la cantidad de radiación solar de un sitio. La Cuenca de México por su altitud recibe mayor cantidad de radiación solar que un sitio a nivel del mar, por lo antes mencionado. Por otro lado, respecto a la orografía, el día solar dentro de esta cuenca se acorta, ya que el alto perfil orográfico retrasa la salida y anticipa la puesta del Sol. Por lo tanto, es importante considerar estos factores para evaluar el recurso natural en este sitio.

2.3 PROCESOS DE EXTINCIÓN EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE: DISPERSIÓN, ABSORCIÓN Y REFLEXIÓN

Existen tres mecanismos de extinción de la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre, estos son dispersión, absorción y reflexión.³⁹ Según modelos teóricos, de 100 unidades de radiación solar que inciden en la atmósfera 34 (25, 7 y 2) son reflejadas por las nubes, el aire de la atmósfera y el suelo, respectivamente; 21 (2 y 19) son absorbidas por las nubes y el aire, respectivamente; 5 son dispersadas en la atmósfera; y el resto, 40 unidades, son absorbidas por el suelo⁴⁰ (figura 2.7). En la realidad, la atenuación de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, a partir de la recibida fuera de la atmósfera, dependerá de los factores astronómicos, geográficos y geométricos, así como de los efectos físicos, químicos y meteorológicos de la atmósfera local, los cuales son variables en el espacio y tiempo.

39 Tariq Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 2.^a ed. (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004), 237.

40 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 237; Leticia Gómez Mendoza, "Curso de meteorología", Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 2014-1.

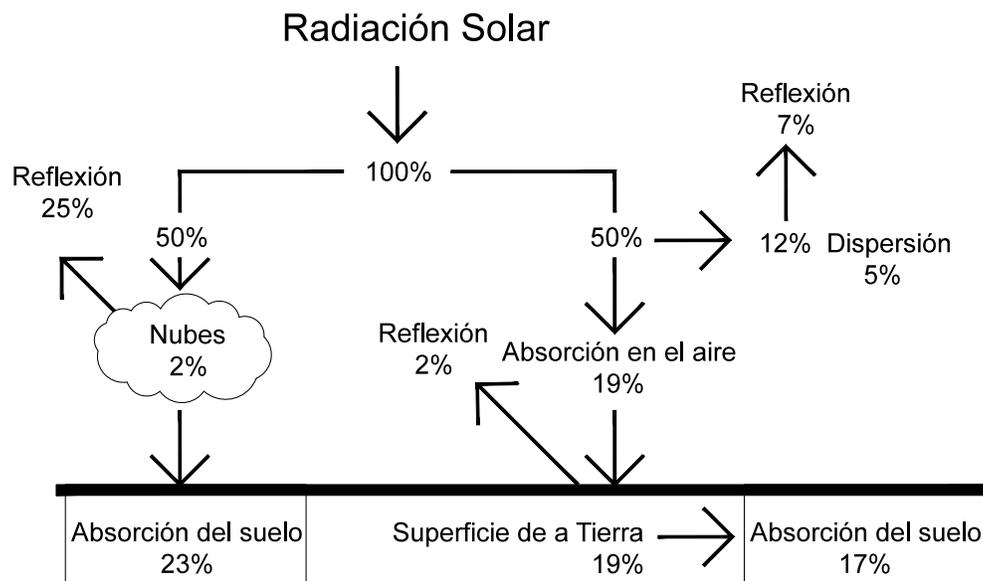


Figura 2.7: Balance radiativo, retomado de Gómez, “Curso de Meteorología”.

Dispersión

Parte de la atenuación de la radiación solar directa incidente se debe al mecanismo de dispersión, ya sea por moléculas de aire o partículas suspendidas en la atmósfera, también las gotas de agua y los cristales de hielo de las nubes, además de reflejar, dispersan la energía incidente.⁴¹ La dispersión de la radiación solar es una función continua de la longitud de onda de la energía incidente sobre el tamaño y forma de las moléculas de aire y de las partículas suspendidas en la atmósfera.

Cuando la radiación electromagnética golpea una partícula, una parte de la energía incidente es dispersada en todas direcciones, a esta energía dispersada se le conoce como radiación difusa. (Figura 2.9)

La teoría de Rayleigh explica la dispersión de la energía incidente en partículas esféricas de menor tamaño que la longitud de onda de esta misma energía.⁴² En general, esta teoría

41 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 237.

42 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 239.

se aplica cuando el radio de la partícula es menor o igual a 0.1λ (en micrómetros o 100 nm).⁴³ Esta condición se presenta, en general, en la dispersión de la radiación solar a través de las moléculas de aire en la atmósfera.⁴⁴ La teoría de Rayleigh también expone que la dispersión de la energía incidente con una longitud de onda que corresponde a la luz roja ($\lambda \sim 700$ nm) se dispersa menos que la perteneciente a la luz azul ($\lambda \sim 400$ nm), lo cual explica el color azul del cielo, presente principalmente cuando las moléculas del aire son responsables de la dispersión del rayo solar incidente,⁴⁵ es decir bajo una atmósfera limpia y relativamente seca.

La dispersión por el aire de la atmósfera ocurre principalmente del ultravioleta al infrarrojo cercano. Este efecto disminuye mientras incrementa la longitud de onda, así que es más intenso en el ultravioleta y en las longitudes de onda que corresponden al espectro azul que en el infrarrojo cercano.⁴⁶ (Figura 2.8)

La densidad de las moléculas de aire en un sitio está determinada por la presión barométrica de este.⁴⁷ A menor densidad molecular, menor dispersión y por ende menor atenuación de la radiación solar incidente. Por lo tanto, los puntos geográficos en altitudes mayores a la del nivel del mar presentan menor atenuación de la radiación solar por dispersión molecular. Tal es el caso de la cuenca que a menor dispersión menor atenuación de la radiación solar.

La dispersión molecular aumenta conforme incrementa la masa óptica. Es por esta razón que cuando el Sol se encuentra en el horizonte, existe mayor atenuación de la radiación solar, principalmente en el ultravioleta y visible que en el infrarrojo, provocando la apariencia roja del cielo. Conforme el Sol se dirige al cenit, al disminuir la masa óptica, la atenuación — por dispersión molecular— también disminuye.⁴⁸

Para la dispersión en partículas más grandes, que la longitud de onda de la energía incidente, se utiliza la teoría de Gustav Mie, llamada dispersión de Mie.⁴⁹ En general, esta teoría

43 Robinson, *Solar Radiation*, 59.

44 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 97.

45 Robinson, *Solar Radiation*, 54.

46 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 240.

47 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 240.

48 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 138.

49 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 239 y 240.

se aplica cuando el radio de la partícula es mayor a 0.1λ y menor a 25λ (en micrómetros o 25,000 nm).⁵⁰ Esta teoría explica la dispersión de la radiación solar a través de partículas suspendidas. En este caso, las longitudes de onda de todos los colores se dispersan ampliamente, al grado que el color del cielo es menos azul y eventualmente más blanco, en presencia de partículas de mayor tamaño, como sería el caso de una nube formada de gotas de agua o cristales de hielo⁵¹. El cielo también podría aparecer con tonos grisáceos, dependiendo de la profundidad óptica de estas nubes.⁵² Así mismo, entre más partículas contenga la atmósfera —líquidas o sólidas—, más blanquizco aparecerá el cielo⁵³, debido al mecanismo de dispersión de Mie que efectúan de la radiación solar incidente.

A las partículas líquidas o sólidas que se mantienen suspendidas en el aire y que siguen el movimiento de este con ciertas limitantes se le conocen como aerosoles.⁵⁴ Su procedencia puede ser de origen natural —sales marinas, polvo, partículas de arena, cenizas volcánicas, entre otros— así como de actividades humanas —contaminación, quema de biomasa voluntaria, entre otros—.⁵⁵ Las gotas de agua o cristales de hielo en las nubes, niebla o neblina se consideran en el límite de la definición de los aerosoles.⁵⁶ Los aerosoles aparecen en la atmósfera de forma ocasional y muestran gran diversidad en volumen, tamaño, distribución, forma y material del que están compuestos.⁵⁷ Generalmente, la presencia de aerosoles en la atmósfera, la vuelve turbia. La *turbiedad atmosférica* está definida como la razón de la atenuación de la radiación solar total —por aerosoles y moléculas— a su referencia de atenuación —sólo por moléculas—.⁵⁸ La extinción de la radiación solar por aerosoles es principalmente por dispersión, aunque dependiendo del material de composición de los aerosoles, estos pue-

50 Robinson, *Solar Radiation*, 59.

51 Robinson, *Solar Radiation*, 54.

52 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 241.

53 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 240.

54 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 95.

55 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 240.

56 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 95.

57 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 95.

58 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 97.

den presentar cierta absorción.⁵⁹ La dispersión de la radiación solar depende del tamaño de la partícula.

El vapor de agua tiene influencia en el número y tamaño de los aerosoles presentes en la atmósfera y por ende en sus características ópticas. Los aerosoles pueden funcionar como núcleos higroscópicos, en donde el vapor de agua se condensa en gotas de agua en la superficie de estos, aumentando su tamaño; así mismo, la coagulación de varias moléculas de vapor de agua crean partículas líquidas, aumentando el número de aerosoles presentes en la atmósfera.⁶⁰ La lluvia puede lavar la atmósfera de aerosoles, pero también aumenta el tamaño de los aerosoles remanentes en esta, por lo que después de una lluvia la atmósfera puede permanecer turbia.

La concentración y las características ópticas de los aerosoles son altamente variables en el espacio y tiempo, debido en parte a las condiciones meteorológicas del sitio. Los aerosoles se concentran principalmente cerca del suelo y una parte es transportada fácilmente a las alturas por viento, esta distribución depende del tamaño de las partículas.⁶¹ La atenuación por dispersión de aerosoles incrementa conforme aumenta la concentración de estos, así como la masa óptica.⁶² Dado que la concentración de aerosoles es muy variable en el espacio y tiempo es necesario medir continuamente la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra, para conocer la atenuación que sufre esta, debido a la extinción por los aerosoles presentes en la atmósfera del sitio.

59 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 100-102.

60 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 116.

61 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 99.

62 Robinson, *Solar Radiation*, 94.

Absorción

Otro mecanismo de extinción de la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre es la absorción. A diferencia de la dispersión —la cual depende continuamente de la longitud de onda— la absorción a través de los gases atmosféricos es un proceso selectivo en general.⁶³

Así como una parte de la energía de radiación electromagnética incidente en una partícula es dispersada, otra parte de esta energía es absorbida por la partícula. (Figura 2.9)

Los gases en la atmósfera absorben la radiación solar en ciertas regiones y en ciertas bandas del espectro y no de forma ecuánime a lo largo de todo el espectro solar.⁶⁴ Las regiones que se ven más afectadas por la absorción de gases son el ultravioleta y el infrarrojo.⁶⁵ En la región del ultravioleta, la formación del ozono estratosférico, absorbe la mayor parte de la energía solar incidente, mientras que el vapor de agua y el dióxido de carbono, absorben la radiación solar en la región del infrarrojo. La región del visible, no se ven tan afectada por la absorción de gases atmosféricos, a excepción de la influencia que tienen el vapor de agua, el ozono y el oxígeno en un gran rango del espectro solar, por lo que estos gases afectan esta región, absorbiendo la radiación solar incidente.⁶⁶ (Figura 2.8)

Según estudios, la absorción por medio de gases contaminantes —los cuales son consecuencia principalmente de las actividades humanas y conforman parte de la contaminación atmosférica del sitio— como óxidos de nitrógeno (NO, NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) es máxima alrededor de los 400 nm, extendiéndose en el ultravioleta y en el visible, donde el principal absorbente —en altas concentraciones— es el dióxido de nitrógeno (NO₂).⁶⁷ Este tema es importante, ya que este gas se inyecta constantemente a la atmósfera de la Cuenca de México, reduciendo la visibilidad en esta.

63 Robinson, *Solar Radiation*, 66; Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 245.

64 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 245.

65 Riveros, “Notas de solarimetría”, 9.

66 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 104.

67 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 265.

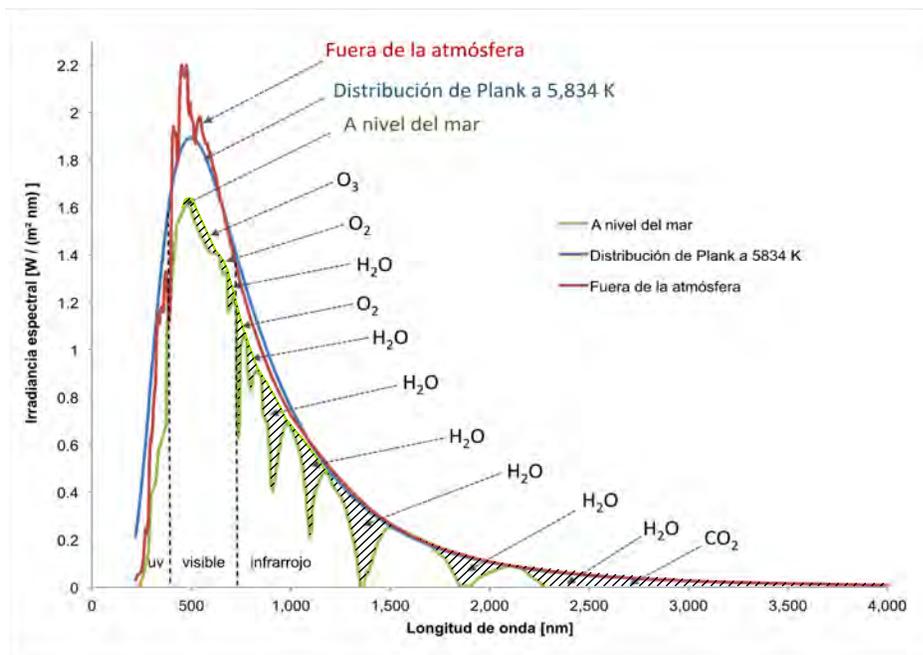


Figura 2.8: Dispersión (diferencia entre la radiación fuera de la atmósfera y a nivel del mar) y principales bandas de absorción (áreas sombreadas) por los componentes atmosféricos sobre la radiación solar, retomada de Riveros, “Notas de solarimetría”, 10 y Robinson, *Solar Radiation*, 81.

Reflexión

La reflexión es otro de los mecanismos de extinción de la radiación solar a su paso por la atmósfera. Cuando la energía de radiación electromagnética incidente en una partícula parte es dispersada, otra parte de esta energía es absorbida por la partícula y otra parte es reflejada. (Figura 2.9)

La mayor parte de la reflexión efectuada en la atmósfera la llevan a cabo las nubes, otra parte significativa se lleva a cabo por las moléculas de aire y las partículas suspendidas de la atmósfera, y otra parte por la superficie terrestre.

El término *albedo* es utilizado para expresar la porción de energía de radiación solar incidente que es reflejada, expresado como una fracción o porcentaje.⁶⁸ Para el albedo del Planeta Tierra —el cual integra el albedo de la superficie terrestre y el albedo de la atmósfera

⁶⁸ Barry y Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 49.

y de las nubes— se emplea la constante del 34.7% a nivel general.⁶⁹ (Tabla 2.2)

El albedo de las nubes depende principalmente del tamaño, espesor y composición de estas, lo cual determina en parte el tipo de nube. Entre más espesor presente una nube, mayor será su albedo. Este puede variar del 40% al 90% —para el caso de una nube ligera (*cirrus*) y una nube densa (*cumulonimbus*), respectivamente—. ⁷⁰ Este amplio rango de porcentajes del albedo de las nubes, es de las variables más significativas al cuantificar la radiación solar recibida en la superficie de la Tierra. Por este hecho, depende del tipo de nube, la extensión de la capa nubosa y la posición de las nubes en la bóveda celeste respecto al Sol, la cantidad de radiación solar y luz natural que recibirá el sitio geográfico. En general, se considera que la contribución del albedo de las nubes es de 23.3% del total planetario. (Tabla 2.2)

Para el albedo de la atmósfera, se considera la contribución por la dispersión de las moléculas del aire, por gotas de agua y por partículas suspendidas de mayor tamaño. En este caso se considera que la dispersión por moléculas del aire es simétrica —dispersión de Rayleigh—; por lo tanto, reflejan hacia arriba y dispersan hacia abajo la energía incidente en cantidades iguales.⁷¹ Mientras que la dispersión por partículas de mayor tamaño es asimétrica —dispersión de Mie—; por lo tanto, reflejan menor cantidad ($\frac{1}{4}$) y dispersan mayor cantidad ($\frac{3}{4}$) del total de la energía incidente.⁷² Se considera en general que el albedo de la atmósfera es de 9.1%. (Tabla 2.2)

El albedo de la superficie terrestre sufre un cambio constante, ya que depende de la energía incidente, del ángulo de incidencia de los rayos solares y de las características del material de la que está compuesta la superficie —vegetación, concreto, asfalto, nieve, entre otros—. Este puede variar del 20% al 80% —para el caso de una superficie vegetal o para el caso de una superficie con nieve, respectivamente—. ⁷³ En general, se considera un albedo de superficie terrestre de 2.3% (tabla 2.2). El albedo de la superficie es muy importante al considerar los flujos de energía que inciden sobre un plano vertical; un plano vertical libre de

69 Robinson, *Solar Radiation*, 215; Gómez, “Curso de meteorología”.

70 Robinson, *Solar Radiation*, 49.

71 Robinson, *Solar Radiation*, 214.

72 Robinson, *Solar Radiation*, 214.

73 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 288 y 289.

obstrucciones recibe energía de radiación de una parte de la bóveda celeste, en ocasiones de los rayos directos del Sol y energía reflejada del suelo. Por lo tanto, conocer el albedo de la superficie se vuelve muy importante para cuantificar los flujos de energía que recibe un plano vertical.

El albedo es una función de la longitud de onda de la energía incidente, por lo que la energía se reflejará en diferentes proporciones de acuerdo a las tres regiones del espectro de radiación solar: ultravioleta, visible e infrarrojo. (Tabla 2.2)

La reflexión por nubes y por la atmósfera es reflejada al espacio (figura 2.7), mientras que la reflexión de la radiación incidente en la superficie terrestre es reflejada a la atmósfera en forma de longitud de onda larga. Esta energía puede ser retenida por vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, metano entre otros gases presentes en la atmósfera, generando un efecto invernadero y elevando las temperaturas en la superficie de la Tierra.

Tabla 2.2 Composición espectral del albedo promedio en porcentajes.

	Ultravioleta	Visible	Infrarrojo	Total
Nubes	1.8	11.3	10.2	23.3
Atmósfera	2.6	5.2	1.3	9.1
Superficie terrestre	0.1	1.1	1.1	2.3
Valor total del albedo	4.5	17.6	12.6	34.7

Nota: La diferencia en los valores de la tabla 2.2 y de la figura 2.7, se debe a que el albedo de la atmósfera de la tabla toma en consideración las gotas de agua de la atmósfera como parte del albedo de la atmósfera, en vez de adjudicárselas al albedo de las nubes, es por esta razón la diferencia de 2 unidades, entre el valor de 23.3% y 9.1%, correspondientes al albedo de las nubes y de la atmósfera, respectivamente.

Retomada de Robinson, *Solar Radiation*, 215.

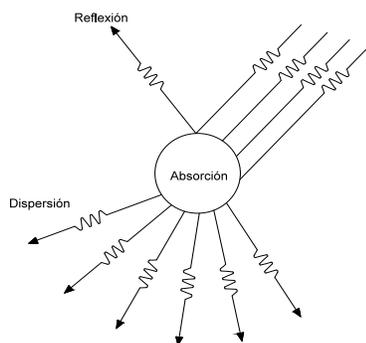


Figura 2.9: Absorción, dispersión y reflexión.

Por la variabilidad en el tiempo y espacio que presentan los diferentes componentes atmosféricos, es fundamental medir los flujos de energía de radiación que inciden sobre la superficie de la Tierra —en el mayor número de puntos geográficos posible— para analizar y evaluar la repercusión que tienen los procesos de extinción, a través de estos componentes, en la cantidad de la radiación solar recibida.

2.4 FACTORES Y ELEMENTOS CLIMÁTICOS QUE INFLUYEN EN LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN SUPERFICIE: HUMEDAD, NUBOSIDAD, PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y VIENTO

La radiación solar es un elemento más del clima y como todos los demás elementos sus variaciones están sujetas a otros factores y elementos climáticos, además de los factores astronómicos, geográficos y físicos ya mencionados.

Humedad

Uno de los elementos climáticos es la *humedad*. Se entiende por humedad a la cantidad de vapor de agua existente en la atmósfera en un tiempo y lugar determinado. El vapor de agua es uno de los absorbentes de la radiación solar incidente y reflejada más importantes en la atmósfera. Este absorbe principalmente en la región del infrarrojo, pero se vuelve activo al rebasar la longitud de onda de los 500 nm y presenta una banda de absorción importante a los 720 nm dentro de la región del visible. Por lo tanto, mientras más vapor de agua contenga la atmósfera en un tiempo y lugar determinado, mayor será la absorción y por ende la atenuación de la radiación solar a su paso por la atmósfera del sitio.

El vapor de agua también se presenta como un factor que repercute en la radiación solar al momento en que este tiene influencia en el número y tamaño de los aerosoles presentes en la atmósfera del lugar. Como ya se explicó anteriormente, la coagulación de moléculas de vapor de agua crea partículas líquidas aumentando el número de aerosoles, así mismo el va-

por de agua se condensa en gotas de agua en la superficie de los aerosoles, aumentando su tamaño. Por consiguiente, entre mayor sea el número y tamaño de los aerosoles contenidos en la atmósfera, mayor será la atenuación de la radiación solar, por el proceso de dispersión, principalmente en la región del visible.

Nubosidad

Las nubes, contribuyen en gran medida a la extinción de la radiación solar incidente en la Tierra. La radiación solar incidente es absorbida por vapor de agua y es dispersada y reflejada por las gotas de agua o cristales de hielo dentro de las nubes; la extinción de la radiación solar por nubes es un mecanismo complejo por la variedad de características ópticas de estas y su rápido cambio en el tiempo y espacio.⁷⁴ El caso más sencillo de predecir y modelar es una cubierta nubosa densa y homogénea, la cual oculta al Sol, y el caso más complejo es un cielo parcialmente nublado, con y sin la apariencia del Sol en la bóveda celeste.

Por lo tanto, la atenuación de la radiación solar por nubes depende, principalmente, del tipo de nube, la extensión de la capa nubosa y la posición de las nubes en la bóveda celeste respecto al Sol. Mientras más espesas sean las capas de las nubes, mayor absorción y reflexión, y por ende menor transmisión efectuarán sobre la radiación solar incidente.⁷⁵ Por lo tanto, nubes de tipo *cirrus* —conformada por cristales de hielo, ligeras y fibrosas— transmiten mayor radiación solar hacia la superficie terrestre, alrededor de 60%, en comparación con las tipo *cumulus* —conformada principalmente por gotas de agua, nube densa y abultada— o *nimbus* —nube de lluvia— que pueden presentar hasta 0.1% de transmisión.⁷⁶ Por ende, el tipo de nube, la extensión de la capa nubosa y la posición de las nubes en la bóveda celeste respecto al Sol, determinan la cantidad de radiación solar y luz natural que recibe un sitio geográfico.

74 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 244.

75 Barry y Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 49.

76 Barry y Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 49.

Presión atmosférica

La *presión atmosférica* se define como el peso de una columna de aire que se extiende desde un plano horizontal hasta el límite exterior de la atmósfera.⁷⁷ El aire es muy compresible, por lo que las capas inferiores están muy comprimidas y por ello son más densas.⁷⁸ Este sería el caso a nivel del mar, donde a mayor presión atmosférica y densidad del aire, mayor es la dispersión y la atenuación de la radiación solar incidente. En otro caso, a mayor altitud, la presión atmosférica y la densidad del aire disminuyen, por lo que la dispersión es menor y por ende mayor es la radiación solar incidente en la superficie terrestre de este sitio, este es el caso de la Cuenca de México.

Viento

El viento, aunque es un elemento del clima, en este caso se presenta como un factor, debido a que este levanta ciertos aerosoles y los arrastra de un sitio a otro. Este hecho repercute, ya que la concentración de aerosoles atenúa, por dispersión, la radiación solar incidente en el sitio. Así mismo, el viento puede acarrear humedad de un cuerpo de agua en la cercanía, incrementando el vapor de agua presente en la atmósfera del sitio, lo cual también atenuaría, por absorción, la radiación solar incidente en el sitio. Conocer la predominancia de los flujos de viento, la ubicación de las fuentes emisoras de aerosoles atmosféricos y las posibles barreras orográficas es importante para determinar la concentración de los aerosoles en el sitio de estudio y con base en esto, evaluar la cantidad de energía de radiación.

2.5 FLUJOS DE RADIACIÓN: DIRECTA, DIFUSA Y GLOBAL

La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se divide en tres principales flujos: directa, difusa y global. La *radiación directa* se refiere a los rayos provenientes del disco solar, que atraviesan la atmósfera terrestre; *la radiación difusa* es aquella que se forma por los

⁷⁷ Ayllón, *Elementos de meteorología y climatología*, 71.

⁷⁸ Barry y Chorley, *Atmósfera, tiempo y clima*, 23.

procesos de extinción de los rayos solares a su paso por la atmósfera y proviene de toda la bóveda celeste, a excepción del disco solar; y *la radiación global* es la suma de la radiación directa y difusa.

Directa

Al momento en el que los rayos solares entran en la atmósfera terrestre existe una interacción de estos con los diferentes componentes atmosféricos, lo que da lugar a los distintos procesos de extinción de la radiación solar, mencionados detalladamente en los incisos correspondientes en el inciso 2.3. El flujo de radiación directa sufre atenuaciones, desde el “tope” de la atmósfera hasta la superficie de la Tierra, debido a los procesos de extinción como absorción, dispersión y reflexión por una amplia gama de componentes atmosféricos; así como por la distancia y densidad del camino óptico que atraviesa para llegar a la superficie terrestre.

Difusa

Los procesos de extinción —absorción, dispersión y reflexión— distribuyen parte de la radiación directa del Sol a toda la bóveda celeste⁷⁹ y generan la radiación difusa. El proceso de dispersión por moléculas de aire y aerosoles es el principal contribuyente de la radiación difusa del cielo,⁸⁰ de estas últimas dos la dispersión por aerosoles es la fuente más importante de esta radiación por dos razones: 1. la dispersión por aerosoles es normalmente mayor que la dispersión por moléculas de aire, por lo que dispersan más fotones del rayo solar directo y 2. los aerosoles dispersan considerablemente más energía en dirección de la onda incidente —que es generalmente en dirección del suelo— en comparación con la dispersión por moléculas, en donde la propagación de la energía es en todas direcciones.⁸¹ Por lo tanto, una gran parte de la radiación difusa que llega a la superficie terrestre es dispersada principalmente por aerosoles y en menor medida por moléculas de aire. Naturalmente, mientras mayor sea la

79 Riveros, Valdés, Arancibia y Bonifaz, *La radiación solar*, 40.

80 Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 144.

81 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 266 y 267.

cantidad y el tamaño de los aerosoles presentes en la atmósfera del sitio, mayor será el flujo de radiación difusa del cielo.

La radiación difusa y directa que llega a la superficie de la Tierra después de su paso a través de la atmósfera, por primera vez, es en parte reflejada por el suelo de regreso a la atmósfera —albedo— y parte de esta es reflejada de nuevo a la superficie terrestre —por los componentes atmosféricos—; por lo tanto, un incremento en el albedo del suelo incrementará sustancialmente el flujo de radiación difusa.⁸²

La masa óptica también juega un rol importante en la cantidad del flujo de radiación difusa ya que, al incrementarse la masa óptica, la radiación difusa disminuye,⁸³ al igual que la radiación directa, debido a la atenuación que sufre la radiación solar a lo largo de su camino óptico.

Por lo tanto, los principales factores que modifican el flujo de radiación difusa son: la masa óptica, la cantidad y tamaño de los aerosoles presentes en la atmósfera —turbiedad atmosférica— y el albedo del suelo del sitio.

Global

A la suma de la radiación directa y difusa se le conoce como radiación global. Es importante tomar en cuenta que la radiación directa está afectada por el ángulo de incidencia, por lo tanto, para obtener la radiación global sobre una superficie horizontal, es necesario multiplicar la radiación directa —normal a los rayos solares— por el coseno del ángulo cenital.⁸⁴ Para calcular la radiación global (G_G) en W/m^2 se emplea la siguiente fórmula:

$$G_G = G_D + G_{DN} * \text{Cos}(\theta) \quad (2.15)$$

Donde:

G_D = irradiancia difusa, en W/m^2

⁸² Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 147 y 156.

⁸³ Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, 156.

⁸⁴ Riveros, "Notas de solarimetría", 24.

G_{DN} = irradiancia directa normal, en W/m^2

θ = ángulo cenital, en radianes

2.6 RADIOMETRÍA, FOTOMETRÍA Y SISTEMAS DE MEDICIÓN

Con el fin de evaluar el recurso lumínico de la “Plataforma de observación de luz natural” es preciso definir las unidades radiométricas y fotométricas que son importantes para esta investigación.

Unidades radiométricas

La radiación solar es energía electromagnética que se emite de manera isotrópica y continua desde la fotosfera solar a un ritmo de emisión que se mide a través de la unidad de *potencia* en Watts (W).⁸⁵ Esta se define como la razón a la cual la energía de radiación la emite o recibe un objeto por unida de tiempo.⁸⁶

A la potencia por unidad de área se le conoce como *densidad de flujo de energía de radiación* o *irradiancia*, esta se define como la razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área y comúnmente se representa con la letra G; las unidades de la irradiancia son Watt sobre metro cuadrado (W/m^2).⁸⁷

Radiometría y fotometría

El espectro visible, el cual comprende un rango de los 380 a los 780 nm de longitud de onda, representa alrededor de un 47% del total del espectro de radiación solar fuera de la atmósfera, como ya se mencionó en el inciso 2.1. Es necesario hacer una distinción entre la radiación total del espectro visible y la parte de radiación la cual es percibida por el ojo humano. A esta última se le conoce como *luz* y se define como energía radiante que es capaz de estimular a la retina y producir la sensación de visión.

85 Riveros, “Notas de solarimetría”, 22.

86 Muhlia, “Notas para el curso de solarimetría”, 8.

87 Muhlia, “Notas para el curso de solarimetría”, 8; Riveros, “Notas de solarimetría”, 22.

La liga entre la radiometría —la cual se refiere a la medición de cantidades asociadas con la energía radiante y la potencia— y la fotometría —la cual se refiere a la medición de cantidades asociadas con la energía radiante del espectro visible en términos de la respuesta visual humana— depende principalmente de la sensibilidad espectral del ojo humano, la cual fue estandarizada por la CIE desde 1924 y modificada en 1990.⁸⁸ Esto significa, que las cantidades radiométricas no son directamente convertibles en cantidades fotométricas, para este proceso es necesario tomar en cuenta la sensibilidad espectral del ojo humano, la cual varía con la longitud de onda.⁸⁹ La sensibilidad es máxima con luz amarilla a 555 nm y disminuye en ambos sentidos hacia los 380 y 780 nm.⁹⁰ (figura 2.10). Los sensores fotométricos toman esta sensibilidad para realizar mediciones lumínicas de la radiación solar incidente.

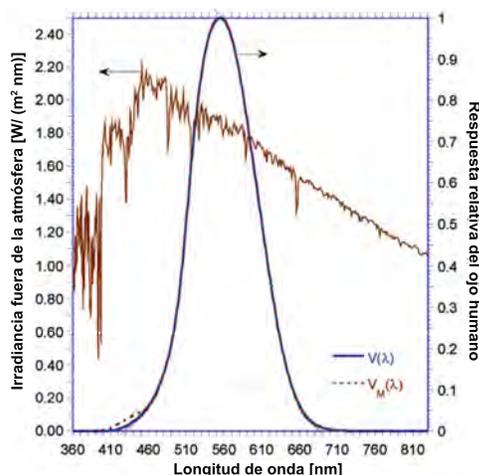


Figura 2.10: Espectro visible de radiación solar fuera de la atmósfera comparada con la curva de sensibilidad espectral del ojo humano $V(\lambda)$ de la CIE, retomada de Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 53.

Desde 1979 la candela ha sido utilizada en el “Sistema internacional de unidades”, SI, como la unidad base de la fotometría, ligando a esta última y la radiometría.⁹¹ La candela es la unidad de la intensidad luminosa y equivale a la intensidad radiante de una fuente monocromática

88 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 50.

89 Steven V., Szokolay, *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*, 2ª. ed. (Oxford: Architectural Press, 2008), 143.

90 Szokolay, *Introduction to Architectural Science*, 143.

91 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 48.

de 1/683 W/sr a una longitud de onda de 555 nm.⁹² Los estándares actuales asumen que el platino emanando una frecuencia de 540×10^{12} Hz, corresponde a una longitud de onda aproximadamente de 555 nm con un flujo radiante espectral de 1/683 W/sr o 1.46×10^{-3} W/sr, correspondiente a una máxima eficacia luminosa de 683 lm/W para 555 nm.⁹³ Esta es la base de todo el sistema fotométrico. La interdependencia de las unidades luminosas y radiantes se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$E = 683 \int_{\lambda=380}^{780} G_{\lambda} V(\lambda) d(\lambda) \quad (2.16)$$

Donde:

E = iluminancia, en lux

683 lm/W = máxima eficacia luminosa a 555 nm

G_{λ} = irradiancia espectral a cierta longitud de onda, en W/m²

$V(\lambda)$ = sensibilidad espectral del ser humano a cierta longitud de onda

Esta fórmula depende principalmente de la sensibilidad espectral del ser humano y de los radiadores del cuerpo negro de Planck a extremas altas temperaturas.⁹⁴

Unidades fotométricas

El sistema luminoso más sencillo consiste en una fuente de luz, una superficie iluminada y un ojo que percibe la luz, tanto de la fuente como la reflejada por la superficie, las cuatro cantidades fotométricas medibles son *flujo luminoso* (Φ), *intensidad luminosa* (I_L), *iluminancia* (E) y *luminancia* (L). (Figura 2.11)

92 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 47.

93 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 48.

94 Kittler, Kocifaj y Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology*, 48.

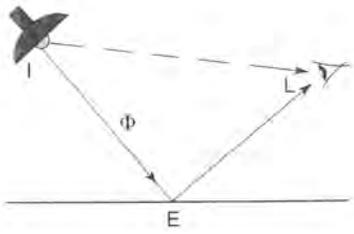


Figura 2.11: Sistema luminoso básico, retomado de Szokolay, *Introduction to Architectural Science*, 142.

El flujo luminoso (Φ) es el flujo radiante por unidad de tiempo, evaluado en términos de la respuesta visual estandarizada.⁹⁵ Su unidad de medición es el *lumen* (lm).⁹⁶

La intensidad luminosa (I) se refiere al flujo luminoso por unidad de ángulo sólido en cierta dirección.⁹⁷ Se mide en candela (cd).⁹⁸

La iluminancia (E) se define como el flujo luminoso por unidad de área, la unidad de medición es el *lux* (lx), el cual se refiere a la iluminancia producida por 1 lm incidente en 1 m² de área.⁹⁹

Mientras que la luminancia (L) es la intensidad luminosa radiada de una fuente o reflejada o transmitida por una superficie en dirección del observador, dividida por el área de la fuente o superficie vista por el observador y se mide en cd/m².¹⁰⁰

Las cantidades radiométricas y fotométricas que son equiparables son la potencia (W) y el flujo luminoso (lm), así como la irradiancia (W/m²) y la iluminancia (lx), las primeras se refieren a unidades de energía, mientras que las segundas a cantidades lumínicas.¹⁰¹

95 Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), *The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application*, 9a ed., (Nueva York: IESNA, 2000), G22.

96 Szokolay, *Introduction to Architectural Science*, 143.

97 IESNA, *The IESNA Lighting Handbook*, G22.

98 IESNA, *The IESNA Lighting Handbook*, G6; Szokolay, *Introduction to Architectural Science*, 142.

99 Szokolay, *Introduction to Architectural Science*, 143.

100 Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), *Lighting Metrics*, (Nueva York: IESNA, 2001), 4.

101 Szokolay, *Introduction to Architectural Science*, 143.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

3.1.1 La Cuenca de México: ubicación, orografía, división política, descripción del clima y contaminación atmosférica

Ubicación

La Cuenca de México se ubica en la parte Sur de la Altiplanicie mexicana, con una elevación de más de 2,000 metros sobre el nivel del mar. Es una cuenca cerrada atmosféricamente ya que está rodeada por elevadas montañas —pertenecientes a la Sierra Volcánica Transversal— y se extiende sobre una superficie de 9,560 km².¹ Por su posición latitudinal, de los 19° a los 20° grados aproximadamente, esta cuenca se encuentra dentro de la zona intertropical del Hemisferio Norte.

Orografía

Respecto a las elevaciones orográficas², la Cuenca de México está delimitada al noroeste por las sierras de Montebajo con los cerros Alcaparrosa y Peña Blanca; y Tepetzotlán con los cerros Sinconque y Xalpan. Al norte por las sierras de Tezontlalpan y Pachuca. Al Este por los

1 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe climatológico ambiental 2001: Cuenca del Valle de México*, (México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2001), 10.

2 Enriqueta García, *Los climas del Valle de México* (Chapingo: Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, 1968), 2-3, 27; Gustavo Garza, coord., *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio* (México: El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano: Gobierno del Distrito Federal, 2000), 42.

cerros de Tepozán y Peñón de la Rosa. Al sureste por las sierras de Río Frío y Nevada con elevaciones de más de 5,000 metros, correspondientes a la cúspide del Iztaccíhuatl y más al Sur, la cúspide del Popocatepetl. Al Sur y suroeste por las sierras del Ajusco, Las Cruces y Monte Alto. (Figura 3.1)

Por la fisiografía de la cuenca, esta se divide en subregiones.³ La Región de Xochimilco y Chalco —al Sur de la cuenca— está separada por la Sierra de Santa Catarina, el cerro de la Estrella y del Pino, de la parte central, correspondiente a la Región de Texcoco y México. La Sierra de Guadalupe y los cerros de Chiconautla y Patlachique separan la parte central de la Región de Zumpango y Xaltocan, al Norte, mientras que la parte de los Llanos de Apan ocupa el noreste de la cuenca. (Figura 3.1)

División política

Dentro de sus 9,560 km², la cuenca abarca parte de la Ciudad de México, de los estados de México, de Hidalgo y de Tlaxcala. Al mismo tiempo, alberga el Área Metropolitana de la Ciudad de México, AMCD, la cual se extiende en parte de la Ciudad de México y parte del Estado de México. (Figura 3.1)

Descripción del clima

El clima de la Cuenca de México está determinado principalmente por la situación geográfica, altitud sobre el nivel del mar, orografía y circulación atmosférica regional y en menor grado de la cuenca.

A pesar de que la cuenca se encuentra en latitudes intertropicales, su altitud de más de 2,000 msnm causa que su clima sea templado.⁴ La circulación atmosférica intertropical ocasiona la temporada de lluvias-estival⁵ y secas-invernal a lo largo del año, los detalles de la circulación atmosférica intertropical se encuentran en las siguientes publicaciones: “Los climas

3 García, *Climas del Valle de México*, 3.

4 García, *Climas del Valle de México*, 12 y 17-18.

5 Ernesto Jáuregui Ostos, *El clima de la Ciudad de México* (México DF: UNAM, Instituto de Geografía, 2000), 31.

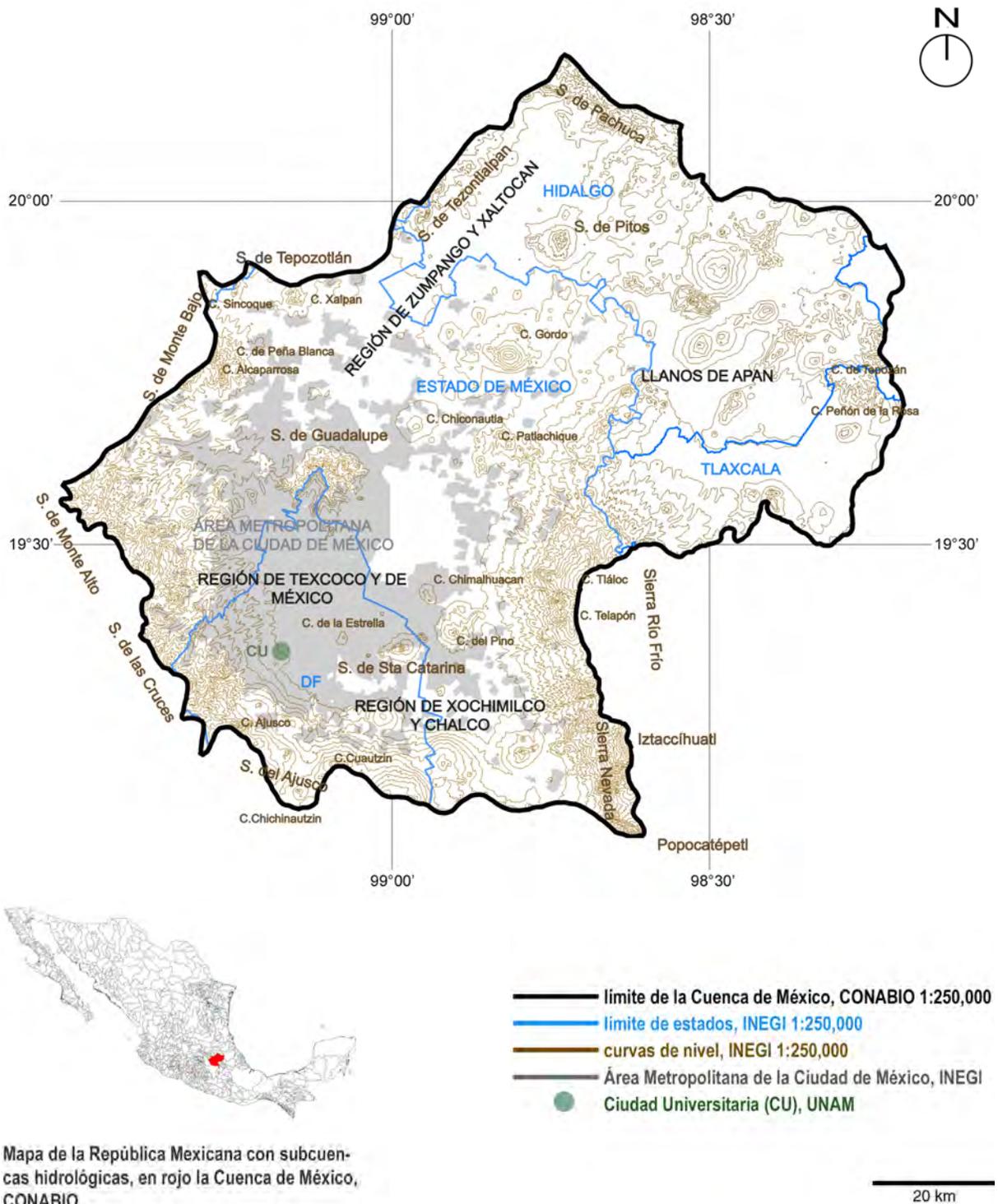


Figura 3.1: Mapa de la Cuenca de México

del Valle de México” de la página tres a la cinco y “Apuntes de climatología” de la página 44 a la 54 de Enriqueta García.

Los sistemas meteorológicos regionales predominantes, definen dos temporadas climáticas en la cuenca, la temporada de “lluvias” que abarca los meses de junio a octubre y la temporada de “secas” de noviembre a mayo. Esta última puede ser sub-dividida en dos, la seca-caliente de marzo a mayo y la seca-fría de noviembre a febrero. La temporada de secas se caracteriza por cielos despejados y por ende alta insolación, mientras que la de lluvias se caracteriza por alta nubosidad y precipitaciones.

Temperatura. Según un estudio climatológico del investigador Jáuregui, la temperatura media anual en la planicie y en el pie monte de la cuenca es de 15 a 16°C.⁶ El estudio fue realizado con 30 años de datos, de 1951 a 1980, proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional, SMN. Posteriormente, de acuerdo a un estudio del cambio climático en la Ciudad de México de Ruíz Hernández, la temperatura media anual de la década de 1981 a 1990 fue de 18°C, lo que indica un incremento de la temperatura de 2°C en promedio.⁷

Precipitación. En los meses de mayo a octubre se presentan los porcentajes más altos de lluvias, estos varían del 80 al 94% de la precipitación total anual, dejando un porcentaje muy bajo del 5% a las lluvias invernales, de noviembre a abril.⁸ Las causas de las lluvias estivales son principalmente los vientos alisios húmedos provenientes del Golfo de México y los movimientos convectivos dentro de la cuenca. También los ciclones tropicales a finales del verano y principios del otoño pueden producir fuertes precipitaciones en la región. Durante la temporada de secas en el invierno, los vórtices fríos y las depresiones ciclónicas pueden presentar algunas lluvias, también existen precipitaciones de tipo frontal, con duración de dos a tres días, por los llamados nortes del Golfo de México.⁹

6 Jáuregui, *Clima de la Ciudad de México*, 35.

7 José Antonio Ruíz Hernández, “Cambios climáticos en la Ciudad de México” (tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 1994), 95.

8 García, *Climas del Valle de México*, 11.

9 García, *Climas del Valle de México*, 3-5; Enriqueta García, *Apuntes de climatología*, 1.ª ed. 1967

El investigador Jáuregui, en su libro “Clima de la Ciudad de México”, menciona que los aguaceros intensos en el poniente de la cuenca durante la temporada de lluvias han aumentado su frecuencia a través de las décadas.¹⁰ Esto nos concierne, debido a la ubicación de nuestro sitio de medición, el sur-poniente de la Cuenca de México. Más días lluviosos significa más nubosidad por ende más atenuación de la iluminancia e irradiancia del sitio lo cual evaluaremos en este trabajo.

Vientos. Dentro de los elementos del clima, la temperatura y la precipitación se comportan como factores determinantes para el análisis climatológico. En tanto, otros elementos como el viento son importantes, debido a la influencia que tienen en la temperatura y en la precipitación, así como en la concentración de contaminantes en un sitio.

El movimiento de los vientos en la cuenca se rige por el contraste térmico entre la planicie y las laderas; por el día los vientos van de la planicie a las laderas y por la noche de las laderas al centro de la planicie.¹¹ “La interacción de los vientos locales (de valle y de montaña) con los vientos regionales, determinan la dirección y fuerza de los vientos”¹² de la cuenca.

En el año 2000, Jáuregui realizó un estudio del viento superficial —alrededor de 20 metros sobre la superficie— en dos meses representativos de la temporada de secas (enero) y de la temporada de lluvias (junio) del año 1997, con datos de 16 estaciones de la red anemométrica, distribuidas en la Ciudad de México, para conocer los flujos de aire dentro de la ciudad.¹³ Se determina que, en el periodo de secas, los vientos son de débil intensidad y pueden soplar tanto del Norte, como del Este, Sur y noreste, los vientos de la tarde tienen en general una dirección que va de la planicie a las montañas y los vientos de la noche bajan de las montañas del poniente, Sur y menos del oriente —por la lejanía— a la planicie. En un mes de la temporada de lluvias, los vientos de la tarde provienen claramente del Norte o noreste. Los vientos nocturnos, en esta temporada, bajan de las montañas rumbo al centro de la cuenca.

(México, DF: UNAM, 2014), 44-54.

10 Jáuregui, *Clima de la Ciudad de México*, 31-33, 44, 46.

11 Jáuregui, *Clima de la Ciudad de México*, 51.

12 Jáuregui, *Clima de la Ciudad de México*, 52.

13 Jáuregui, *Clima de la Ciudad de México*, 51-64.

El Informe Climatológico Ambiental del 2001 de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, presenta un análisis del flujo de los vientos de superficie de la AMCM, a través de mapas que representan los valores promedio vectoriales anuales para cada una de las 24 horas del día y para cada una de las estaciones de la red meteorológica.¹⁴ El resumen de este análisis indica que los flujos de viento en general convergen en el Sur poniente de la AMCM —este hecho es más marcado por las mañanas y por las noches que por las tardes, donde convergen también en el centro de la AMCM— y provienen principalmente del noreste de la cuenca.¹⁵ La convergencia de los vientos, principalmente en el sur-poniente de la cuenca, ocasiona la concentración de contaminantes de la cuenca en esta zona.

Nubosidad. Los fenómenos meteorológicos como las nubes se presentan en la primera capa de la atmósfera, la tropósfera, debido a que en esta capa se encuentra la mayor densidad del aire y se concentra casi todo el vapor de agua de la atmósfera. Por convención y por la frecuencia con la que aparecen los tipos de nubes, esta primera capa de la atmósfera se divide en tres niveles principales: alto, medio y bajo; y la frecuencia con la que aparecen los tipos de nubes es la siguiente¹⁶ (tabla 3.1):

Tabla 3.1 Niveles y frecuencia con la que aparecen los tipos de nubes.

Niveles	Tipos	Tipos	Tipos	Tipos
Alto	<i>cirrus</i> (Ci)	<i>cirrocumulus</i> (Cc)	<i>cirrostratus</i> (Cs)	
Medio-alto	<i>altostratus</i> (As)			
Medio	<i>altocumulus</i> (Ac)			
Bajo	<i>stratocumulus</i> (Sc)	<i>stratus</i> (St)	<i>cumulus</i> (Cu) *	<i>cumulonimbus</i> (Cb) *
Medio, alto y bajo	<i>nimbostratus</i> (Ns)			

* Pero su extensión vertical alcanza niveles medios y altos
Retomada de OMM, *Atlas Internacional de Nubes*, 215.

14 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe climatológico ambiental 2001*, 18, 30.

15 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe climatológico ambiental 2001*, 18.

16 OMM, *Atlas Internacional de Nubes*, volumen I (Ginebra: OMM-No.407, 1993), 15.

En la Cuenca de México, en la temporada de secas-invernal, se observan nubes altas de tipo *cirrus*, *cirrocumulus* y *cirrostratus*¹⁷, por las características y los movimientos de las masa regionales y locales. Mientras que en la temporada de lluvias-estival, se presentan principalmente nubes de desarrollo vertical,¹⁸ como *nimbostratus* y *cumulonimbus*, las cuales provocan las intensas lluvias de esta temporada, acompañadas en ocasiones de granizo. Las bajas y medias se presentan a lo largo de todo el año.

Contaminación atmosférica

La Cuenca de México se encuentra cerrada atmosféricamente, debido a las elevaciones orográficas que la limitan, principalmente al sur-poniente. Los vientos predominantes del norte y las elevaciones ubicadas al sur-poniente de la cuenca, provocan que los contaminantes generados en la cuenca —naturales y antropogénicos— emitidos a la atmósfera, se acumulen y estanquen dentro de esta.

La Cuenca de México es la más poblada de toda la República Mexicana, concentrando casi el 19% de la población nacional, lo que equivale a 19,609,728 habitantes.¹⁹ Aunado a la sobrepoblación, a los requerimientos de esta y a las actividades que se realizan en la cuenca, se suman los millones de automotores, públicos y privados, que a diario circulan por la zona.

El inventario de emisiones del Informe de la Calidad del Aire de 2013 de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, SEDEMA, menciona que el AMCM emitió aproximadamente 2.9 millones de toneladas de contaminantes en 2012, de los cuales el 68% fueron por emisiones de vehículos automotores; el 25% por actividades comerciales, de servicio y los hogares; y el 6% por las grandes industrias y termoeléctricas.²⁰

17 Leticia Gómez Mendoza, “Curso de meteorología”, Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 2014-1.

18 Guillermo Montero-Martínez, Víctor Zarraluqui-Such, E.S. Caetano Neto y Fernando García-García, “Hydrometeor Vertical Characterization of Precipitating Clouds Over the Mexico Basin”, *International Journal of Remote Sensing* 32, n.o 21 (2011): 6367–6378.

19 Helena Cotler Ávalos, ed., *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización* (México, DF: Pluralia Ediciones e Impresiones SA de CV, 2010), 61, con censo de población de 2005.

20 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2013: Capítulo 1: Calidad del aire y cambio climático* (México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013), 14.

Los contaminantes que son inyectados continuamente a la atmósfera de la cuenca por las emisiones antes mencionadas son el dióxido de azufre, SO_2 ; dióxido de nitrógeno, NO_2 ; monóxido de carbono, CO ; y partículas suspendidas. El ozono, O_3 se conoce como contaminante secundario, ya que se forma por reacciones fotoquímicas de los óxidos de nitrógeno, NO_x , e hidrocarburos en presencia de la radiación solar incidente.

Las partículas suspendidas, PS, son una mezcla de diversos compuestos con forma, tamaño, composición y propiedades diferentes, que pueden ser emitidas directamente por procesos de combustión, actividades de construcción, molienda o triturado, también de la explotación de bancos de materiales, incendios o el polvo arrastrado por el viento.²¹ Sin embargo, algunas partículas pueden modificarse en la atmósfera de la transformación de otros contaminantes gaseosos emitidos por la industria, los vehículos o actividades domésticas.²² El concepto de las partículas suspendidas totales, PST, se refiere a todo aquel material sólido o líquido en suspensión con un diámetro menor a 50 micrómetros, aproximadamente, un gran porcentaje de estas partículas se sedimentan fácilmente después de ser emitidas al aire ambiente y permanecen poco tiempo en suspensión.²³ Dentro de esta fracción se encuentran las partículas menores a 10 micrómetros y las partículas menores a 2.5 micrómetros.

Las partículas menores a 10 micrómetros, PM_{10} , provienen principalmente del suelo erosionado, de las obras de construcción sin control de partículas y de las emisiones de vehículos a diesel.²⁴

A las partículas menores a 2.5 micrómetros, $\text{PM}_{2.5}$, se les conoce también como partículas finas, estas provienen principalmente de los gases emitidos por fuentes contaminantes.²⁵ Este contaminante tiene una gran contribución al deterioro de la calidad del aire en el AMCM.²⁶

21 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2013*, 15.

22 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2010: Calidad del aire en la Ciudad de México* (México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2010), 15.

23 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2010*, 15.

24 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2010*, 33.

25 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2010*, 17.

26 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011: Calidad del aire en la Ciudad de México: 25 años de monitoreo atmosférico* (México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012), 20.

De todos los contaminantes antes descritos, el ozono —por ende, sus precursores, cuya principal fuente son los vehículos y las industrias en el AMCM— y las partículas finas, son los principales responsables de la contaminación atmosférica de la Cuenca de México.²⁷⁻

La concentración de los contaminantes en la cuenca está determinada por los sistemas meteorológicos regionales, la estabilidad o inestabilidad de la atmósfera, la nubosidad, el flujo de los vientos de superficie y la ubicación de las fuentes de emisiones. De tal forma que esta concentración de contaminantes registra variaciones temporales y espaciales, continuas e instantáneas.

Distribución temporal. Las condiciones de la atmósfera —tanto climáticas como meteorológicas— y la actividad vehicular e industrial diaria de la Cuenca de México determinan la concentración temporal de los contaminantes dentro de esta.

Los contaminantes en el AMCM presentan un comportamiento temporal típico: mayores concentraciones en la temporada de secas y menores durante la de lluvias.

Esto se debe a que en la temporada de secas, se presentan la mayoría de las inversiones de temperatura, provocando condiciones de estabilidad atmosférica, lo cual impide la dilución y dispersión de los contaminantes en la atmósfera, lo que genera altas concentraciones de contaminantes.²⁸ En la temporada seca-fría, las largas noches, bajo cielos despejados, propician las inversiones térmicas de superficie, atrapando los contaminantes primarios dentro del área, en las primeras horas del día.²⁹ En la temporada seca-caliente, los días largos, la elevada insolación —debido los cielos despejados—, el viento débil en superficie y las inversiones térmicas de altura, provocan condiciones de estabilidad atmosférica en la superficie³⁰, impidiendo la dispersión de los contaminantes. Este hecho en conjunto con la alta insolación favorece la formación de contaminantes secundarios como el ozono, el cual en este periodo,

27 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 18.

28 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 29.

29 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 29.

30 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 29.

presenta las concentraciones más elevadas.³¹

En la temporada de lluvias, con una atmósfera inestable, la dilución y dispersión de los contaminantes dentro de la cuenca se ve favorecida.³² La precipitación en este periodo actúa como un mecanismo de limpieza de la atmósfera.

Las concentraciones de contaminantes también tienen variaciones durante el día. De tal forma, que en las mañanas se presentan más concentraciones de contaminantes primarios que por la tarde, debido a que por las tardes la atmósfera generalmente es más inestable³³, permitiendo una mayor dispersión de los contaminantes en el área. En el caso del ozono, este presenta concentraciones más elevadas después del mediodía y por la tarde³⁴, por la alta insolación y la concentración de contaminantes primarios.

Distribución espacial. Las elevaciones orográficas de la cuenca, los flujos de viento y la ubicación de las fuentes de emisiones de gases y partículas, son determinantes en la distribución de la concentración de los contaminantes dentro del AMCM.

La mayor cantidad de emisiones industriales y vehiculares se generan en el Norte y centro del AMCM, durante las primeras horas del día, concentrándose en esta región la mayor parte de los contaminantes primarios.³⁵

Los vientos predominantes de la cuenca, del noreste al suroeste, durante la mayor parte del día, favorecen el arrastre de los contaminantes primarios viento abajo. Esta masa de aire contaminado se desplaza hacia el Sur; durante el desplazamiento, la radiación solar actúa sobre estos gases, formando los contaminantes secundarios, como el ozono.³⁶ Los bordes orográficos al Sur y Poniente de la cuenca limitan la dispersión y favorecen la acumulación de este contaminante durante varias horas, lo que genera altas concentraciones de ozono en la

31 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 29.

32 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 29.

33 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 27.

34 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 9.

35 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2010*, 32.

36 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 30.

región sur-poniente de la cuenca. Las delegaciones Coyoacán y Tlalpan dentro de la Ciudad de México, son las más afectadas.³⁷

Como se ha mencionado a lo largo de este inciso, las condiciones de la cuenca son determinantes para la concentración de contaminantes atmosféricos dentro de esta. Aunado a lo ya comentado, es importante indicar que debido a la elevación de la cuenca sobre el nivel del mar —más de 2,000 msnm—, los procesos de combustión son menos eficientes y por lo tanto más contaminantes, además de recibir una alta insolación, lo que favorece la formación de contaminantes secundarios,³⁸ como el ozono. Este contaminante sigue presentando año con año altas concentraciones, a pesar de las medidas que se han llevado a cabo para la disminución de precursores de este gas. Por este hecho y porque el sitio de medición, de esta investigación, se encuentra en la zona sur-poniente de la cuenca —la cual presenta las concentraciones más altas de ozono— es que es necesario medir los flujos de radiación y considerar las implicaciones que tiene este gas contaminante en los niveles de iluminancia e irradiancia del sitio.

3.1.2 Ciudad Universitaria: ubicación y extensión, características del microclima, climograma y tipo de clima

Ubicación y extensión

La Ciudad Universitaria ,cu, de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, se localiza al suroeste de la Cuenca de México, en una zona cubierta de lava, a la cual se denomina, “Pedregal de San Ángel”.³⁹

En un inicio, en 1946, la universidad recibió 733 hectáreas, ha, de terreno para la construcción de la Ciudad Universitaria. De estas, se pensaba utilizar 200 ha —las más al Norte— y dejar el resto como área de expansión y protección ecológica.⁴⁰

37 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2011*, 33.

38 Secretaría del Medio Ambiente, *Informe 2010*, 11.

39 Mario Pani y Enrique del Moral, *La construcción de la Ciudad Universitaria del Pedregal: Concepto, programa y planeación arquitectónica*, Vol. XII (México: UNAM, 1979), 57.

40 Fundación UNAM, *Ciudad Universitaria: Crisol del México moderno* (México: Fundación UNAM, 2010), 91.

En la actualidad, el campus comprende una superficie total de 718 ha de las cuales 127 son de área construida —cubierta—, 90 son estacionamientos y vialidades, 198 son áreas verdes y 237 pertenecen a la Reserva Ecológica del “Pedregal de San Ángel”.⁴¹ La Ciudad Universitaria sigue conservando, dentro de sus terrenos, grandes áreas de espacios abiertos. (Figura 3.2)

Microclima

Para establecer las características y el tipo de clima se tomaron 49 años de datos, de 1963 a 2012, elaborados por el “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía” ubicado en los campos deportivos de Ciudad Universitaria (19°11’50”N, 99°11’03”W y 2,278 msnm⁴²). Mientras que la plataforma de observación se ubica en el “Observatorio de radiación solar”, ORS, del Instituto de Geofísica ubicado sobre el circuito “Investigación Científica” de Ciudad Universitaria (19°19’33.80”N, 99°10’33.59”W y 2,279 msnm). La distancia entre el ORS y el “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía” es de 1 kilómetro, aproximadamente. (Figura 3.2)

Temperatura. Según los datos proporcionados por el “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía”, la temperatura media anual en este sitio es de 15.8°C. La temperatura media mensual más elevada la presenta mayo con 18.4°C y la más baja enero con 12.4°C. (Tabla 3.2)

Tabla 3.2 Temperatura media mensual y anual

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media anual
12.4	14.1	16.3	17.7	18.4	18.0	16.7	16.9	16.6	15.7	14.0	12.5	15.8

41 *Agenda Estadística 2013*, en Planeación UNAM, <<http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2013/pdf/Agenda2013.pdf>> (consulta: 12/11/2013), 69; Dato proporcionado por la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM, México, DF, 7 de noviembre de 2013.

42 *Historia y objetivos*, en “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía”, Facultad de Filosofía y Letras. UNAM, <<http://www.observatoriometeorologicounam.com/historia.htm>> (consulta: 12/11/2013).



Figura 3.2: Mapa de Ciudad Universitaria (CU), retomado de <http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2013/disco/xs/161.pdf>

La temperatura media mensual más elevada en mayo en cu, es representativa de la temporada seca-caliente de la cuenca. El que la temperatura media mensual más elevada se presente en mayo se debe a la combinación de dos factores, uno es el paso del Sol por el cenit y el segundo es la alta insolación a través de los cielos despejados.

La temperatura media anual más baja en enero es representativa de la temporada seca-fría. Esta temperatura baja se debe a la altitud de la cuenca y al paso de grandes masas de aire frío polar, típicas de esta temporada en esta región.

Precipitación. La precipitación total media anual, según datos del “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía”, es de 853.9 milímetros. La precipitación total media mensual más alta se presenta en el mes de julio con 183.2 mm y la más baja en febrero con 5.7 mm. (Tabla 3.3)

Tabla 3.3 Precipitación total media mensual y anual

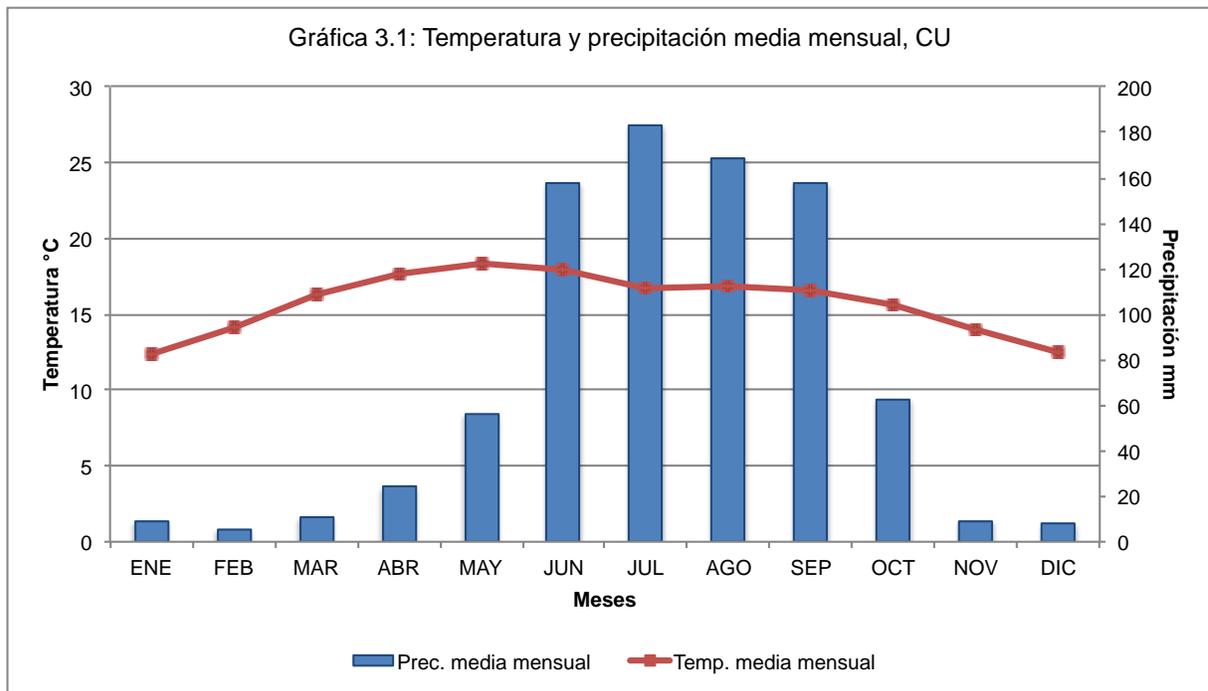
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media anual
9.3	5.7	11.1	24.1	56.5	157.6	183.2	169.0	157.4	62.8	9.2	8.0	853.9

La precipitación total media mensual más alta en julio, coincide con la temporada de lluvias en verano en la Cuenca de México, debido principalmente a los vientos alisios húmedos provenientes del Golfo de México y los movimientos convectivos dentro de la cuenca.

La precipitación total media mensual más baja en febrero, coincide con la temporada seca-fría. En donde las pocas lluvias que se presentan, se deben a vórtices fríos y depresiones ciclónicas, así como a los nortes del Golfo de México, que acarrearán lluvias de dos a tres días, dejando tras su paso, cielos despejados.

Climograma

El climograma de Ciudad Universitaria se graficó con los datos de temperatura ambiente y precipitación de 49 años de mediciones —de 1963 a 2012— del “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía”. (Gráfica 3.1)



Tipo de microclima

La Ciudad Universitaria, a través del “Observatorio meteorológico del Colegio de Geografía”, según la clasificación modificada por Enriqueta García a partir de la clasificación del clima de Köppen presenta un clima templado —por su altitud de 2,279 msnm—; subhúmedo, con lluvias en verano —por la circulación atmosférica regional propia de su latitud intertropical— en cuanto a humedad, intermedio entre el $C(w_0)$ y el $C(w_2)$; con un porcentaje de lluvia invernal de 3% del total anual; templado con verano fresco largo, temperatura media anual de 15.8°C , temperatura media del mes más frío de 12.4°C , y temperatura media del mes más caliente de 18.4°C ; y con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales de 6°C : $C(w_1)(w)$ b(i').

3.2 “PLATAFORMA DE OBSERVACIÓN DE LUZ NATURAL”

3.2.1 “Plataforma de observación de luz natural”: descripción; estructuración; ubicación; descripción del terreno circundante —5 km a la redonda— y obstrucciones del horizonte inmediato

Descripción

La “Plataforma de observación de luz natural” es una estación de medición, establecida en la Ciudad Universitaria, CU, de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Esta estación se integra al “Observatorio de radiación solar”, ORS, del Instituto de Geofísica de la misma universidad.

El ORS ha medido la radiación solar en la Ciudad de México con equipo especializado para este fin, desde hace más de 50 años. Actualmente, es un Centro Regional de Medición de la Radiación Solar para la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial, OMM, AR-IV. Desde su comienzo, este observatorio es líder nacional e internacional, respecto a mediciones de radiación solar, en conjunto con parámetros atmosféricos.

La iniciativa de medir la luz natural disponible del cielo de la Ciudad de México, comenzó hace varios años y fue propuesta por el maestro Leonardo Zeevaert y el doctor Agustín Muhlia. Dentro del “Laboratorio de integración con el medio”, LIM, del Posgrado de Arquitectura de la UNAM, por medio de trabajos experimentales —con mediciones fotométricas en ocasiones semanales o mensuales— se comprobó que la arquitectura de esta ciudad, a través de su reglamentación, no aprovecha el recurso lumínico natural disponible y se establece que para regular y aprovechar este recurso es preciso conocerlo y por lo tanto medirlo *in situ*, por un periodo continuo y prolongado.⁴³ Es así, que el LIM asigna al “Observatorio del laboratorio de interacción con el medio”, OLIM, para medir este recurso de luz natural disponible.

43 Arturo Valeriano Flores, “Iluminación natural en la arquitectura: Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010), 5, 50, 52, 179-183; Guadarrama Gándara, “Luz natural: Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011), 211-218.

Gracias al Programa de Apoyo a Estudios de Posgrado, PAEP, el LIM ha adquirido equipo especializado para medir aspectos relacionados a la interacción de la arquitectura con su medio. Fue a través de los años y principalmente en el 2012, que el laboratorio obtuvo la instrumentación necesaria para poder conformar una plataforma de observación.

El trabajo conjunto del ORS y del OLIM, con el apoyo del PAEP, hacen posible medir la luz natural en conjunto con la radiación solar y otros parámetros meteorológicos; y conformar la “Plataforma de observación de luz natural”.

Uno de los primeros objetivos de este trabajo era incluir la plataforma de observación en el “Programa internacional de mediciones de luz natural”, IDMP, para compartir información de calidad entre las estaciones participantes. Se trabajó bajo los lineamientos que establecía el programa⁴⁴ y con la asesoría del investigador japonés Norio Igawa —director, en ese entonces, del IDMP—, para que la plataforma fuera reconocida como una estación de medición general, debido a los parámetros que está monitorizando. La plataforma no calificaba para una estación de investigación, ya que aún no mide la distribución de la luminancia del cielo. Alrededor del 2012, al término de la estructuración de la plataforma, el programa se suspendió por diferentes razones, la primera, fue la falta de recursos económicos de las instituciones que soportaban las estaciones y la segunda, la jubilación de los expertos y encargados de operar las estaciones de medición en cada localidad.⁴⁵ A pesar de este hecho y sin ser parte del IDMP, la plataforma se terminó de estructurar con lineamientos de calidad e internacionales y actualmente mide parámetros de radiación solar, lumínicos, meteorológicos, atmosféricos y recaba información con altos estándares de calidad. Cabe mencionar, que el ORS no medía el recurso lumínico disponible y que es complejo incorporar nuevos parámetros de medición en un observatorio. Es a través de este trabajo de investigación, que el ORS incluye los parámetros lumínicos en sus rutinas de medición, mantenimiento, calibración, adquisición y almacenamiento de datos permanentemente. Con lo cual, los parámetros lumínicos son parte de la Red

44 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement* (Viena: CIE Central Bureau, 1994).

45 Norio Igawa, conversación, 3 de junio de 2013.

Solarimétrica —que encabeza el ORS— y podrán ser publicados para estar al alcance de todo público, así como la información que ha medido el observatorio por décadas.

Con la implementación de los parámetros lumínicos se genera información de calidad para sustentar el análisis de este trabajo de investigación. El implementar los parámetros lumínicos en la plataforma de observación es una aportación más de esta tesis. Esta aportación incluye un logro personal —con el apoyo de mis tutores— y novedoso, debido a que no existe registro del recurso lumínico natural con equipo especializado por un periodo prolongado y continuo en territorio mexicano.

Estructuración

Dentro de los planes de remodelación del edificio II del Instituto de Geofísica, se encontraba construir un módulo destinado al “Observatorio de radiación solar”, ubicado en la azotea del tercer nivel de este edificio. Para el verano de 2012 se terminó la obra gris del módulo construido. A la entrega de este módulo, fue necesario realizar adecuaciones para la instalación de los equipos de medición, tales como: diseño y construcción de mesas de medición, colocación de rejilla recolectora de cables, instalación eléctrica y demás detalles. Se diseñaron y fabricaron bases (anexo 1), las cuales soportan o alojan sensores, para medir ciertos parámetros de radiación solar y luz natural como: irradiancia e iluminancia vertical en los cuatro puntos cardinales, iluminancia normal solar directa y luminancia del cenit. Posteriormente, se instalaron los instrumentos de medición en conjunto con los adquirentes de datos y los programas de recopilación de información. De tal forma que para octubre de 2013 la “Plataforma de observación de luz natural” comienza a recabar datos de forma constante e ininterrumpida. (Figura 3.3)

Ubicación

La “Plataforma de observación de luz natural” se ubica en la azotea del edificio II del Instituto de Geofísica, dentro del Área de Institutos de Investigación Científica, en la Ciudad Universitaria de la UNAM. Sus coordenadas geográficas son: 19°19'33.80" latitud Norte y 99°10'33.59"

longitud Oeste con una altitud de 2,279 metros sobre el nivel del mar.

El edificio II del Instituto de Geofísica consta de tres niveles. En su azotea, sobre la crujía Sur, se desplanta un módulo de aproximadamente 7x6x4 metros, en el cual se aloja la “Plataforma de observación de luz natural” —a cargo e integrada al ORS— a una altura de 15 metros sobre el nivel de la calle. Las mesas de medición sobre la plataforma se encuentran a 16 metros sobre el nivel de la calle.

Descripción del terreno circundante, 5 km a la redonda de la plataforma

El terreno circundante a la plataforma, dentro de un radio de 5 km, es urbano. Dentro de esta área, cu abarca aprox. 9.4%, con equipamiento, espacios abiertos y áreas verdes de valor ambiental. Fuera de cu, 7% corresponde a equipamiento de dos a tres niveles; 6.5% a espacios abiertos y áreas verdes; y apenas un 0.3% a la industria. El porcentaje restante lo ocupa, principalmente, la vivienda con o sin comercio de dos a cuatro niveles y pocos de seis niveles. Existen algunos edificios con altura de 15 niveles sobre vialidades principales, como sobre la avenida Insurgentes, Revolución, Calzada de Tlalpan.⁴⁶ (Figura 3.4)

El terreno donde se ubica la plataforma pertenece a la curva de nivel de 2,280 metros sobre el nivel del mar. Al sur-poniente de este punto, las curvas de nivel comienzan a densificarse y elevarse y alcanzan 2,400 y algunos puntos 2,420 y 2,440 metros sobre el nivel del mar, dentro del área de estudio. (Figura 3.5)

46 Mapas de Programas Delegacionales: Coyoacán (2010), Álvaro Obregón (2011), Benito Juárez (2005), Tlalpan (2010), Magdalena Contreras (2005), en SEDUVI, <<http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/docs/programas/programasdelegacionales/>> (consulta: 7/11/2013).

③ capítulo



a) Fotografía tomada el 31 de agosto de 2012



b) Fotografía tomada el 9 de enero de 2013



c) Fotografía tomada el 11 de marzo de 2013



d) Fotografía tomada el 18 de junio de 2013



e) Fotografía tomada el 10 de marzo de 2014

Figura 3.3: Proceso de estructuración de la Plataforma de Observación de Luz Natural, fotografías de la autora.



Figura 3.4: Mapa de Programas Delegacionales: Coyoacán (2010), Álvaro Obregón (2011), Benito Juárez (2005), Tlalpan (2010), Magdalena Contreras (2005), retomado de los mapas completos en <www.seduvi.com.mx>, compilación de la autora.

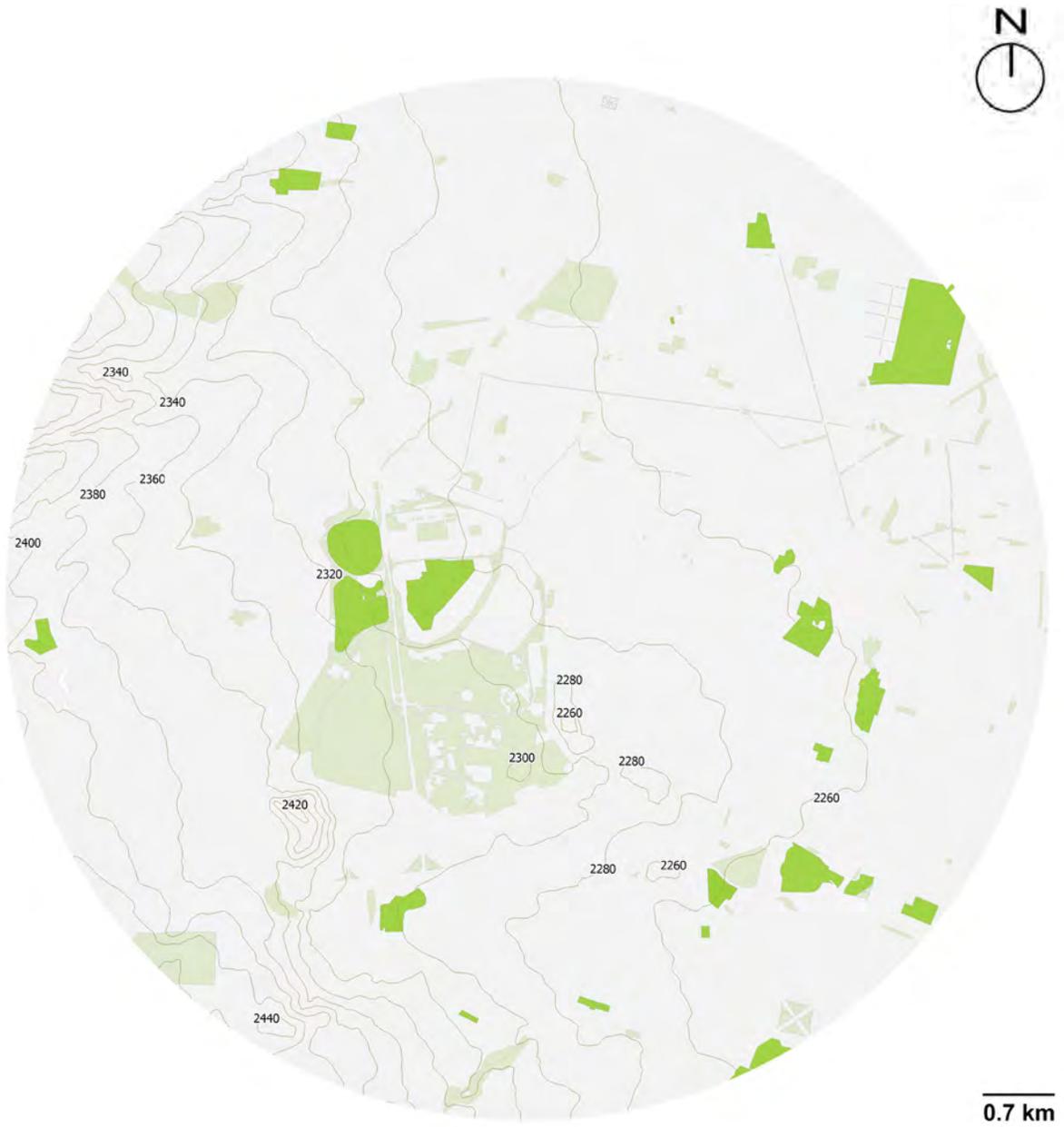


Figura 3.5: Mapa del área de estudio con curvas de nivel y espacios verdes (INEGI 1:50,000)

Obstrucciones del horizonte inmediato

La “Guía de Recomendaciones para Mediciones de Luz Natural” de la CIE, recomienda no tener obstrucciones —a partir del horizonte de la plataforma de observación— que rebasen los 4.6° grados⁴⁷. En este caso, aunque la plataforma se encuentran en el punto construido más alto del edificio II del Instituto de Geofísica, los árboles del contexto limitan esta recomendación y algunos se elevan hasta 18° grados sobre el horizonte (figura 3.6). A este perfil del horizonte, le falta el perfil orográfico de las sierras del Sur y sur-poniente de la Cuenca de México, visibles en un día despejado donde la visibilidad sea mayor a 20 km.

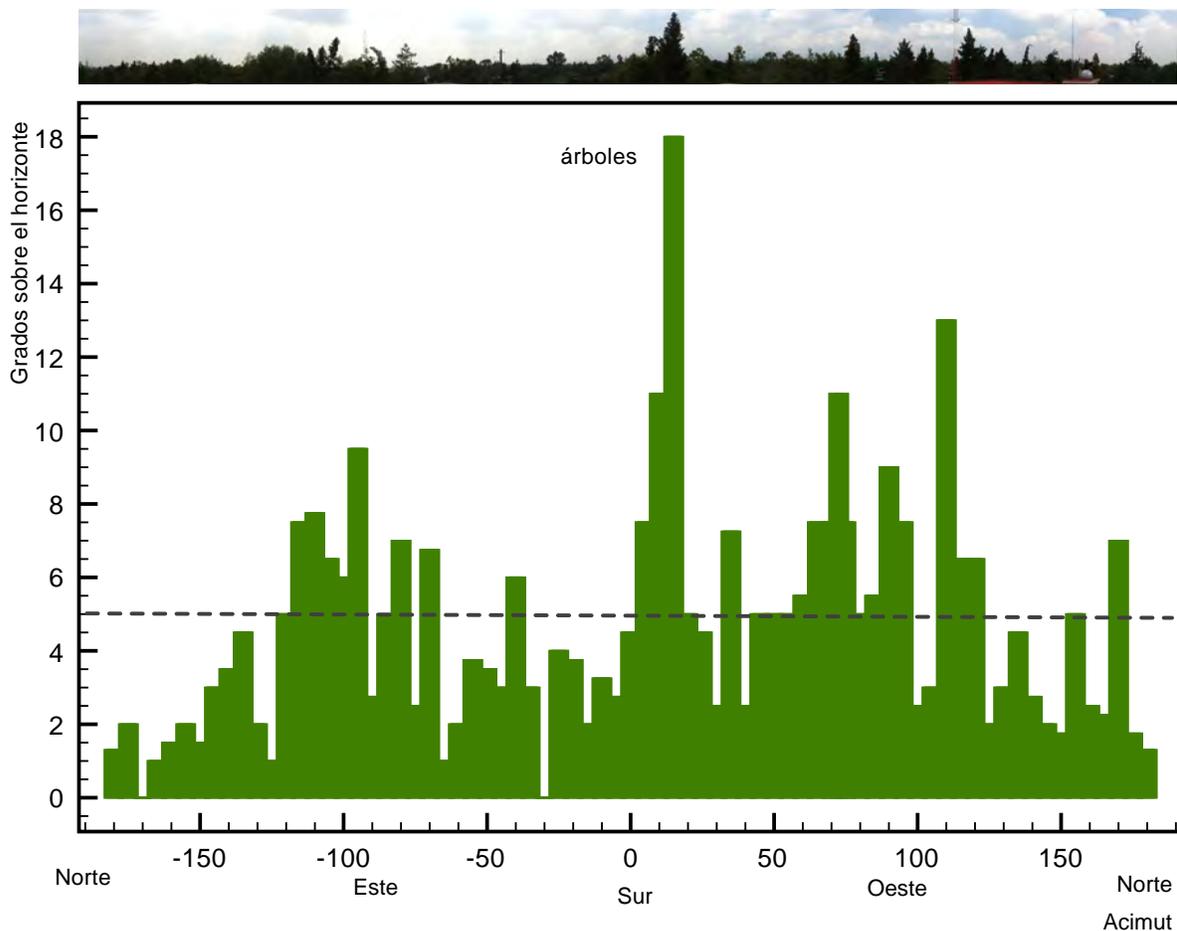


Figura 3.6: Perfil del horizonte, fotografía y gráfica, el perfil se obtuvo con un teodolito a una altura de 1.33 metros sobre el piso de la plataforma a 14.98 metros sobre el nivel del terreno.

47 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice of Daylight*, 2.

3.2.2 Parámetros de medición y su instrumentación

Los parámetros que mide la plataforma son los siguientes: iluminancia horizontal global, E_G ; iluminancia horizontal difusa, E_D ; iluminancia directa normal, E_{DN} ; iluminancia vertical al Este, E_{GVE} ; iluminancia vertical al Sur, E_{GVS} ; iluminancia vertical al Oeste, E_{GVO} ; iluminancia vertical al Norte, E_{GVN} ; iluminancia a 45° al Sur, E_{GS45} ; irradiancia horizontal global, G_G ; irradiancia horizontal difusa, G_D ; irradiancia directa normal, G_{DN} ; irradiancia vertical al Este, G_{GVE} ; irradiancia vertical al Sur, G_{GVS} ; irradiancia vertical al Oeste, G_{GVO} ; irradiancia vertical al Norte, G_{GVN} ; irradiancia a 45° al Sur, G_{GS45} ; ultravioleta Eppley, UVAE; ultravioleta A, UVA; ultravioleta B, UVB; radiación fotosintéticamente activa, RFA; radiación Infra-Roja, RA; temperatura del aire, Dbt; humedad Relativa, HR; punto de rocío, Dp; velocidad del viento, Ws; dirección del viento, Wd; precipitación, Pr; presión atmosférica, P; duración solar, S; luminancia en el cenit, Lvz y cantidad total de nubes, C. Para revisar la descripción, las características relevantes, la calibración y el mantenimiento de los sensores de medición revisar manuales de cada instrumento.

Para efectos de esta investigación trabajaremos con los siguientes parámetros de medición: irradiancia e iluminancia global, difusa, directa normal y verticales a los cuatro principales puntos cardinales. (Tabla 3.4)

3.2.3 Diseño y fabricación de bases para los sensores de medición

Parte de la aportación de este trabajo es el diseño y fabricación de bases para la medición de la irradiancia y la iluminancia vertical y la iluminancia directa normal. Se consultó con las empresas distribuidoras y fabricadoras de instrumentos de medición y no contaban con este tipo de bases, por lo que era necesario diseñarlas y fabricarlas. Se diseñaron en función de las recomendaciones de la “Guía de Recomendaciones para Mediciones de Luz Natural” de la CIE y con la asesoría de profesores e investigadores especializados: Mauro Valdés, David Riveros, Roberto Bonifaz, Leonardo Zeevaert y Norio Igawa. Las bases para medir la irradiancia e iluminancia en planos verticales están diseñadas para que capten solo la radiación de la bóve-

Tabla 3.4 Parámetros de medición, sensores, bases y fotografías

Parámetro de medición	Nomenclatura	Sensores y bases	Fotografías
Iluminancia global	E_G	Sensor: Fotómetro Modelo: LI-210SA Marca: Li-Cor Base: Horizontal niveladora	
Iluminancia difusa	E_D	Sensor: Fotómetro Modelo: LI-210SA Marca: Li-Cor Base: Horizontal niveladora en Rastreador solar Modelo: Solys2 Marca: Kipp & Zonen	
Iluminancia directa normal	E_{DN}	Sensor: Fotómetro Modelo: LI-210SA Marca: Li-Cor Base: Tubo colimador, tipo pirheliómetro en Rastreador solar Modelo: Solys2 Marca: Kipp & Zonen	
Iluminancia en planos verticales	$E_{GVE}, E_{GVS}, E_{GVO}$ y E_{GVN}	Sensor: Fotómetro Modelo: LI-210SA Marca: Li-Cor Base: Horizontal niveladora en Base Vertical para fotómetro	

Tabla 3.4 Parámetros de medición, sensores, bases y fotografías

Parámetro de medición	Nomenclatura	Sensores y bases	Fotografías
Irradiancia global	G_G	Sensor: Piranómetro Modelo: CMP21 Marca: Kipp & Zonen	
Irradiancia difusa	G_D	Sensor: Piranómetro Modelo: CMP21 Marca: Kipp & Zonen Base: Rastreador solar Modelo: Solys2 Marca: Kipp & Zonen	
Irradiancia directa normal	G_{DN}	Sensor: Pirheliómetro Modelo: CHP1 Marca: Kipp & Zonen Base: Rastreador solar Modelo: Solys2 Marca: Kipp & Zonen	
Irradiancia en planos verticales	$G_{GVE}, G_{GVS}, G_{GVO}$ y G_{GVN}	Sensor: Piranómetro Modelo: CMP11 Marca: Kipp & Zonen Base: Vertical para piranómetro	

da celeste, libre de obstrucciones y sin la reflexión del suelo, para que las mediciones puedan ser representativas del cielo de la cuenca y no solo del punto de observación, ya que el albedo del suelo de cada punto puede variar significativamente los flujos de energía incidentes sobre los planos verticales. (Fotografías tabla 3.4 y para su reproducción ver anexo 1)

3.2.4 Disposición de los instrumentos en la plataforma

Los instrumentos de medición se ubican en un área de aproximadamente 35 m². Una mesa corre perimetralmente en tres lados de esta plataforma, sobre la cual se colocan los instrumentos. La línea norte-sur indica que el ángulo de la plataforma y del Norte verdadero es de 6.59° grados, al Este. (Figura 3.7)

En el lado Este se ubica el seguidor solar, a través del cual se mide: irradiancia directa normal, G_{DN} ; irradiancia horizontal difusa, G_D ; iluminancia directa normal, G_{DN} ; e iluminancia horizontal difusa, E_D ; a una altura de 59 cm. Para que otros instrumentos, los cuales miden: irradiancia horizontal global, G_G ; iluminancia horizontal global, E_G ; radiación fotosintéticamente activa, RFA; radiación infra-roja, RA; ultravioleta A, UVA; ultravioleta B, UVB; ultravioleta Eppley, UVAE; irradiancia a 45° al Sur, G_{GS45} ; e iluminancia a 45° al Sur, E_{GS45} , contemplen el mismo horizonte, se construyó una mesa, al Sur del seguidor, con la misma altura de 59 cm. En este lado también se ubica el tubo colimador el cual mide la luminancia en el cenit, Lvz.

En el lado Sur, se encuentra el instrumento Cimel, el cual mide la profundidad óptica del aerosol atmosférico y en la esquina suroeste se encuentra la cámara de nubosidad de la marca YES, tomando fotos de la bóveda celeste y calculando la cantidad total de nubes del cielo, C.

En la esquina noreste se encuentra, a 2 metros de altura, el multisensor Vaisala (WXT510), el cual mide: temperatura del aire, Dbt; humedad relativa HR; velocidad del viento, Ws; dirección del viento, Wd; precipitación, P; presión atmosférica, Pr; y calcula punto de rocío, Dp.

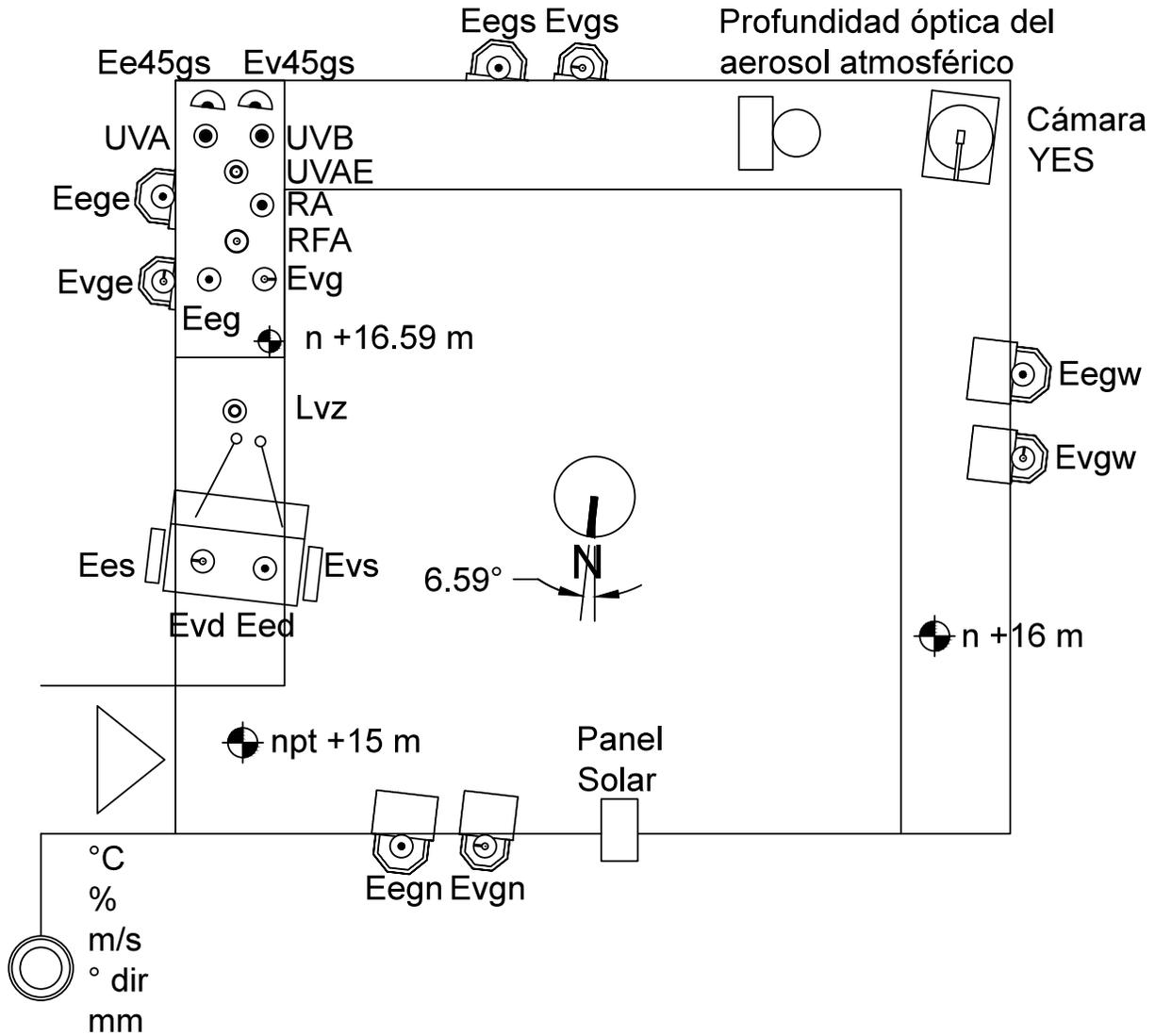


Figura 3.7: Disposición de los instrumentos en la Plataforma de Observación de Luz Natural.

En la pared Norte se encuentra un panel solar, el cual suministra energía al adquisidor de datos en el interior del observatorio.

Por último, en las cuatro fachadas se encuentran las bases que miden la irradiancia vertical al Este, G_{GVE} ; iluminancia vertical al Este, E_{GVE} ; irradiancia vertical al Sur, G_{GVS} ; iluminancia vertical al Sur, E_{GVS} ; irradiancia vertical al Oeste, G_{GVO} ; iluminancia vertical al Oeste, E_{GVO} ; irradiancia vertical al Norte, G_{GVN} ; e iluminancia vertical al Norte, E_{GVN} .

3.2.5 Adquisición, recopilación y almacenamiento de datos

En la parte inferior de la mesa de medición se encuentra una rejilla, la cual recoge los cables de los instrumentos. A través de cuatro conductos verticales se introducen los cables al interior del espacio y por medio de otra rejilla, se dirigen al tablero de conexión de canales. En este tablero se ordenan los cables de los instrumentos, de acuerdo con el canal por el cual serán tomadas las mediciones correspondientes. De cada uno de estos canales sale un cable que se conecta directamente a las tarjetas (34910A) del adquisidor de datos de la marca Agilent. Así mismo, cada canal del tablero de conexiones es puenteado, a través de otro cable, al Multiplexor de la marca Campbell (AM16/32B). Este a su vez se conecta al adquisidor de datos (CR1000) de la misma marca. Este adquisidor contiene un módulo de memoria extra (CFM100) y una tarjeta de memoria de 2G (CFMC2G) para ampliar la capacidad de almacenamiento. A este adquisidor de datos se le conecta una batería recargable (PS100), a la cual se le suministra energía del panel solar de 10W (BP Solar, SX310M), ubicado en la parte Norte de la plataforma. El adquisidor de datos, CR1000, se conecta a una computadora con el programa LoggerNet v4.1 a través de un cable serial-usb. El Multiplexor recibe los cables duales y aprovecha sus canales diferenciales, puertos: alto y bajo, *high* y *low*, "H" y "L".

La estación meteorológica automática de la marca Vaisala se conecta directamente al adquisidor de datos de Campbell.

La cámara de nubosidad de la marca YES se conecta a una base de conexiones de Ethernet, a la cual también está conectada una computadora con el programa de cómputo

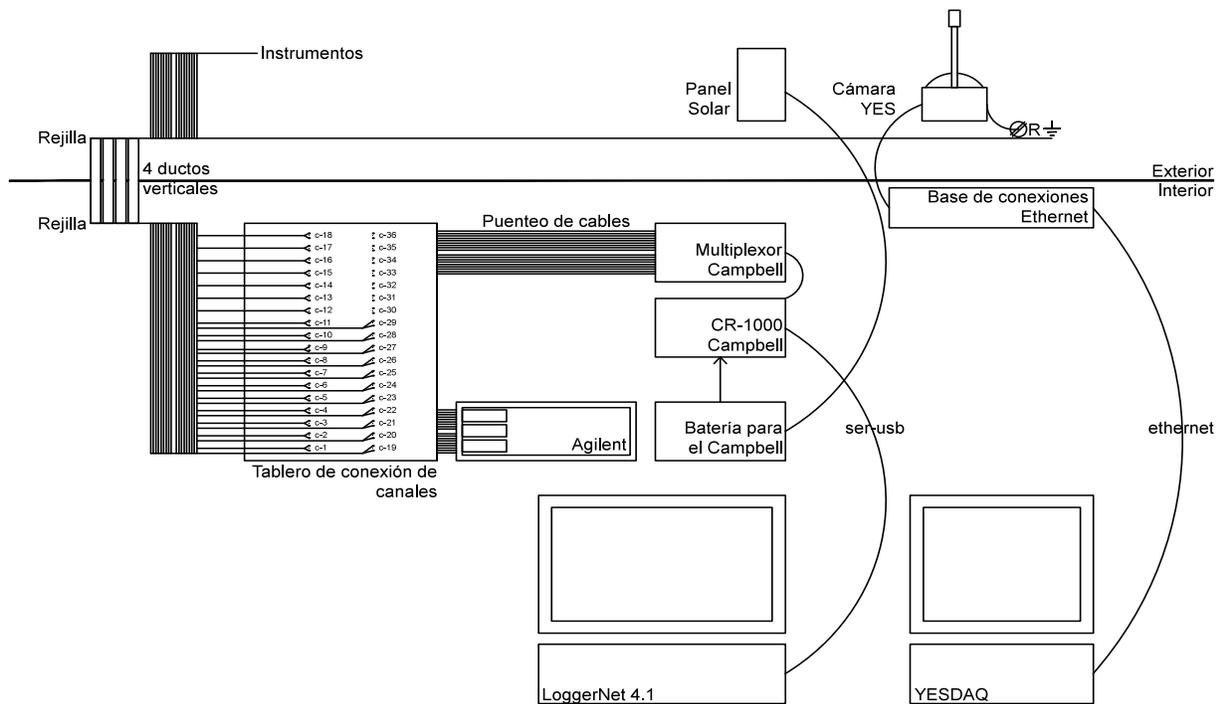


Figura 3.8: Esquema de conexión de los instrumentos a los adquirentes de datos.

YESDAQ⁴⁸, *Yankee Environmental System Data Acquisition*, suministrado por la misma marca. Este programa recolecta, controla y almacena la información recolectada de la cámara de nubosidad. (Figura 3.8)

A través de la herramienta de programación CRBasic de LoggerNet, se especifica la forma y la frecuencia en que son obtenidos los datos de medición del adquirente de datos CR1000. Para la plataforma, se programó, de tal forma, que hiciera una lectura de diferencial de voltaje de una muestra cada minuto y guardara la información en una tabla con extensión “dat”. En esta tabla se encuentra la información de medición obtenida cada minuto, las 24 horas del día. Los valores de irradiancia e iluminancia están dados en milivolts, mV.

Los datos meteorológicos se generan en otra tabla, también con extensión “dat” y con

⁴⁸Yankee Environmental Systems, Inc., ed. *YESDAQ Data Visualization Engine* (Massachusetts: Yankee Environmental Systems, Inc., 2002 Rev.A 9/25/2002).

una muestra a cada minuto de las 24 horas del día. Las unidades de medición de los parámetros meteorológicos son las siguientes: temperatura del aire, Dbt o “TempAmb” en grados Celsius, °C; humedad relativa, HR o “HumRel” en porcentaje, %; punto de rocío, Dp o “PunRoc” en grados Celsius, °C; velocidad del viento, Ws o “VelVto” en metros por segundo, m/S; dirección del viento, Wd o “DirVto” en grados, °; precipitación, Pr o “LluAcu” en milímetros, mm; presión atmosférica, P o “PreAtm” en hecto pascales, hPa. (Figura 3.9)

La recopilación de datos de nubosidad se lleva a cabo a través de la herramienta TSI-DVE, *Total Sky Imager Data Visualization Engine*, suministrada por la misma marca YES, es posible visualizar la información que fue almacenada en la base de datos YESDAQ y por medio de controladores de conectividad de bases de datos *Open Database Connectivity*, ODBC, es posible tener acceso a la información, en este caso vía MS-Excel y/o la base de datos de la plataforma de observación. (Figura 3.9)

La información es almacenada en una base de datos ubicada en una plataforma UNIX. El manejador de bases de datos utilizado es MySQL, es de dominio público y es a través de este que se realizan las consultas requeridas.

3.2.6 Preparación de los datos

Las señales de salida de los sensores radiométricos —un pirheliómetro y piranómetros— así como de los fotométricos —fotómetros— de la plataforma, son registradas en primera instancia en voltajes. Para obtener los valores de irradiancia e iluminancia, las señales son convertidas a las unidades correspondientes por medio de ecuaciones, que contemplan la constante de calibración de cada sensor.

Para convertir las señales de salida de los piranómetros y del pirheliómetro a *irradiancia*, G, en W/m² se emplea la siguiente ecuación⁴⁹:

49 Kipp & Zonen, ed., *CMP serie, Manual de Usuario* (Delf: Kipp & Zonen B.V., 2010 versión del manual:1007), 12.

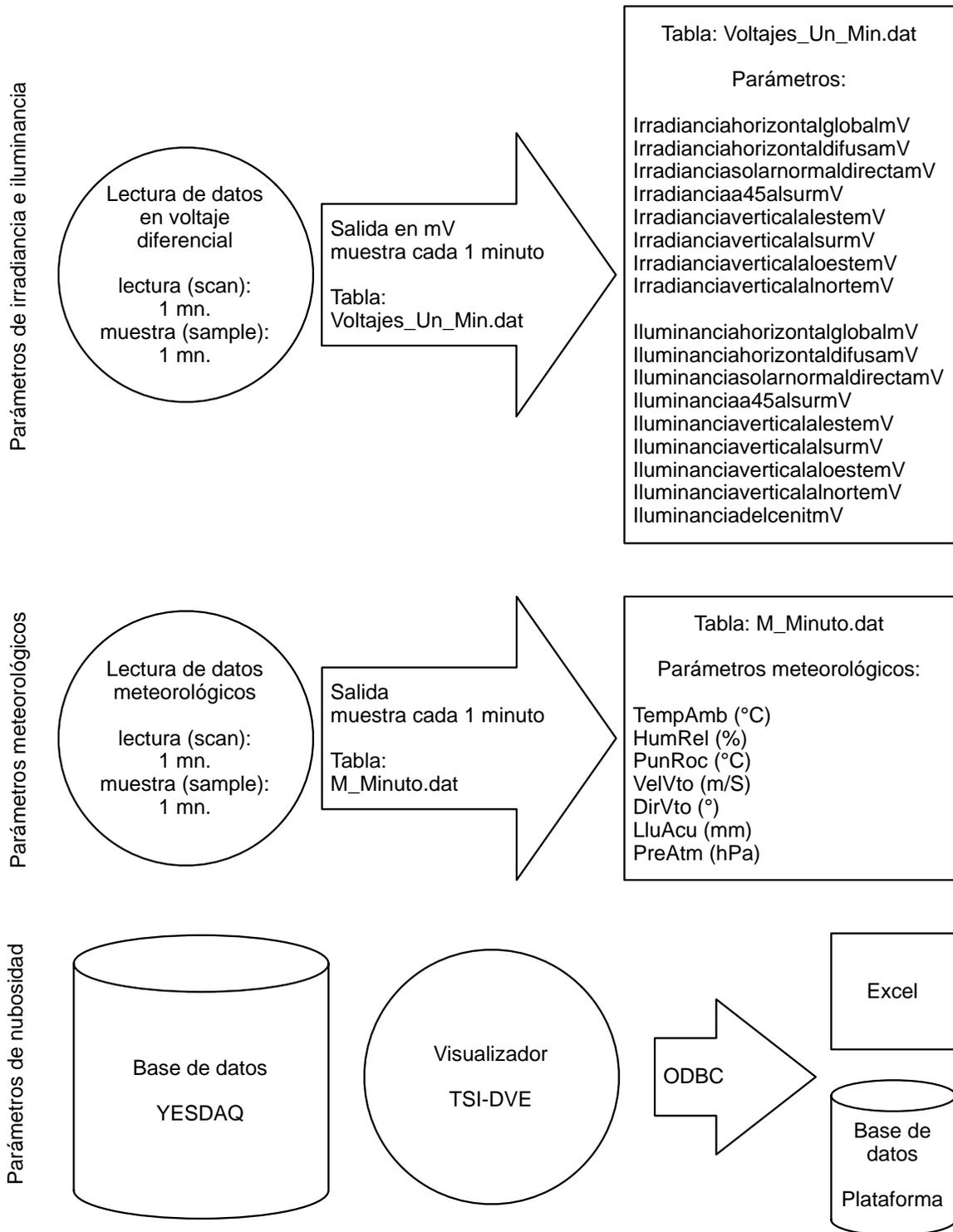


Figura 3.9: Esquema de recopilación de datos.

$$G = \frac{Ss_{mV}}{Cs_{irra}}. \quad (3.1)$$

Donde:

G = irradiancia, en W/m^2

Ss_{mV} = señal de salida, en mV

Cs_{irra} = constante de calibración del sensor de irradiancia, en $\mu V/W/m^2$

Para utilizar esta ecuación tanto la señal de salida, como la constante de calibración del sensor deben estar a la misma escala.

Para convertir las señales de salida de los fotómetros a *iluminancia*, E , en kilolux se emplea la siguiente ecuación⁵⁰:

$$E = Ss_{mV} * Cs_{ilu} \quad (3.2)$$

Donde:

E = iluminancia, en klux

Ss_{mV} = señal de salida, en mV

Cs_{ilu} = constante de calibración del sensor de iluminancia, en klux/mV

La siguiente tabla muestra las constantes de calibración y la fecha de calibración de los sensores de irradiancia e iluminancia utilizados para este estudio. (Tabla 3.5)

⁵⁰ Lucia Miceli de LI-COR Biosciences, correo electrónico vía director de tesis, 29 de octubre de 2014.

Tabla 3.5 Sensores de medición, su nomenclatura, sus constantes y fechas de calibración

Parámetro	Nom.	Tipo de sensor, marca, clave y número de serie	Constante de calibración	Fecha de calibración
Irradiancia global	G_G	Piranómetro; Kipp and Zonen; CMP21; 100370	8.80 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	31 de marzo de 2010
Irradiancia difusa	G_D	Piranómetro; Kipp and Zonen; CMP21; 100399	8.51 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	29 de abril de 2010
Irradiancia normal directa	G_{DN}	Pirheliómetro; Kipp and Zonen; CHP1; 120916	8.03 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	10 de junio de 2012
Iluminancia global	E_G	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9814	5.04 klux/mV	5 de junio de 2012
Iluminancia difusa	E_D	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9815	5.04 klux/mV	5 de junio de 2012
Iluminancia normal directa	E_{DN}	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9816	4.96 klux/mV	5 de junio de 2012
Irradiancia vertical Este	G_{GVE}	Piranómetro; Kipp and Zonen; CMP11; S/N	5.19 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	Septiembre de 2013
Irradiancia vertical Sur	G_{GVS}	Piranómetro; Kipp and Zonen; CMP11; 913697	4.6 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	Septiembre de 2013
Irradiancia vertical Oeste	G_{GVO}	Piranómetro; Kipp and Zonen; CMP11; 38364	5.05 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	Septiembre de 2013
Irradiancia vertical Norte	G_{GVN}	Piranómetro; Kipp and Zonen; CMP11; 38370	4.99 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	Septiembre de 2013
Iluminancia vertical Este	E_{GVE}	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9818	5.07 klux/mV	5 de junio de 2012
Iluminancia vertical Sur	E_{GVS}	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9819	5.1 klux/mV	5 de junio de 2012
Iluminancia vertical Oeste	E_{GVO}	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9820	5.04 klux/mV	5 de junio de 2012
Iluminancia vertical Norte	E_{GVN}	Fotómetro; LI-COR; LI-210SA; PH 9817	5.01 klux/mV	5 de junio de 2012

Nota: Los sensores se mantuvieron guardados hasta que fueron instalados a mediados del 2013

El realizar una instalación adecuada de los instrumentos de medición; llevar un mantenimiento riguroso de cada sensor; realizar calibraciones periódicas según lo indicado en cada instrumento (tabla 3.5); así como, registrar y guardar, de forma confiable, los datos de medición de cada parámetro, garantiza en un alto porcentaje la veracidad de la información medida. Por lo tanto, es de suma importancia llevar un control estricto de toda la instrumentación empleada en la “Plataforma de observación de luz natural”, desde que el sensor detecta señales hasta la adquisición, recopilación y el almacenamiento de datos de medición.

VALIDACIÓN, RESULTADOS Y PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

4

4.1 VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una vez que se garantiza la buena calidad de las mediciones realizadas en la plataforma de observación, desde el instrumento hasta el archivo de almacenamiento de datos de medición —por medio de la rutina de mantenimiento de los sensores, la calibración de estos y el proceso de adquisición de datos de medición, descritos en el inciso 3.2.5—, estas mediciones deben ser sometidas a diferentes procesos de validación.

Los procesos de validación tienen como objetivo conocer el rango de aceptación de la información medida; detectar errores negativos y sistemáticos en las mediciones para evitarlos lo antes posible; y por lo tanto, redundar en las rutinas de observación para mejorar el buen funcionamiento de los equipos día con día y con esto elevar la exactitud de las mediciones. Elevar la exactitud de las mediciones tiene un efecto positivo en cuanto al uso eficiente de los recursos naturales, como es la radiación solar, y responde a la demanda existente en la mejora de la información, respecto a la disponibilidad de recursos naturales, para cubrir necesidades de mercado, diseño e investigación.

Al calcular, predecir o conocer con mayor exactitud valores disponibles de la radiación solar en un sitio en específico, es posible aprovechar mayor porcentaje de estos recursos naturales, ahorrando energía y reduciendo costos. Según el investigador Norio Igawa¹, en Japón, con la implementación de su modelo para predecir con mayor exactitud la distribución de la radiación y luminancia de la bóveda celeste, fue posible ahorrar alrededor de un 20% en la

1 Norio Igawa, “Improved All Sky Model” (ponencia, Universidad Nacional Autónoma de México: Posgrado de Arquitectura, 3 de junio de 2013)

instalación y operación de equipo de aire acondicionado calculado para satisfacer las necesidades de confort de los usuarios en un espacio interior. Por otro lado, ya que actualmente es posible vender la energía que generamos, el conocer con mayor exactitud los valores del recurso solar disponible, posibilita predecir con mayor precisión la cantidad de energía generada a partir de este recurso y por ende realizar un cálculo más exacto de la venta o intercambio, para el beneficio de los involucrados.

En el proceso de validación, los datos son sometidos a una serie de pruebas para constatar que estos se encuentren dentro de los rangos establecidos y que la relación entre los diferentes flujos de radiación sea la indicada. A través de este proceso, también se identifican mediciones faltantes y posibles fallas en estas.

Diferentes organismos reguladores como la “Organización meteorológica mundial”, OMM, el “Laboratorio nacional de energías renovables” de Estados Unidos, por sus siglas en inglés, NREL, y la “Comisión internacional de iluminación”, CIE, proponen una serie de pruebas para la validación de datos radiométricos y fotométricos.² Los rangos establecidos pueden ser más amplios o más estrictos, dependiendo de los objetivos de la investigación para los cuales son empleados los datos de medición. En este trabajo se considera la validación de datos propuesta por la CIE, ya que con los datos fotométricos validados es posible realizar cálculos prácticos en el diseño de iluminación.³

Para llevar a cabo el proceso de validación, es necesario conocer la posición del Sol para cada medición realizada. Por lo tanto, previo a la validación de la información, se calcula la posición del Sol minuto a minuto del 1 de enero al 31 de diciembre del 2014 para las coordenadas geográficas del ORS, por medio de las ecuaciones descritas en el inciso 2.2.

Con la validación de la información —en conjunto con la rutina de mantenimiento de los sensores, la calibración de estos y el proceso de adquisición de datos, descritos en el inciso 3.2.5— se garantiza la confiabilidad de la información, la cual será procesada en diferentes productos finales para su interpretación.

2 https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf, 12 de septiembre de 2017

3 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, (Viena: CIE Central Bureau, 1994), 2.

4.1.1 Descripción de las pruebas y su validez

Los datos de medición de la “Plataforma de observación de luz natural” se someten a varias pruebas, las cuales se ordenan en tres categorías para su validación.

La primera condicionante de los tres parámetros básicos, retoma los datos de medición cuya altura solar sea mayor a 0° , con esta se descartan las mediciones en el periodo nocturno.

$$0 < \alpha \quad (4.1)$$

La primera categoría, la propone la CIE⁴ para la revisión constante de las observaciones y contiene las siguientes pruebas:

$$0 < G_G < 1.2 * I_{CS} \quad (4.2)$$

$$0 < E_G < 1.2 * E_{CL} \quad (4.3)$$

$$0 < G_D < 0.8 * I_{CS} \quad (4.4)$$

$$0 < E_D < 0.8 * E_{CL} \quad (4.5)$$

$$0 \leq G_{DN} < I_{CS} \quad (4.6)$$

$$0 \leq E_{DN} < E_{CL} \quad (4.7)$$

Donde:

α = altura solar, en grados

G_G = irradiancia global, en W/m^2

G_D = irradiancia difusa, en W/m^2

G_{DN} = irradiancia directa normal, en W/m^2

E_G = iluminancia global, en klux

4 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, 14.

④ capítulo

E_D = iluminancia difusa, en klux

E_{DN} = iluminancia directa normal, en klux

I_{CS} = constante solar igual a 1,367 W/m²

E_{CL} = constante lumínica igual a 133,800 lux o 133.8 klux

En esta categoría, se propone una modificación a las pruebas 4.6 y 4.7. En estas se contempla que la irradiancia y la iluminancia directa normal sean igual o mayor a 0, ya que en un día completamente nublado el flujo directo puede presentar valores nulos.

En la prueba 4.2 y 4.3 los datos de irradiancia e iluminancia global son válidos si son mayores a 0 y menores a 1.2 veces el valor de la constante solar o lumínica, respectivamente. Los valores de las constantes solares se obtienen en el “tope” de la atmósfera y debido a la atenuación de los rayos solares a su paso por la atmósfera, las mediciones de los flujos de energía de radiación a nivel de la superficie de la Tierra, no debían exceder las constantes extra-atmosféricas. Sin embargo, existen eventualidades por las cuales el flujo global podría incrementarse —a partir de la constante en el exterior de la atmósfera— y por lo tanto se amplía el rango de la prueba en un 20% el valor de dichas constantes. Estas eventualidades pueden contemplar la alta reflexión que pueden sufrir los rayos solares en diferentes componentes atmosféricos, como las nubes —si estas llegan a tener una profundidad óptica significativa—, generando que el flujo de radiación se incremente a nivel terrestre.

En las pruebas 4.4 y 4.5, respecto a la irradiancia e iluminancia difusa, los datos son válidos si son mayores de 0 y menores de 0.8 veces la constante solar y lumínica, respectivamente. La radiación difusa es generada por los procesos de extinción atmosféricos, los cuales distribuyen parte de la radiación directa del Sol a toda la bóveda celeste. Esta distribución y la atenuación que sufren los rayos al atravesar la atmósfera da lugar a que los valores del flujo difuso, sean menores que los valores de las constantes fuera de la atmósfera. En esta prueba se considera que los valores del flujo difuso a nivel de superficie deben ser menores del 80% los valores de las constantes.

Las pruebas 4.6 y 4.7 contemplan que la irradiancia e iluminancia directa normal —perpendicular a los rayos solares a lo largo del día— sean mayores o iguales a 0 y menores a las constantes extra-atmosféricas. El flujo de radiación directa solar sufre atenuaciones desde el “tote” de la atmósfera hasta la superficie de la Tierra, debido a los procesos de extinción y a la distancia y densidad del camino óptico que atraviesa para llegar a la superficie terrestre, como ya se mencionó anteriormente. Por lo tanto, los valores de la irradiancia e iluminancia directa normal no deberán exceder los valores de las constantes fuera de la atmósfera.

Con la primera condicionante y las pruebas de la primera categoría se retoman las mediciones del periodo diurno —donde los sensores comienzan a detectar flujos de energía de radiación— y se descartan posibles fallas de los sensores —donde los datos presenten valores negativos durante el día—, los datos de medición válidos son sometidos a las siguientes pruebas.

La segunda categoría, también propuesta por la CIE⁵, incluye las siguientes pruebas:

$$G_G = G_D + G_{DN} * \text{Cos}(\theta) \pm 15\% \quad (4.8)$$

$$E_G = E_D + E_{DN} * \text{Cos}(\theta) \pm 15\% \quad (4.9)$$

Donde:

θ = ángulo cenital, en radianes

En las pruebas 4.8 y 4.9 los datos son válidos si la irradiancia e iluminancia difusa más la irradiancia e iluminancia directa horizontal son iguales a la irradiancia e iluminancia global, respectivamente, contemplando un rango del 15%.

A la suma de la radiación difusa y directa se le conoce como radiación global. Para comparar los valores del flujo global medido sobre una superficie horizontal con los valores del flujo difuso y directo normal, también medidos, es necesario multiplicar la radiación directa

5 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 14.

normal por el ángulo cenital solar. A esta comparación se le asigna un rango del 15%, contemplando posibles variaciones en las respuestas de los sensores que miden cada parámetro.

Para la validación de las mediciones de irradiancia e iluminancia verticales se considera emplear los datos de medición cuyos valores sean mayores a 0 y cuya altura solar sea mayor a 0°. Por lo tanto, las condicionantes para planos verticales son las siguientes:

$$G_{GV(i)} > 0 < \alpha \quad (4.10)$$

$$E_{GV(i)} > 0 < \alpha \quad (4.11)$$

Donde:

$G_{GV(i)}$ = irradiancia vertical global para cada orientación: Este, Sur, Oeste, Norte, en W/m²

$E_{GV(i)}$ = iluminancia vertical global para cada orientación: Este, Sur, Oeste, Norte en klux

La tercera categoría, para mediciones en planos verticales, contempla la predicción de la relación entre los tres parámetros básicos de la radiación —global, difusa y directa normal— y los parámetros verticales, en este caso dirigidos a los cuatro puntos cardinales: Este, Sur, Oeste y Norte. Las pruebas de la tercera categoría, propuestas por la CIE⁶ para planos verticales son las siguientes:

$$G_{GV(i)} = f(G_G, G_{DN}, \text{Cos}(\theta), \text{Cos}(\theta_z)) \pm 100 \text{ W/m}^2 \quad (4.12)$$

$$E_{GV(i)} = f(E_G, E_{DN}, \text{Cos}(\theta), \text{Cos}(\theta_z)) \pm 12 \text{ klx} \quad (4.13)$$

Donde:

θ = ángulo cenital, en radianes

θ_z = ángulo de incidencia en la superficie inclinada, en radianes

6 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 15.

En las pruebas 4.12 y 4.13 la función f calcula la irradiancia o la iluminancia en planos verticales, a partir de la irradiancia o iluminancia global y directa, así como de los ángulos cenitales e incidentes sobre los planos verticales. Una vez que se calculan los valores para la irradiancia y la iluminancia para los respectivos planos verticales, se aplican las pruebas de validación 4.12 y 4.13. En la prueba 4.12 los datos de medición de irradiancia vertical en cualquier orientación son válidos si se encuentran en un rango de 100 W/m² de su valor calculado. En el caso de la iluminancia, prueba 4.13, los datos de medición son válidos si se encuentran en un rango de 12 kilolux de su valor calculado.

Cálculo de los valores de irradiancia e iluminancia en planos inclinados

Existen varios modelos en la literatura, los cuales predicen los valores de radiación en planos inclinados. Muneer⁷ y Chaiwiwatworakul⁸ hacen una recopilación de estos modelos. Posiblemente, el modelo más conocido y utilizado —debido a que ha sido extensamente validado, mostrando un buen desempeño y el cual ha sido recomendado por la “Agencia internacional de energía”, IEA—⁹ es el modelo de Pérez, propuesto en 1986-1987 y simplificado en varias ocasiones.¹⁰ En este modelo se basa la CIE para realizar las pruebas de validación de los datos. Este modelo no contempla la reflexión del suelo. A continuación se describe este extenso modelo.

7 Tariq Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 2.^a ed. (Inglaterra, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004), 143-173.

8 Pipat Chaiwiwatworakul, *Daylighting in the Tropics: Daylight Availability, Sky Luminance Distribution, Daylight Application with Automated Blind* (Alemania, Sarrebruck: Lambert Academic, 2011), 12-15

9 Chaiwiwatworakul, *Daylighting in the Tropics*, 12; A. De Rosa, V Ferraro, D Kaliakatsos, y V Marinelli, “Simplified Correlations of Global, Direct and Diffuse Luminous Efficacy on Horizontal and Vertical Surfaces”, *Energy & Buildings* 40, n.º 11 (2008): 1991–2001, 1996; John E. Hay, D.C. McKay y la Agencia Internacional de Energía, IEA, “Calculation of Solar Irradiances for Inclined Surfaces: Verification of Models Which Use Hourly and Daily Data”, vol. 1, A Report of Task 9: Solar Radiation and Pyranometry Studies, 1988, ii.

10 Richard Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart y D. Menicucci, “A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces”, *Solar Energy* vol. 39, n.º 3 (1987): 221-231; Richard Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky y R. Stewart, “Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance”, *Solar Energy* vol. 44, n.º 5 (1990): 271–289.

El modelo de Pérez reconoce la bóveda celeste como un cielo isotrópico —de donde proviene radiación de forma uniforme y de todas direcciones— esta premisa es la base del modelo. Sin embargo, propone que la bóveda presenta dos zonas, las cuales no generan flujos de radiación uniformes, estas zonas son la región circunsolar y una banda cercana al horizonte. En el modelo se sobreponen estas dos zonas anisotrópicas al cielo isotrópico.¹¹

La fórmula general simplificada de Pérez¹² para obtener la irradiancia o iluminancia difusa en un plano inclinado es la siguiente:

$$G_{DV(i)} = G_D \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(S)}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 * \text{Sen}(S) \right] \quad (4.14)$$

$$E_{DV(i)} = E_D \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(S)}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 * \text{Sen}(S) \right] \quad (4.15)$$

Otra forma simplificada de la fórmula general de Pérez es la siguiente¹³:

$$G_{DV(i)} = G_D \left[(1 - F_1) \cos^2 \left(\frac{S}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 * \text{Sen}(S) \right] \quad (4.16)$$

$$E_{DV(i)} = E_D \left[(1 - F_1) \cos^2 \left(\frac{S}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 * \text{Sen}(S) \right] \quad (4.17)$$

Donde:

$G_{GV(i)}$ = irradiancia difusa para un plano inclinado, en W/m²

$E_{GV(i)}$ = iluminancia difusa para un plano inclinado, en klux

G_D = irradiancia difusa, en W/m²

11 Perez et al., “Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance”, 281.

12 Perez et al., “Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance”, 281.

13 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 155.

E_D = iluminancia difusa, en klx

F_1 = coeficiente del brillo circunsolar

F_2 = coeficiente del brillo del horizonte

S = inclinación del plano, en radianes

a y b = términos que toman en cuenta los ángulos de incidencia sobre la superficie horizontal e inclinada del flujo directo

$a = \max(0, \cos(\theta_z))$

$b = \max(0.087 \text{ o } \cos(85^\circ), \cos(\theta))$

La ecuación para obtener la irradiancia o iluminancia global en un plano vertical propuesta por la CIE¹⁴ para validar datos de medición es la siguiente:

$$G_{GV(i)} = (G_G - G_{DN} * \cos(\theta)) \left[\frac{(1 - F_1)}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right] + r * G_{DN} \quad (4.18)$$

$$E_{GV(i)} = (E_G - E_{DN} * \cos(\theta)) \left[\frac{(1 - F_1)}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right] + r * E_{DN} \quad (4.19)$$

Donde:

$G_{GV(i)}$ = irradiancia vertical global para diferentes orientaciones, en W/m²

$E_{GV(i)}$ = iluminancia vertical global para diferentes orientaciones, en klux

G_G = irradiancia global, en W/m²

E_G = iluminancia global, en klx

G_D = irradiancia difusa, en W/m²

E_D = iluminancia difusa, en klx

G_{DN} = irradiancia directa normal, en W/m²

E_{DN} = iluminancia directa normal, en klx

F_1 = coeficiente del brillo circunsolar

F_2 = coeficiente del brillo del horizonte

¹⁴ CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 41.

④ capítulo

θ = ángulo cenital, en radianes

$r = \max(0, \cos(\theta_z))$

θ_z = ángulo de incidencia en la superficie inclinada, en radianes

Las ecuaciones de la CIE en el primer término contemplan calcular el flujo difuso, pero ya que en este estudio este fue medido, se utiliza la fórmula con la irradiancia difusa o la iluminancia difusa:

$$G_{GV(i)} = G_D \left[\frac{(1-F_1)}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right] + r * G_{DN} \quad (4.20)$$

$$E_{GV(i)} = E_D \left[\frac{(1-F_1)}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right] + r * E_{DN} \quad (4.21)$$

El último término de las ecuaciones 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 se refiere al flujo directo, por lo tanto, si eliminamos este último los valores resultantes son idénticos a los calculados por la fórmula de Pérez para la irradiancia e iluminancia inclinada difusa, a excepción de los valores calculados para ángulos solares menores a aproximadamente 5°. La diferencia entre las ecuaciones es contemplar un plano inclinado —fórmula de Pérez— o un plano vertical —fórmulas propuestas por la CIE—. Las ecuaciones de la CIE sin el componente directo son las siguientes:

$$G_{DV(i)} = G_D \left[\frac{(1-F_1)}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right] \quad (4.22)$$

$$E_{DV(i)} = E_D \left[\frac{(1-F_1)}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right] \quad (4.23)$$

Por otro lado, si queremos obtener la irradiancia o iluminancia global en un plano inclinado con la ecuación de Pérez, es necesario sumarle el componente directo. Las ecuaciones son las siguientes¹⁵:

15 De Rosa, et al., "Simplified Correlations of Global, Direct and Diffuse Luminous Efficacy on Horizontal and Vertical Surfaces", 1996.

$$G_{GV(i)} = G_D \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(S)}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 * \text{Sen}(S) \right) \right] + \frac{a}{b} * G_{DN} * \cos(\theta) \quad (4.24)$$

$$E_{GV(i)} = E_D \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(S)}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 * \text{Sen}(S) \right) \right] + \frac{a}{b} * E_{DN} * \cos(\theta) \quad (4.25)$$

Los resultados de las ecuaciones de Pérez 4.24 4.25 son iguales a los resultados de las ecuaciones propuestas por la CIE (ecuaciones 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21), a excepción de los valores calculados para ángulos solares menores a aproximadamente 5°.

Se utilizan las fórmulas propuestas por la CIE¹⁶ —sustituyendo el primer término por la irradiancia o la iluminancia difusa medida— para calcular la irradiancia e iluminancia vertical global en los cuatro puntos cardinales. Con estos resultados se realizarán, posteriormente, las pruebas de validación. A continuación se presentan las fórmulas empleadas para calcular la irradiancia e iluminancia vertical:

$$G_{GV(i)} = G_D \left[\left(\frac{1 - F_1}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right) \right] + r * G_{DN} \quad (4.20)$$

$$E_{GV(i)} = E_D \left[\left(\frac{1 - F_1}{2} + F_1 * r / \cos(\theta) + F_2 \right) \right] + r * E_{DN} \quad (4.21)$$

Donde:

$G_{GV(i)}$ = irradiancia vertical global para diferentes orientaciones, en W/m²

$E_{GV(i)}$ = iluminancia vertical global para diferentes orientaciones, en klx

G_D = irradiancia difusa, en W/m²

E_D = iluminancia difusa, en klx

G_{DN} = irradiancia directa normal, en W/m²

E_{DN} = iluminancia directa normal, en klx

F_1 = coeficiente del brillo circunsolar

F_2 = coeficiente del brillo del horizonte

¹⁶ CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 41.

④ capítulo

θ = ángulo cenital, en radianes (la fórmula para obtener este ángulo se desglosa en el inciso correspondiente)

$$r = \max(0, \cos(\theta_z))$$

θ_z = ángulo de incidencia en la superficie inclinada, en radianes

Para calcular el ángulo de incidencia en la superficie inclinada, θ_z , es necesario conocer el ángulo horizontal de sombra, A_z , aunque la fórmula para este último se menciona en la tesis de maestría se retoma en este inciso, ya que se suman detalles importantes a considerar¹⁷:

$$A_z = \gamma - A_e \tag{4.26}$$

Donde:

A_z = ángulo horizontal de sombra, en grados

γ = ángulo acimutal con referencia al Sur, negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste, en grados (la fórmula para obtener este ángulo se desglosa en el inciso 2.2)

A_e = acimut de la superficie, partiendo de 0° al Sur, -90° al Este, 90° al Oeste y -180° al Norte, en grados

La fórmula del ángulo de incidencia en *una superficie inclinada*, θ_z , también se menciona en la tesis de maestría, pero se retoma en este párrafo, ya que es importante visualizar las diferencias de esta ecuación con la propuesta por Muneer para planos con inclinación diferente a 90°. ¹⁸

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos(\alpha) * \cos(A_z)) \tag{4.27}$$

Donde:

θ_z = ángulo de incidencia en la superficie inclinada, en radianes

α = altura solar, en radianes

¹⁷ Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), *The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application*, 9a ed., (Nueva York: IESNA, 2000), 8-4.

¹⁸ IESNA, *The IESNA Lighting Handbook*, 8-4.

A_z = ángulo horizontal de sombra, en radianes

Cuando la superficie vertical tenga una inclinación diferente a 90° —perpendicular al plano horizontal— se recomienda utilizar la siguiente fórmula¹⁹:

$$\theta_z = \text{Cos}^{-1} \left[\text{Cos}(\alpha) * \text{Cos}(\gamma_{\text{norte}} - A_{e(\text{norte})}) * \text{Sen}(S) + \text{Cos}(S) * \text{Sen}(\alpha) \right] \quad (4.28)$$

Donde:

θ_z = ángulo de incidencia en la superficie inclinada, en radianes

α = altura solar, en radianes

γ_{norte} = ángulo acimutal con referencia al Norte, es posible utilizar la fórmula propuesta en este trabajo y sumarle 180° al valor calculado, en radianes

$A_{e(\text{norte})}$ = acimut de la superficie, partiendo de 0 al Norte, 90 al Este, 180 al Sur y 270 al Oeste, en radianes

S = inclinación del plano, en radianes

Los coeficientes F_1 y F_2 representan el brillo circunsolar y del horizonte, respectivamente y dependen de parámetros que describen las condiciones del cielo —como el índice de claridad del cielo, ε , índice de brillo del cielo, Δ — y el ángulo cenital, θ , los coeficientes se calculan por medio de las siguientes ecuaciones²⁰:

$$F_1 = F_{11} + \Delta * F_{12} + \theta * F_{13} \quad (4.29)$$

$$F_2 = F_{21} + \Delta * F_{22} + \theta * F_{23} \quad (4.30)$$

Donde:

$F_{11,12,13,21,22,23}$ = coeficientes empíricos obtenidos para cada categoría de ε

ε = índice de claridad del cielo

¹⁹ Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 13.

²⁰ Perez et al., "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", 282; CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 41.

Δ = índice de brillo del cielo

θ = ángulo cenital, en radianes (la fórmula para obtener este ángulo se desglosa en el inciso 2.2)

La variación del índice de claridad del cielo, ε , expresa la transición de un cielo completamente nublado —categoría 1— a un cielo despejado con poca turbiedad —categoría 8—, la ecuación para obtener este índice es la siguiente²¹:

$$\varepsilon = \left[\frac{(G_D + G_{DN})}{G_D + k * \theta^3} \right] / \left[1 + k * \theta^3 \right] \quad (4.31)$$

Donde:

ε = índice de claridad del cielo

k = constante igual a 1.041

Una vez que se calcula el índice de la claridad del cielo, se obtienen los coeficientes ($F_{11,12,13,21,22,23}$) propuestos por Pérez para diferentes categorías de claridad del cielo, para la irradiancia y para la iluminancia por separado. Los coeficientes fueron obtenidos a través de un estudio de tres años de medición, los coeficientes de irradiancia se obtuvieron con datos de 9 estaciones estadounidenses y europeas y los coeficientes de iluminancia con datos de 5 estaciones del Noreste de los Estados Unidos de América. Es importante emplear distintos coeficientes para la irradiancia y para la iluminancia, ya que se han observado ciertas diferencias anisotrópicas entre el flujo radiativo y lumínico. Por un lado, la disminución del brillo circunsolar es menos pronunciada para el componente lumínico bajo cielos despejados y por otro lado, la oscuridad del horizonte bajo cielo nublado es más pronunciada para el componente radiativo, a consecuencia de la absorción del vapor de agua presente en la atmósfera.²² La tabla 4.1 muestra los coeficientes empíricos propuestos por Pérez, utilizados en este trabajo.

21 Perez et al., "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", 273; CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 41.

22 Perez et al., "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", 271 y 282.

Tabla 4.1 Coeficientes para irradiancia e iluminancia según el modelo de Pérez.

ϵ	1	2	3	4	5	6	7	8	
Categorías	Nublado							Despejado	
Límite inferior	1.000	1.065	1.230	1.500	1.950	2.800	4.500	6.200	
Límite superior	1.065	1.230	1.500	1.950	2.800	4.500	6.200	-	
Coeficientes de irradiancia									
F11	-0.0083	0.1299	0.3297	0.5682	0.8730	1.1326	1.0602	0.6777	
F12	0.5877	0.6826	0.4869	0.1875	-0.3920	-1.2367	-1.5999	-0.3273	
F13	-0.0621	-0.1514	-0.2211	-0.2951	-0.3616	-0.4118	-0.3589	-0.2504	
F21	-0.0596	-0.0189	0.0554	0.1089	0.2256	0.2878	0.2642	0.1561	
F22	0.0721	0.0660	-0.0640	-0.1519	-0.4620	-0.8230	-1.1272	-1.3765	
F23	-0.0220	-0.0289	-0.0261	-0.0140	0.0012	0.0559	0.1311	0.2506	
Coeficientes de iluminancia									
F11	0.0113	0.4296	0.8093	1.0141	1.2818	1.4257	1.4848	1.1695	
F11	0.0113	0.4296	0.8093	1.0141	1.2818	1.4257	1.4848	1.1695	
F12	0.5707	0.3634	-0.0535	-0.2522	-0.4205	-0.6533	-1.2139	-0.2998	
F13	-0.0820	-0.3066	-0.4422	-0.5311	-0.6888	-0.7789	-0.7837	-0.6149	
F21	-0.0947	0.0499	0.1809	0.2750	0.3802	0.4247	0.4111	0.5180	
F22	0.1579	0.0080	-0.1686	-0.3498	-0.5586	-0.7851	-0.6292	-1.8924	
F23	-0.0177	-0.0650	-0.0918	-0.0957	-0.1144	-0.0966	-0.0822	-0.0551	

Nota: La CIE solo propone coeficientes de irradiancia para la validación de datos, sin embargo se retomaron los coeficientes de iluminancia de Pérez para obtener cálculos de predicción de la iluminancia en planos verticales más precisos.

Retomada de Perez et al., "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", 282; CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 41.

La variación del índice de brillo del cielo, Δ , refleja la opacidad y el espesor de las nubes presentes en la bóveda celeste, la fórmula que propone la CIE para calcular el índice del brillo del cielo es la siguiente²³:

²³ Perez et al., "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", 273.

$$\Delta = G_D / (I_{cs} * \text{Cos}(\theta)) \quad (4.32)$$

Donde:

Δ = índice de brillo del cielo

I_{cs} = irradiancia extra-atmosférica o constante solar igual a 1,367 W/m²

La ecuación 4.32 no contempla la masa óptica relativa corregida, lo cual es importante para este trabajo, ya que los datos son medidos en un sitio geográfico a más de 2,000 msnm, por lo que se retoma la siguiente ecuación propuesta por Pérez²⁴:

$$\Delta = G_D * m_a / I_{cs} \quad (4.33)$$

Donde:

m_a = masa óptica relativa corregida —cuando la presión atmosférica estándar de 1013.24 mbar y la presión del sitio es mayor de 20 mbar, caso del sitio de estudio— la fórmula para obtener la masa óptica relativa corregida se desglosa en el inciso 2.2

4.1.2 Implementación y resultados de las pruebas de validación

Una vez que se conoce la posición solar para cada medición realizada minuto a minuto —para el periodo del 1 de enero al 31 de diciembre de 2014—, fueron implementadas las pruebas de validación descritas en el inciso anterior para los tres parámetros básicos de irradiancia e iluminancia —global, difusa y directa normal—, así como para la irradiancia y la iluminancia vertical en cuatro orientaciones: Este, Sur, Oeste y Norte.

Implementación y resultados de las pruebas de validación para la irradiancia e iluminancia global, difusa y directa normal medidas

Los valores de las mediciones de los tres parámetros básicos de irradiancia e iluminancia que

²⁴ Perez et al., "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", 273.

pasaron la primera condicionante 4.1 fueron sometidos a las pruebas de la primera y segunda categoría, el resto fue descartado “X”. En la primera y segunda categoría se les asigna una “V” de válidos o una “Q” de cuestionables. Si los valores son válidos en la primera y segunda categoría entonces se toman en cuenta para ser procesados en un producto final “✓”. Por el contrario, si obtienen una evaluación cuestionable en estas categorías, son descartados “X”. (Tabla 4.2)

Tabla 4.2 Validación de la información, tres parámetros básicos de irradiancia e iluminancia

1era. condicionante	1era. categoría	2da. categoría	Salida
Tres parámetros básicos			
V	V	V	✓
X	-	-	X
V	Q	V	X
V	V	Q	X
V	Q	Q	X

Posteriormente, fueron cuantificados las mediciones válidas de la primera condicionante, así como los válidos y cuestionables en la primera y segunda categoría. La tabla 4.3 muestra los resultados de la implementación de las pruebas.

En la tabla 4.3 se indica, por mes, el número de mediciones realizadas minuto a minuto; las mediciones faltantes; las mediciones válidas de la primera condicionante y de la primera categoría; así como las válidas o cuestionables de la segunda categoría para la irradiancia e iluminancia, por separado.

Ya que las pruebas de la segunda categoría relacionan los tres parámetros —global, difusa y directa normal— de la irradiancia y de la iluminancia, respectivamente, si alguno de estos tres parámetros es cuestionable, ninguno de estos pasará esta última prueba, resultando en el mismo número de mediciones válidas o cuestionables, para cada parámetro, en referencia a la irradiancia o a la iluminancia. Por lo tanto, se presenta solo una columna de

Tabla 4.3 Mediciones validadas y cuestionables, tres parámetros básicos

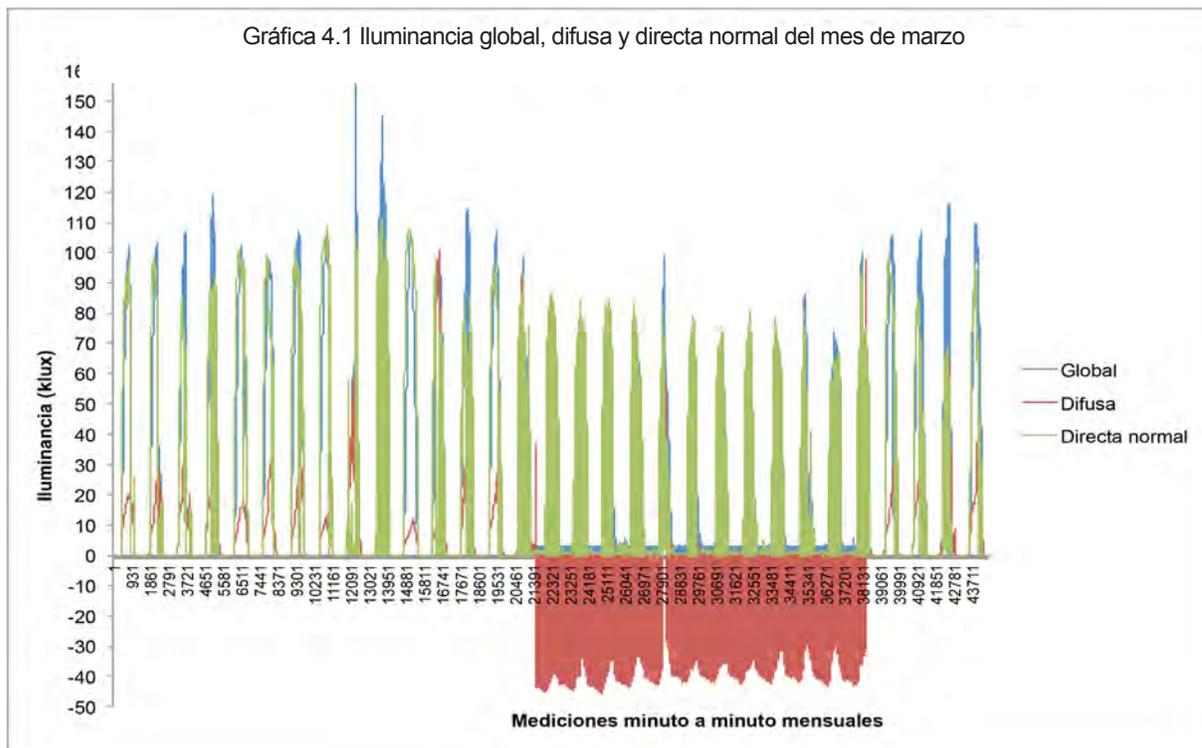
Meses	Mediciones realizadas minuto a minuto 24 hrs.	Mediciones faltantes	Mediciones válidas 1era. Cond. 3 básicos	Mediciones válidas 1era. Categoría	Mediciones válidas 2da. Categoría Irradiancia	Mediciones cuestionables 2da. Categoría Irradiancia	Mediciones válidas 2da. Categoría Iluminancia	Mediciones cuestionables 2da. Categoría Iluminancia
Enero	44,640	0	19,236	19,236	19,088	148	19,132	104
Febrero	40,295	25	17,885	17,885	17,514	371	17,771	114
Marzo	44,639	1	18,430	18,430	18,144	286	14,170	253
Abril	43,200	0	19,297	19,297	19,102	195	19,263	34
Mayo	44,640	0	20,604	20,604	20,405	199	20,440	164
Junio	43,200	0	19,887	19,887	19,713	174	19,659	228
Julio	44,640	0	20,285	20,285	20,022	263	20,234	51
Agosto	44,640	0	20,400	20,400	20,257	143	20,367	33
Septiembre	43,200	0	18,820	18,820	18,751	69	18,778	42
Octubre	44,640	0	19,125	19,125	18,978	147	18,979	146
Noviembre	43,180	20	18,306	18,306	18,169	137	17,910	396
Diciembre	44,640	0	18,503	18,503	18,449	54	18,329	174
Totales	525,554	46	230,778	230,778	228,592	2,186	225,032	1,739
Porcentaje				100%	99.05%	0.94%	97.51%	0.75%

Nota: El sensor que mide la iluminancia difusa presenta fallas en el periodo del 16 al 27 de marzo, estas mediciones equivalen a 4,007, las cuales no son contempladas para la segunda categoría de validación. (Gráfica 4.1)

mediciones válidas o cuestionables para la irradiancia y otra para la iluminancia.

Esta tabla muestra que son mínimas las mediciones faltantes durante el año —sólo en el mes de febrero y de noviembre se presentan 25 y 20, respectivamente—, y que todas las mediciones pasaron las pruebas de la primera categoría. También muestra, algunas mediciones cuestionables en la segunda categoría respecto a la irradiancia en un 0.94% y respecto a la iluminancia en un 0.75%, para cada parámetro medido. Esto no quiere decir que estas mediciones sean incorrectas, solo que no pasaron las pruebas de validación.

En el caso de la irradiancia, las mediciones cuestionables se presentan en un 78% por



debajo de los 10° de altura solar y por arriba de 10° y debajo de 20° en un 16%. Esto significa que las mediciones cuestionables están siendo afectadas posiblemente por las obstrucciones del contexto y por la imprecisión que pueden presentar los sensores en los primeros 10° , a partir el horizonte. En el caso de la iluminancia, las mediciones cuestionables se presentan en un 42%, cuando la altura solar es menor o igual al 10° y en un 35% cuando la altura solar es mayor a 10° y menor o igual a 20° . Aunque la irradiancia presente el 95% de sus mediciones cuestionables por debajo de los 20° de altura solar y la iluminancia el 77%, el valor de esta última sigue siendo aceptable y seguimos suponiendo la afectación del contexto y de la instrumentación en estas mediciones. (Tabla 4.4).

Al implementar la validación, se observa que del 16 al 27 de marzo se presentan algunas fallas en las mediciones del sensor que mide la iluminancia difusa, ya que los adquirentes de datos registran valores negativos durante el día, provocados posiblemente por cortos circuitos o fallas en las conexiones (gráfica 4.1). Las mediciones fallidas de este periodo fueron

Tabla 4.4 Frecuencia de mediciones cuestionables respecto a la altura solar, tres parámetros básicos de irradiancia e iluminancia

Altura solar	Frecuencia de mediciones cuestionables	Porcentaje de mediciones cuestionables	Altura solar	Frecuencia de mediciones cuestionables	Porcentaje de mediciones cuestionables
	Irradiancia	Irradiancia		Iluminancia	Iluminancia
10	1,710	78	10	738	42
20	356	16	20	603	35
30	63	3	30	120	7
40	13	1	40	38	2
50	10	0	50	46	3
60	19	1	60	41	2
70	10	0	70	113	6
80	5	0	80	39	2
90	0	0	90	1	0
Totales	2,186	100		1,739	100

Nota: Se excluyen las fallas de medición del 16 al 27 de marzo.

excluidas de la tabla 4.3 y de la evaluación de las mediciones cuestionables según su altura solar (tabla 4.4).

Para generar los productos finales como la evaluación de la irradiancia media horaria, los tres parámetros medidos de la irradiancia —global, difusa y directa normal— tienen que ser válidos. Así, los tres parámetros de la iluminancia tienen que ser válidos para generar la evaluación de la iluminancia media horaria. En el caso de la relación entre la irradiancia y la iluminancia global los 6 parámetros medidos tuvieron que ser válidos en las diferentes pruebas, antes descritas.

Implementación y resultados de las pruebas de validación para la irradiancia e iluminancia vertical medidas en cuatro orientaciones: Este, Sur, Oeste y Norte

Ya que las pruebas de validación de la tercera categoría para las verticales contemplan la

relación de los tres parámetros básicos con los parámetros verticales, estos últimos pudieron ser validados, si los parámetros básicos de irradiancia resultaron válidos; y en el caso de la iluminancia los de irradiancia e iluminancia básicos. Esto quiere decir que en promedio el 15% de mediciones de los parámetros verticales no pudieron ser validados en la tercera categoría —contemplando las fallas de medición en marzo— y se quedaron fuera del producto final para su interpretación, aunque posiblemente los datos de medición sean correctos. (Tabla 4.5)

Tabla 4.5 Porcentaje de mediciones verticales que no pudieron ser validadas por datos inválidos de los parámetros básicos de irradiancia e iluminancia

Mes	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	Promedio
	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	
Enero	6	6	6	6	7	7	7	7	6
Febrero	8	8	8	8	7	7	7	7	8
Marzo	21	20	21	21	46	44	45	49	33
Abril	15	15	14	14	16	16	16	16	15
Mayo	15	15	15	15	17	17	17	17	16
Junio	17	18	18	18	20	20	20	20	19
Julio	18	19	18	18	20	20	20	20	19
Agosto	13	14	13	13	16	16	16	16	14
Septiembre	14	15	14	13	16	16	16	16	15
Octubre	12	11	11	11	14	14	14	14	13
Noviembre	9	8	9	9	12	12	12	12	10
Diciembre	8	8	9	9	10	10	10	10	9
Promedios	13	13	13	13	17	17	17	17	15

Los datos de medición de los parámetros verticales que resultaron válidos en la segunda y tercera condicionante 4.10 y 4.11, fueron sometidos a las pruebas de la tercera categoría, el resto fue descartado. Las mediciones descartadas eran menores a 0 y su altura solar correspondiente no era mayor de 0°. Las mediciones válidas en la tercera categoría fueron procesadas en un producto final. Por el contrario, si obtienen una evaluación cuestionable en esta categoría, son descartadas. (Tabla 4.6)

Tabla 4.6 Validación de la información, parámetros verticales

2da. categoría	2da. y 3era. Cond.	3ra. categoría	Salida
3 parámetros básicos	parámetros verticales		
V	V	V	✓
X	V	-	X
V	X	-	X
V	V	Q	X

Posteriormente, fueron cuantificados las mediciones válidas de la segunda y tercera condicionante, así como las válidas o cuestionables de la tercera categoría. Las siguientes tablas muestran los resultados de la implementación de las pruebas para los parámetros verticales. (Tabla 4.7 hasta 4.10)

En las tablas 4.7 a la 4.10 se muestran, por cada mes, el número de mediciones realizadas minuto a minuto y el número de mediciones válidas y descartadas de la segunda y tercera condicionante. Así como, el número de mediciones válidas de la segunda categoría —correspondientes a los tres parámetros básicos de irradiancia— y el número y porcentaje de mediciones válidas y cuestionables de la tercera categoría, para cada uno de los parámetros verticales medidos.

La frecuencia de mediciones verticales cuestionables según su altura solar no presenta un patrón tan claro como el caso respectivo de irradiancia e iluminancia global, difusa y directa normal. Los porcentajes más altos se presentan con alturas solares medias. En el caso de la irradiancia vertical, las mediciones cuestionables se presentan en un 56%, en promedio, cuando la altura solar presenta valores entre 30° y 50° y en el caso de la iluminancia vertical, las mediciones cuestionables se presentan en un 65%, en promedio, cuando la altura solar presenta valores entre 40° y 60°. (Tablas 4.11 y 4.12)

Tabla 4.7 Mediciones válidas, irradiancia vertical

Meses	Medicio- nes minuto a minuto 24 hrs.	2da.	2da.	2da.	2da.	Mediciones válidas 2da. Categoría Irradiancia	3era.	3era.	3era.	3era.
		Cond. G _{EV} Este	Cond. G _{EV} Sur	Cond. G _{EV} Oeste	Cond. G _{EV} Norte		Categoría G _{EV} Este	Categoría G _{EV} Sur	Categoría G _{EV} Oeste	Categoría G _{EV} Norte
Enero	44,640	20,224	20,183	20,220	20,190	19,088	18,914	18,940	19,084	19,087
Febrero	40,295	18,970	18,919	18,990	18,941	17,514	17,354	17,423	17,400	17,427
Marzo	44,639	21,871	21,733	21,900	21,952	18,144	16,242	16,574	17,748	17,921
Abril	43,200	21,882	21,946	21,858	21,787	19,102	19,024	18,902	18,919	19,035
Mayo	44,640	23,485	23,518	23,505	23,517	20,405	20,314	19,392	20,262	19,871
Junio	43,200	23,153	23,258	23,174	23,167	19,713	19,540	19,693	19,227	18,744
Julio	44,640	23,658	23,748	23,641	23,630	20,022	19,739	19,598	19,546	18,588
Agosto	44,640	22,934	23,046	22,831	22,875	20,257	20,141	19,490	19,924	20,076
Septiembre	43,200	21,344	21,491	21,422	21,271	18,751	18,621	18,631	18,579	18,660
Octubre	44,640	21,191	21,138	21,144	21,063	18,978	18,795	18,722	18,896	18,875
Noviembre	43,180	19,726	19,708	19,800	19,717	18,169	18,102	17,963	18,137	18,128
Diciembre	44,640	20,011	20,002	20,083	20,022	18,449	18,415	18,322	18,414	18,449
Totales	525,554	258,449	258,690	258,568	258,132	228,592	225,201	223,650	226,136	224,861
Porcentajes		100	100	100	100		87%	86%	87%	87%

Tabla 4.8 Mediciones descartadas y cuestionables, irradiancia vertical

Meses	Medicio- nes minuto a minuto 24 hrs.	Mediciones descartadas				Mediciones válidas 2da. Categoría Irradiancia	Mediciones cuestionables			
		2da. Cond. G _{EV} Este	2da. Cond. G _{EV} Sur	2da. Cond. G _{EV} Oeste	2da. Cond. G _{EV} Norte		3era. Categoría G _{EV} Este	3era. Categoría G _{EV} Sur	3era. Categoría G _{EV} Oeste	3era. Categoría G _{EV} Norte
Enero	44,640	24,416	24,457	24,420	24,450	19,088	174	148	4	1
Febrero	40,295	21,325	21,376	21,305	21,354	17,514	160	91	114	87
Marzo	44,639	22,768	22,906	22,739	22,687	18,144	1,902	1,570	396	223
Abril	43,200	21,318	21,254	21,342	21,413	19,102	78	200	183	67
Mayo	44,640	21,155	21,122	21,135	21,123	20,405	91	1,013	143	534
Junio	43,200	20,047	19,942	20,026	20,033	19,713	173	20	486	969
Julio	44,640	20,982	20,892	20,999	21,010	20,022	283	424	476	1,434
Agosto	44,640	21,706	21,594	21,809	21,765	20,257	116	767	333	181
Septiembre	43,200	21,856	21,709	21,778	21,929	18,751	130	120	172	91
Octubre	44,640	23,449	23,502	23,496	23,577	18,978	183	256	82	103
Noviembre	43,180	23,454	23,472	23,380	23,463	18,169	67	206	32	41
Diciembre	44,640	24,629	24,638	24,557	24,618	18,449	34	127	35	0
Totales	525,554	267,105	266,864	266,986	267,422	228,592	3,391	4,942	2,456	3,731
Porcentajes		100	100	100	100		13%	14%	13%	13%

Tabla 4.9 Mediciones válidas, iluminancia vertical

Meses	Medicio- nes minuto a minuto 24 hrs.	3era.	3era.	3era.	3era.	Mediciones válidas 2da. Categoría Irradiancia	3era.	3era.	3era.	3era.
		Cond. E _{gv} Este	Cond. E _{gv} Sur	Cond. E _{gv} Oeste	Cond. E _{gv} Norte		Categoría E _{gv} Este	Categoría E _{gv} Sur	Categoría E _{gv} Oeste	Categoría E _{gv} Norte
Enero	44,640	20,416	20,416	20,416	20,416	19,088	18,933	17,955	18,988	18,993
Febrero	40,295	19,092	19,089	19,091	19,092	17,514	17,433	16,720	17,294	17,386
Marzo	44639	21,412	21,241	21,397	21,907	18,144	12,873	13,319	13,306	13,767
Abril	43,200	22,412	22,412	22,412	22,412	19,102	19,071	19,090	18,782	19,090
Mayo	44,640	24,005	24,009	24,000	24,008	20,405	20,238	19,726	20,068	20,257
Junio	43,200	23,657	23,660	23,660	23,658	19,713	19,384	19,520	18,811	19,526
Julio	44,640	24,235	24,245	24,240	24,245	20,022	19,872	19,685	19,154	19,967
Agosto	44,640	23,553	23,539	23,559	23,552	20,257	20,174	19,741	19,450	20,236
Septiembre	43,200	21,866	21,866	21,866	21,865	18,751	18,493	18,421	18,109	18,716
Octubre	44,640	21,572	21,574	21,573	21,574	18,978	18,680	17,712	18,473	18,852
Noviembre	43,180	19,989	19,990	19,990	19,990	18,169	17,739	16,376	17,757	17,794
Diciembre	44,640	20,140	20,198	20,198	20,198	18,449	17,962	17,898	18,271	18,276
Totales	525,554	262,349	262,239	262,402	262,917	228,592	220,852	216,163	218,463	222,860
Porcentajes		100	100	100	100	100%	84%	82%	83%	85%

Tabla 4.10 Mediciones descartadas y cuestionables, iluminancia vertical

Meses	Medicio- nes minuto a minuto 24 hrs.	Mediciones descartadas				Mediciones válidas 2da. Categoría Irradiancia	Mediciones cuestionables			
		3era. Cond. E _{gv} Este	3era. Cond. E _{gv} Sur	3era. Cond. E _{gv} Oeste	3era. Cond. E _{gv} Norte		3era. Categoría E _{gv} Este	3era. Categoría E _{gv} Sur	3era. Categoría E _{gv} Oeste	3era. Categoría E _{gv} Norte
Enero	44,640	24,224	24,224	24,224	24,224	19,088	60	1,038	5	0
Febrero	40,295	21,203	21,206	21,204	21,203	17,514	40	753	179	87
Marzo	44639	23,227	23,398	23,242	22,732	18,144	1,131	685	698	237
Abril	43,200	20,788	20,788	20,788	20,788	19,102	26	7	315	7
Mayo	44,640	20,635	20,631	20,640	20,632	20,405	44	556	214	25
Junio	43,200	19,543	19,540	19,540	19,542	19,713	147	11	720	5
Julio	44,640	20,405	20,395	20,400	20,395	20,022	109	296	827	14
Agosto	44,640	21,087	21,101	21,081	21,088	20,257	75	508	799	13
Septiembre	43,200	21,334	21,334	21,334	21,335	18,751	225	297	609	2
Octubre	44,640	23,068	23,066	23,067	23,066	18,978	208	1,176	415	36
Noviembre	43,180	23,191	23,190	23,190	23,190	18,169	55	1,418	37	0
Diciembre	44,640	24,500	24,442	24,442	24,442	18,449	314	378	5	0
Totales	525,554	263,205	263,315	263,152	262,637	228,592	2,434	7,123	4,823	426
Porcentajes		100	100	100	100	100%	16%	18%	17%	15%

Tabla 4.11 Frecuencia de mediciones cuestionables respecto a la altura solar, irradiancia vertical

Altura solar	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}	G_{GV}
	Este	Este	Sur	Sur	Oeste	Oeste	Norte	Norte
10	667	20	415	8	378	15	192	5
20	479	14	962	19	205	8	362	10
30	628	19	1,184	24	171	7	900	24
40	712	21	790	16	418	17	993	27
50	475	14	664	13	557	23	724	19
60	266	8	391	8	546	22	353	9
70	122	4	352	7	160	7	176	5
80	26	1	166	3	15	1	28	1
90	16	0	18	0	6	0	3	0
Totales	3,391	100	4,942	100	2,456	100	3,731	100

Tabla 4.12 Frecuencia de mediciones cuestionables respecto a la altura solar, iluminancia vertical

Altura solar	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}	E_{GV}
	Este	Este	Sur	Sur	Oeste	Oeste	Norte	Norte
10	184	8	45	1	65	1	2	0
20	191	8	476	7	108	2	29	7
30	340	14	706	10	276	6	15	4
40	550	23	791	11	688	14	30	7
50	529	22	2,249	32	1,188	25	57	13
60	365	15	1,987	28	1,514	31	163	38
70	243	10	813	11	906	19	120	28
80	12	0	28	0	66	1	10	2
90	20	1	28	0	12	0	0	0
Totales	2,434	100	7,123	100	4,823	100	426	100

4.2 PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

4.2.1 Irradiancia e iluminancia media horaria —global, difusa y directa normal— y en cuatro planos verticales —Este, Sur, Oeste y Norte—

Los datos de medición validados minuto a minuto —del periodo del 1 de enero al 31 de diciembre de 2014— de cada uno de los 6 parámetros: irradiancia e iluminancia global, difusa y directa normal, así como de los 8 parámetros verticales: irradiancia e iluminancia vertical al Este, Sur, Oeste y Norte, son promediados por hora local. Con estos promedios, se generan tres representaciones de cada parámetro medido.

La primera tabla presenta el resultado de los promedios horarios de las 5 a las 20 horas por cada mes del año. La primera figura, correspondiente, utiliza isolíneas para representar la variación de los valores medios horarios de acuerdo a las horas y a los meses analizados. Estas figuras se generan por medio del programa de cómputo *Surfer*, en el cual se selecciona el método *kriging* para interpolar los datos de medición. Kriging es un método geoestadístico de interpolación, que genera mapas o “superficies estimadas” a partir de un conjunto de datos dispersos.²⁵ Es un método óptimo que proporciona la estimación imparcial con varianza conocida y mínima, ampliamente utilizado para analizar y predecir fenómenos naturales en espacio y/o tiempo, el cual requiere de un modelo matemático que describe la covarianza espacial —variabilidad de la correlación espacial—, usualmente expresado como variograma.²⁶ El variograma o semivariograma es una función que relaciona la covarianza o semivarianza con el vector conocido como *lag*, el cual denota la separación en distancia y dirección de cualquier par de valores.²⁷ Se utiliza el método kriging simple de tipo puntual con un semivariograma lineal para la representación de los parámetros medidos en este trabajo. (Figuras de la 4.1 a la 4.16)

25 Yang, Chin-Shung, Szu-Pyng Kao, Fen-Bin Lee y Pen-Shan Hung, “Twelve Different Interpolation Methods: A case Study of Surfer 8.0,” 1–8, 2004.

26 Margaret A. Oliver y Richard Webster, *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*, (Suiza, Cham: Springer, 2015), V y 1; Martín A. Díaz, “Geoestadística aplicada”, Instituto de Geofísica: UNAM, Curso de geoestadística, 2002, < <http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf>>, (consulta 13/09/2017), 1.

27 Martín A. Díaz, “Geoestadística aplicada”, 1.

La segunda tabla y primera gráfica, correspondientes, muestran los valores medios horarios por hora local de cada mes, así como los promedios, máximos y mínimos anuales. (Tablas de la 4.13 a la 4.40 y gráficas de la 4.2 a la 4.15)

4.2.2 Relación entre la irradiancia y la iluminancia global

Con los datos de medición validados minuto a minuto, también se presenta la relación entre la irradiancia y la iluminancia global, para cada mes del año. Los productos generados son gráficas con diagramas de dispersión, con la regresión mínimo-cuadrática y el cuadrado de la correlación mensuales, así como una tabla con los coeficientes del cuadrado de la correlación mensuales. (Tabla 4.41 y gráficas 4.16 a la 4.27)

Tabla 4.13 Irradiancia global, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			49	189	395	580	671	716	646	546	386	252	94	24		
Feb			78	258	492	683	816	872	810	703	529	314	142	37		
Mar		15	118	340	559	737	827	838	762	596	470	307	152	50		
Abr		46	191	432	643	806	923	896	789	666	420	252	138	40		
May		53	190	387	586	713	812	760	608	460	335	233	130	37		
Jun		43	151	303	445	621	755	747	603	483	398	247	115	53	8	
Jul		43	167	325	531	711	819	802	708	529	361	242	109	33	10	
Ago		44	155	359	582	728	841	854	719	549	390	240	127	53	6	
Sep		27	106	265	467	655	729	697	580	421	298	203	79	26		
Oct		25	119	243	428	572	691	744	596	501	305	169	55	7		
Nov		14	99	287	492	654	674	684	609	475	318	183	66			
Dic			58	197	380	544	615	642	598	504	328	185	68			

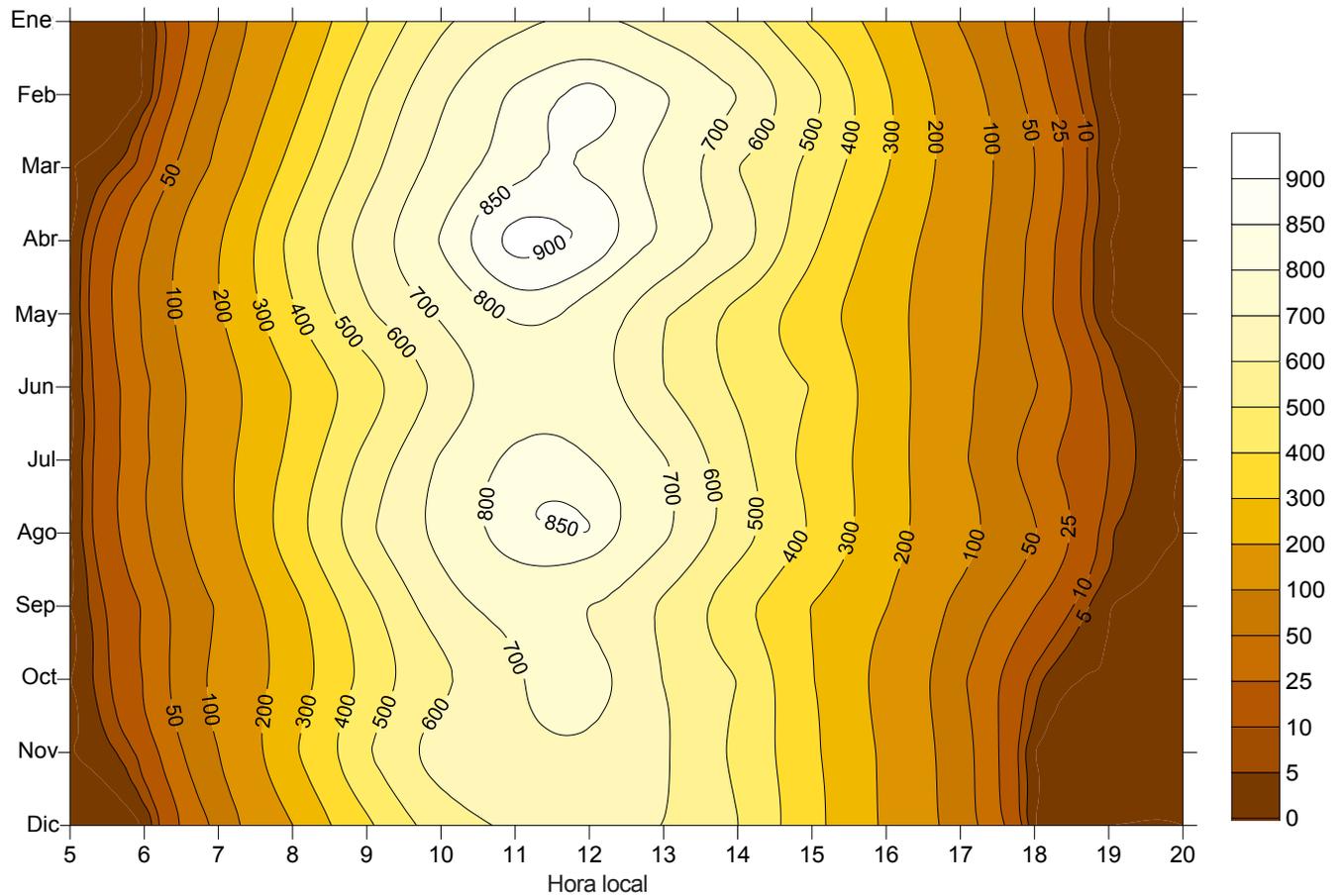


Figura 4.1: Irradiancia global, media horaria en W/m²

Tabla 4.14 Irradiancia global, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		34	123	299	500	667	764	771	669	536	378	236	106	36	8	
Máx		53	191	432	643	806	923	896	810	703	529	314	152	53	10	
Mín		14	49	189	380	544	615	642	580	421	298	169	55	7	6	

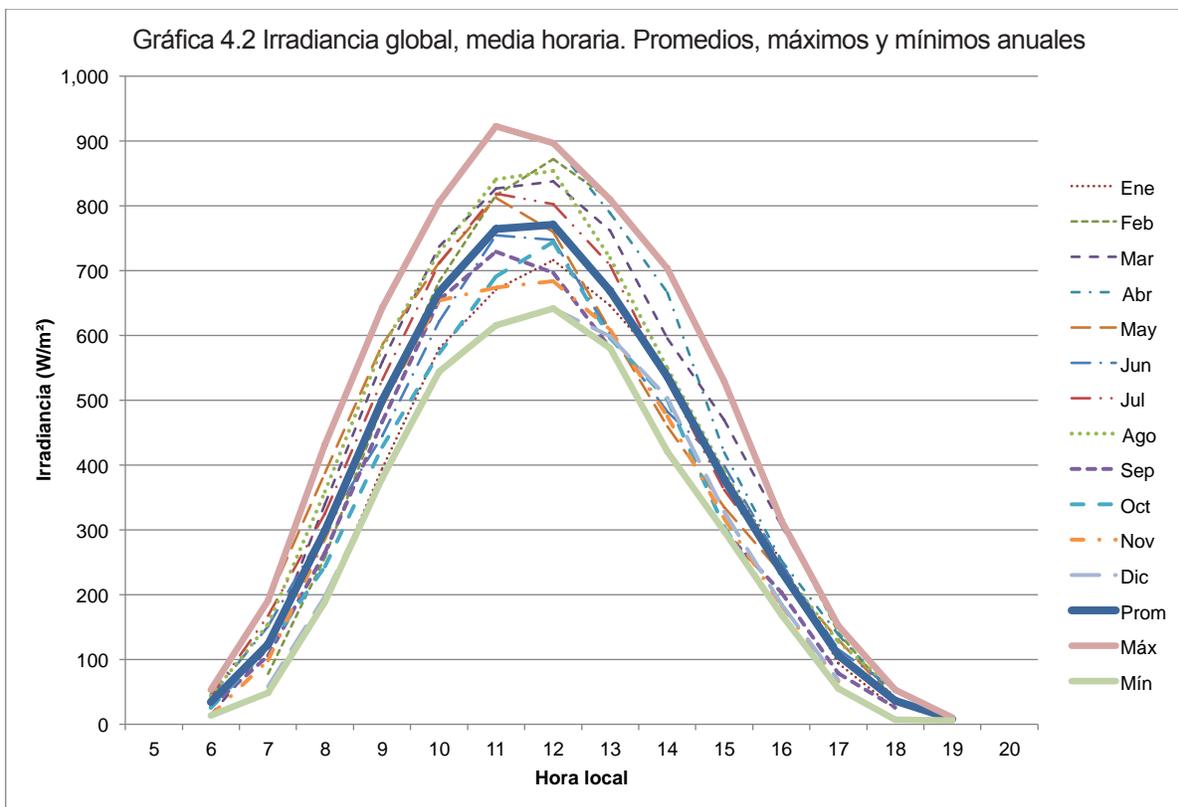


Tabla 4.15 Irradiancia difusa, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			30	77	124	150	185	211	223	222	187	131	62	21		
Feb			38	75	100	124	145	197	218	214	192	139	79	31		
Mar		11	41	72	111	169	181	216	220	215	196	134	80	34		
Abr		31	80	122	157	188	235	248	264	263	225	157	93	33		
May		40	110	182	248	283	331	349	310	268	213	151	93	33		
Jun		39	115	196	271	328	362	356	345	277	240	177	102	46	8	
Jul		36	99	169	229	285	315	295	284	255	216	169	86	28	10	
Ago		34	86	170	240	280	303	305	323	284	219	166	93	44	6	
Sep		24	77	161	242	328	355	373	306	253	209	151	61	23		
Oct		23	78	148	219	274	297	285	251	258	176	108	44	7		
Nov		12	56	113	156	185	228	255	249	211	158	102	44			
Dic			40	101	156	191	208	211	216	200	159	104	48			

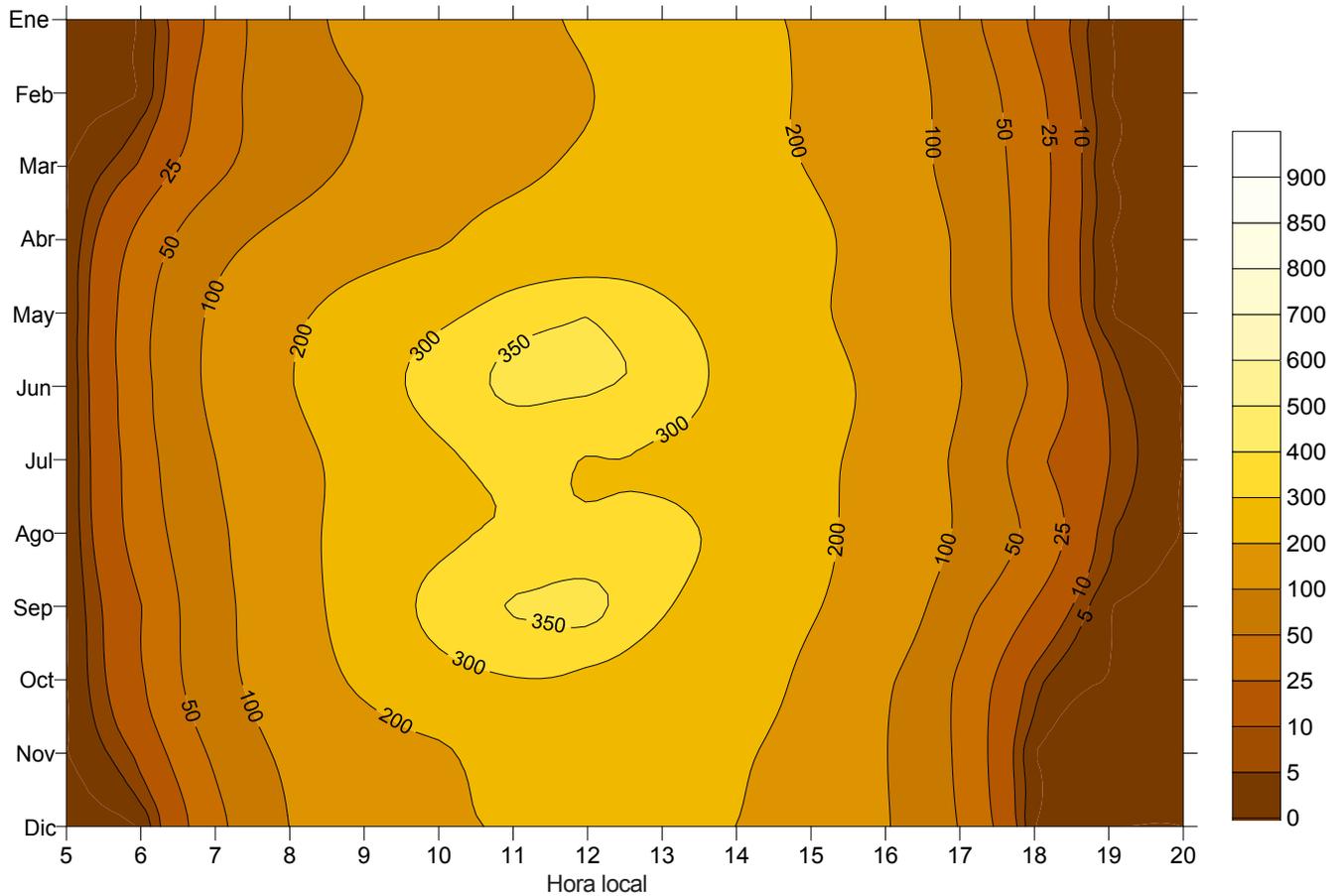


Figura 4.2: Irradiancia difusa, media horaria en W/m²

Tabla 4.16 Irradiancia difusa, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		28	71	132	188	232	262	275	267	243	199	141	74	30	8	
Máx		40	115	196	271	328	362	373	345	284	240	177	102	46	10	
Mín		11	30	72	100	124	145	197	216	200	158	102	44	7	6	

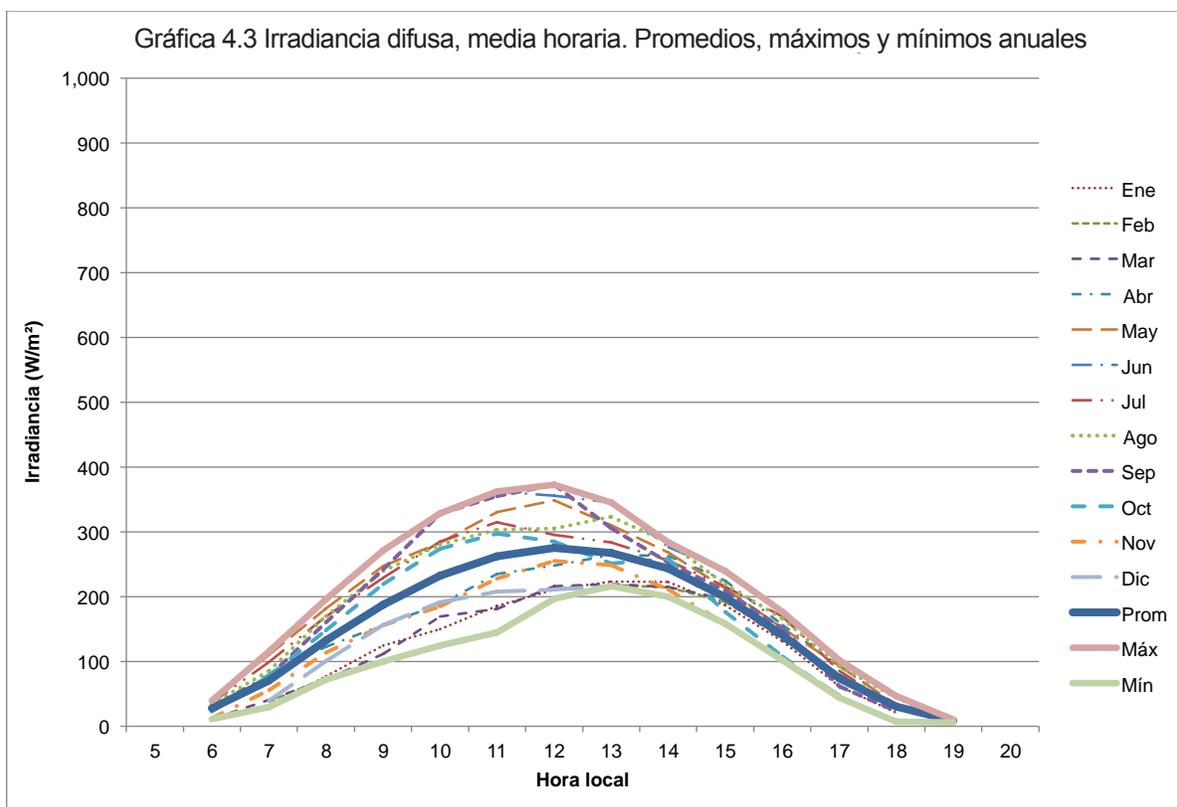


Tabla 4.17 Irradiancia normal directa, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			155	377	543	649	626	615	525	439	334	285	141	28		
Feb			236	517	676	728	748	701	619	558	459	331	209	50		
Mar		58	379	636	717	716	708	634	556	430	375	318	231	111		
Abr		119	392	619	702	726	716	645	533	450	258	172	133	46		
May		78	247	377	460	483	484	391	292	207	157	142	94	26		
Jun		23	107	201	237	332	398	378	253	224	205	119	37	38		
Jul		47	221	305	426	494	517	493	419	293	183	119	55	22	1	
Ago		65	245	376	487	518	553	537	394	288	220	122	96	47		
Sep		27	109	212	329	390	394	327	287	195	129	107	70	20		
Oct		35	172	220	331	384	456	516	407	325	222	160	61	2		
Nov		5	224	457	605	678	574	533	471	394	312	256	140			
Dic			120	309	458	560	565	570	524	472	337	252	121			

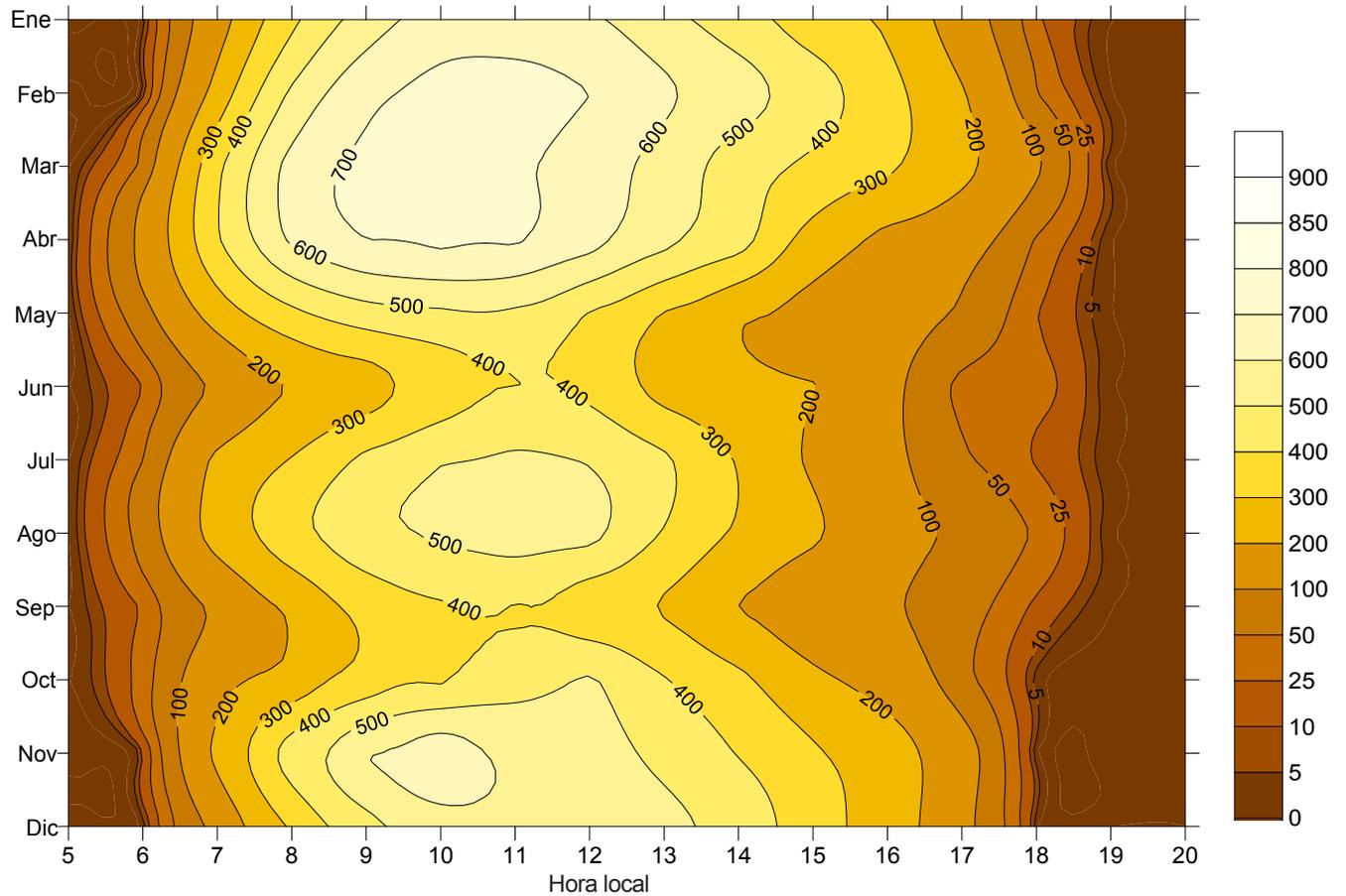


Figura 4.3: Irradiancia normal directa, media horaria en W/m²

Tabla 4.18 Irradiancia normal directa, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		51	217	384	498	555	562	528	440	356	266	199	116	39	1	
Máx		119	392	636	717	728	748	701	619	558	459	331	231	111	1	
Mín		5	107	201	237	332	394	327	253	195	129	107	37	2	1	

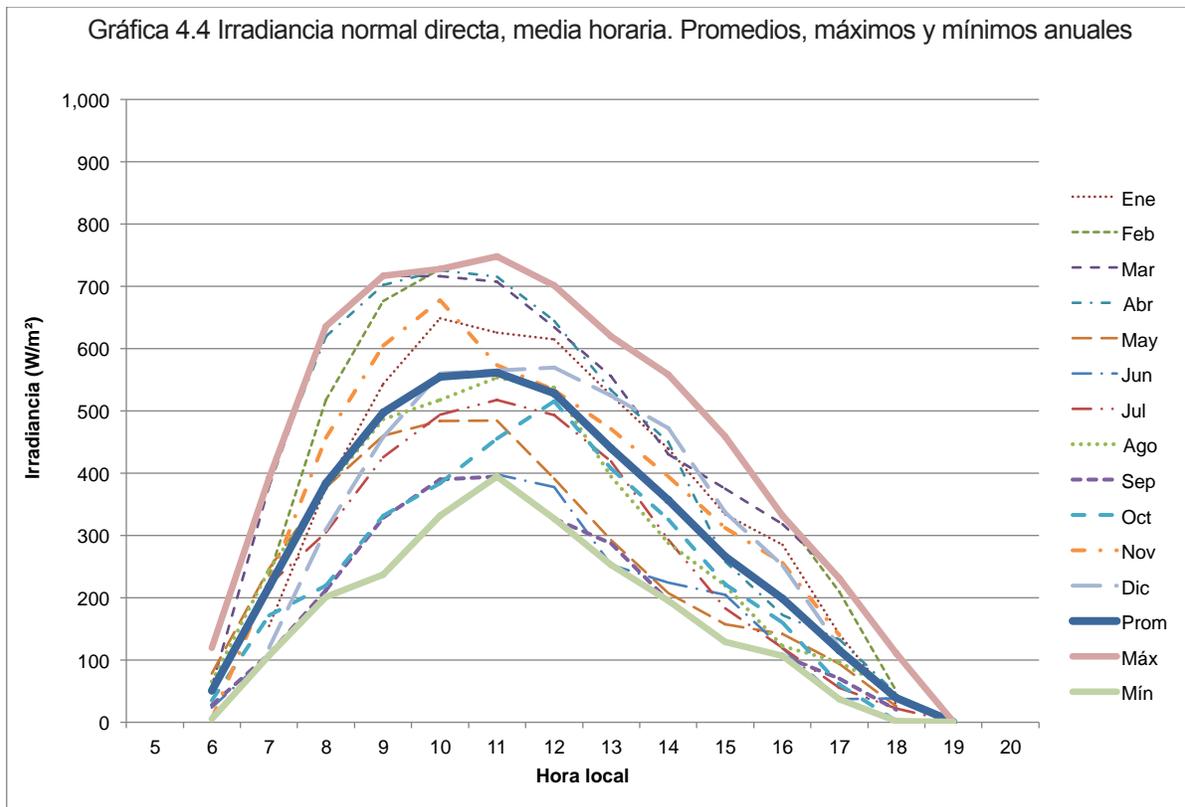


Tabla 4.20 Iluminancia global, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		4	13	31	52	69	78	78	68	55	39	24	11	4	1	
Máx		6	20	46	68	84	95	91	81	70	52	33	16	6	1	
Mín		2	5	19	37	53	59	62	57	45	31	17	6	1	1	

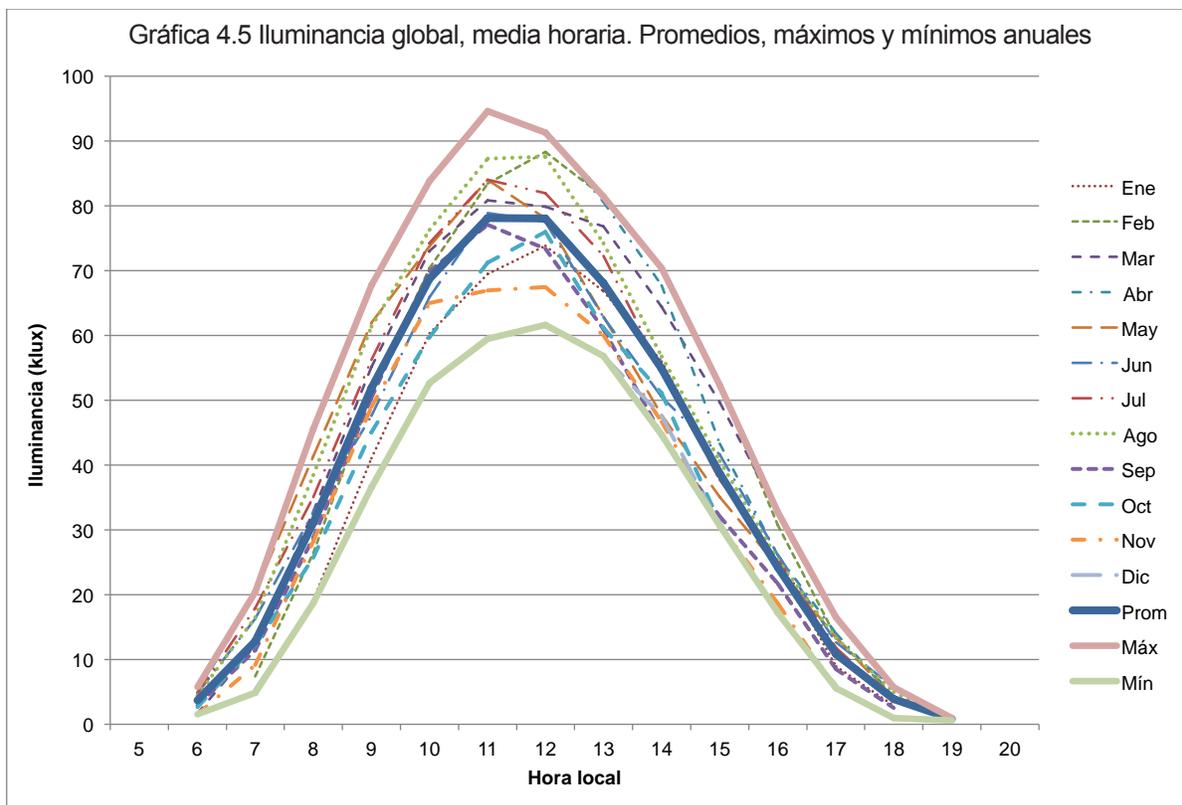


Tabla 4.21 Iluminancia difusa, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			4	10	16	19	23	27	28	27	23	16	7	3		
Feb			5	10	14	17	20	26	28	28	24	17	10	4		
Mar		2	4	7	11	18	19	21	20	20	17	13	9	4		
Abr		4	10	16	20	24	29	30	31	31	26	18	11	4		
May		4	12	21	29	33	39	40	35	30	24	17	10	4		
Jun		4	13	22	30	38	42	41	39	32	27	20	12	5	1	
Jul		4	11	19	26	33	37	35	34	30	25	19	10	3	1	
Ago		4	10	20	28	33	36	37	38	33	25	19	11	5	1	
Sep		3	8	18	27	37	40	42	35	29	23	17	7	2		
Oct		3	9	17	25	32	35	34	30	30	21	13	5	1		
Nov		2	6	14	19	23	27	30	29	25	18	12	5			
Dic			4	11	18	22	24	25	26	24	19	12	6			

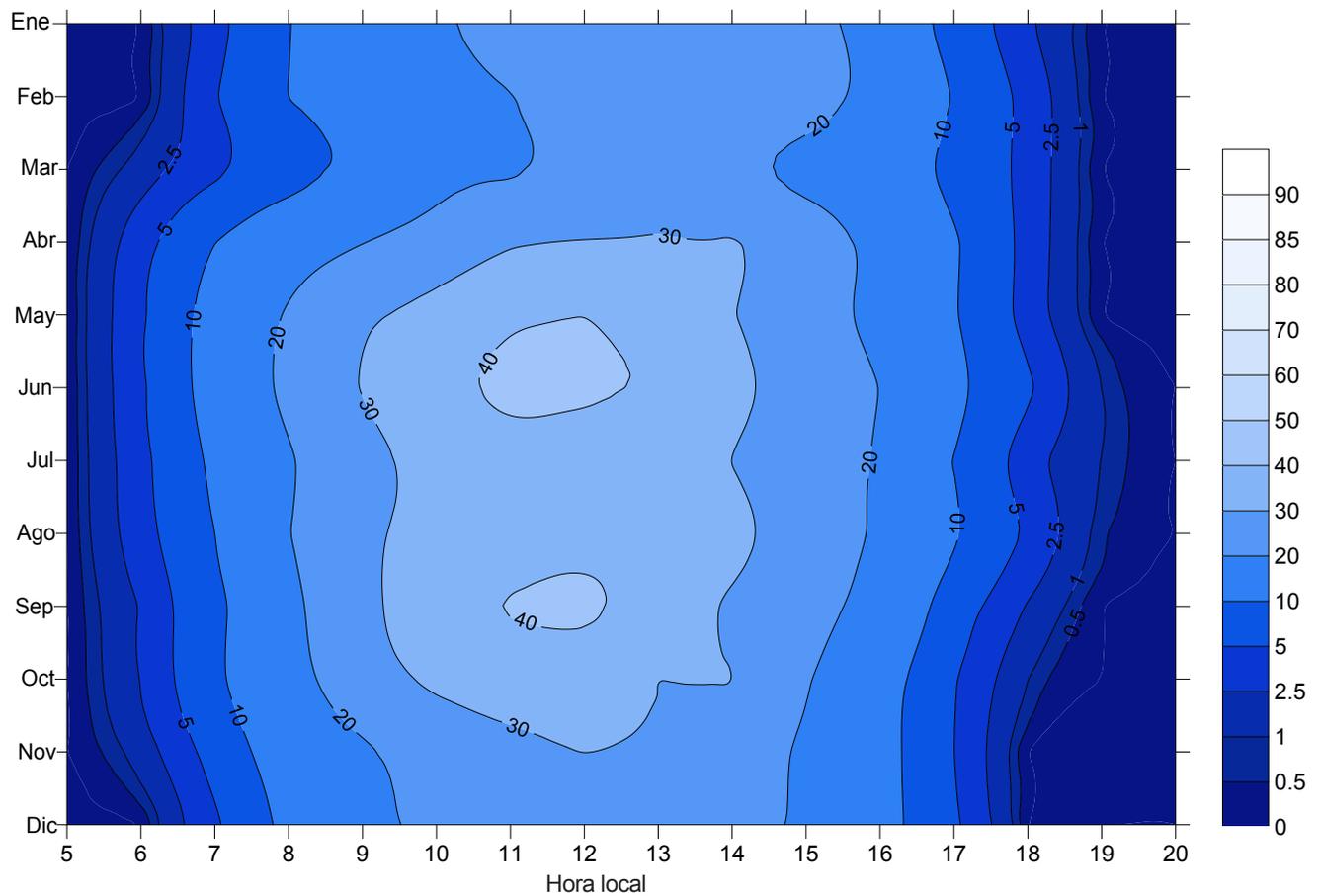


Figura 4.5: Iluminancia difusa, media horaria en klux

Tabla 4.22 Iluminancia difusa, media horaria. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		3	8	15	22	27	31	32	31	28	23	16	8	4	1	
Máx		4	13	22	30	38	42	42	39	33	27	20	12	5	1	
Mín		2	4	7	11	17	19	21	20	20	17	12	5	1	1	

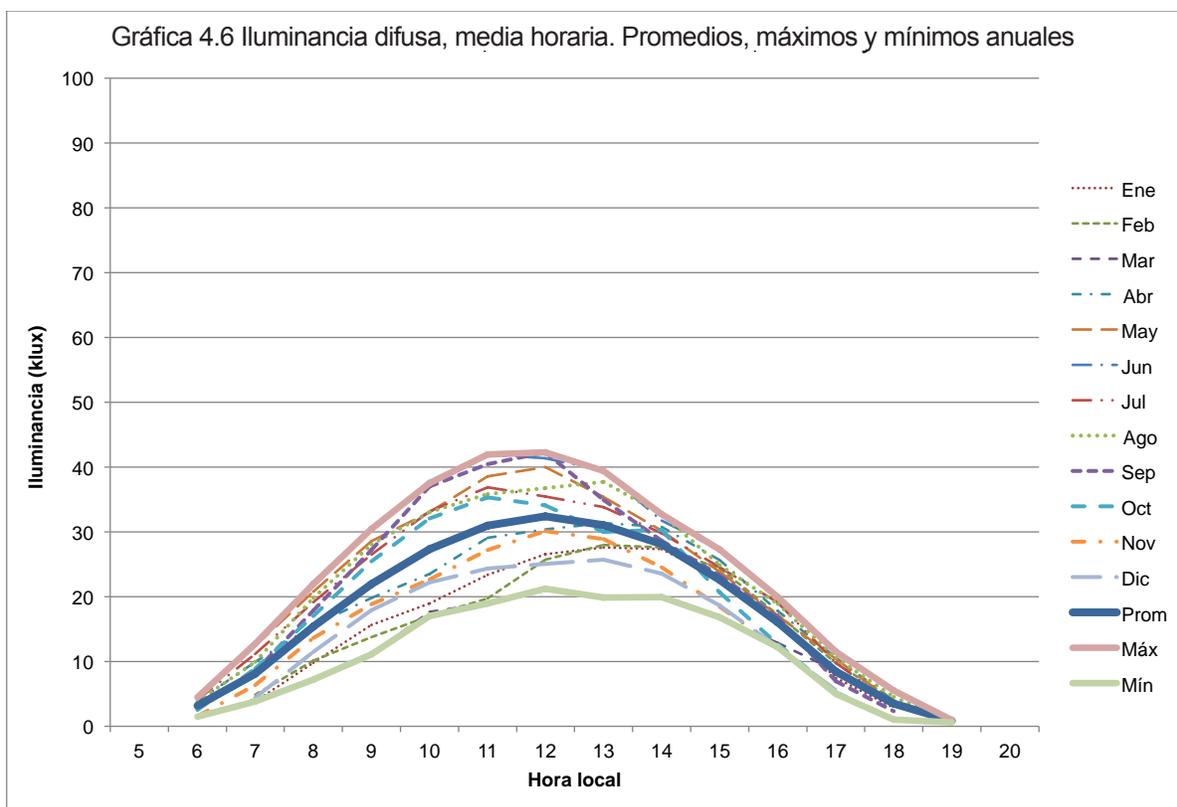


Tabla 4.23 Iluminancia normal directa, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			9	36	57	70	67	65	55	45	32	26	8	1		
Feb			16	53	75	82	84	78	67	59	47	32	17	3		
Mar		1	35	63	73	73	72	65	63	53	46	39	27	12		
Abr		6	33	59	69	71	70	62	52	43	24	16	11	3		
May		5	22	36	44	45	46	37	27	19	15	13	8	2		
Jun		2	9	19	22	32	38	36	23	21	19	11	3	2		
Jul		4	21	30	42	48	50	47	40	28	18	11	6	2		
Ago		4	21	36	47	50	54	51	38	27	21	12	8	3		
Sep		2	10	21	33	38	38	31	28	19	13	10	6	1		
Oct		1	14	20	32	37	43	50	39	30	20	13	3			
Nov		0	16	42	59	66	56	51	45	37	28	23	5			
Dic			7	26	43	54	54	54	49	44	29	19	5			

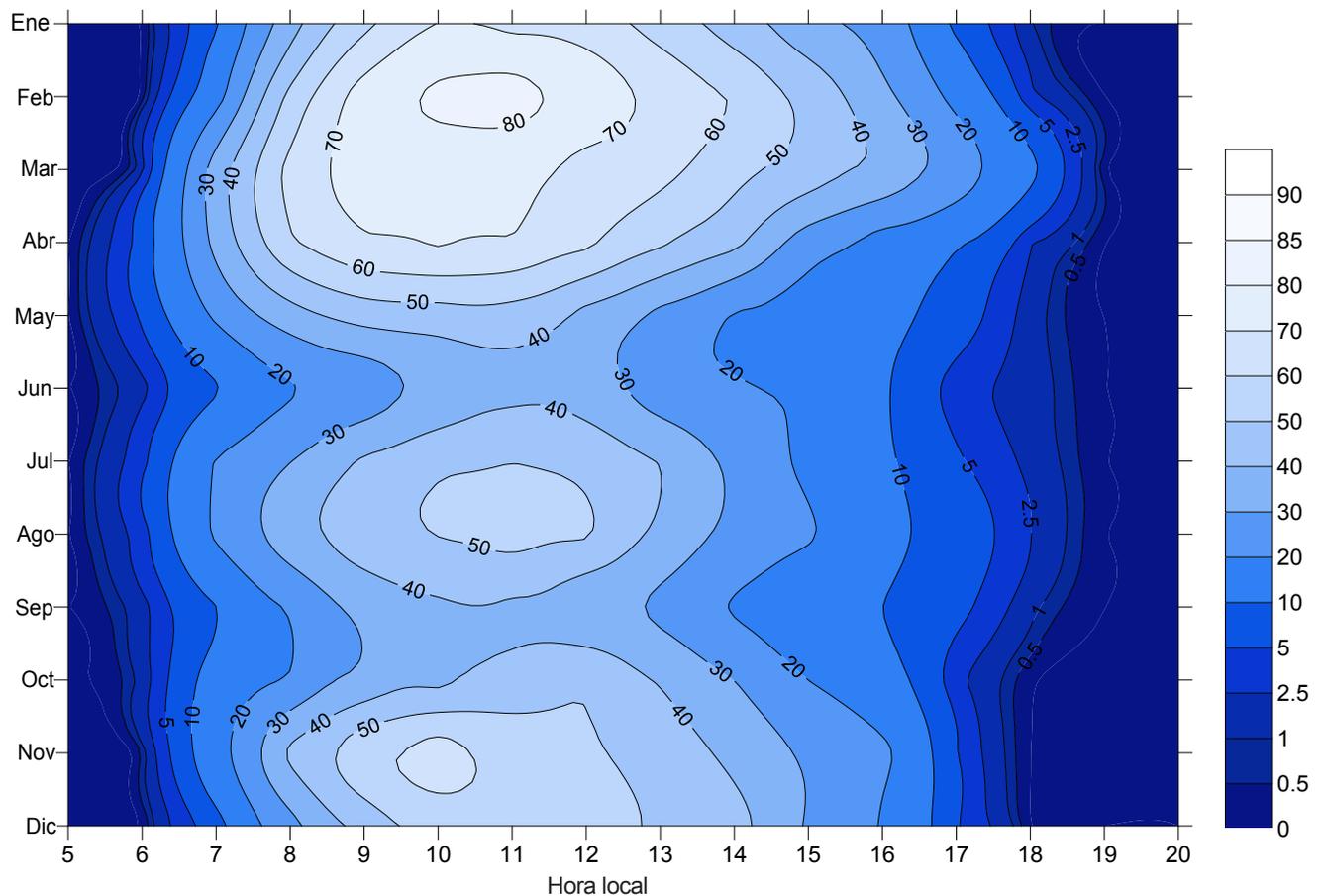


Figura 4.6: Iluminancia normal directa, media horaria en klux

Tabla 4.24 Iluminancia normal directa, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		3	18	37	50	56	56	52	44	35	26	19	9	3		
Máx		6	35	63	75	82	84	78	67	59	47	39	27	12		
Mín		0	7	19	22	32	38	31	23	19	13	10	3	1		

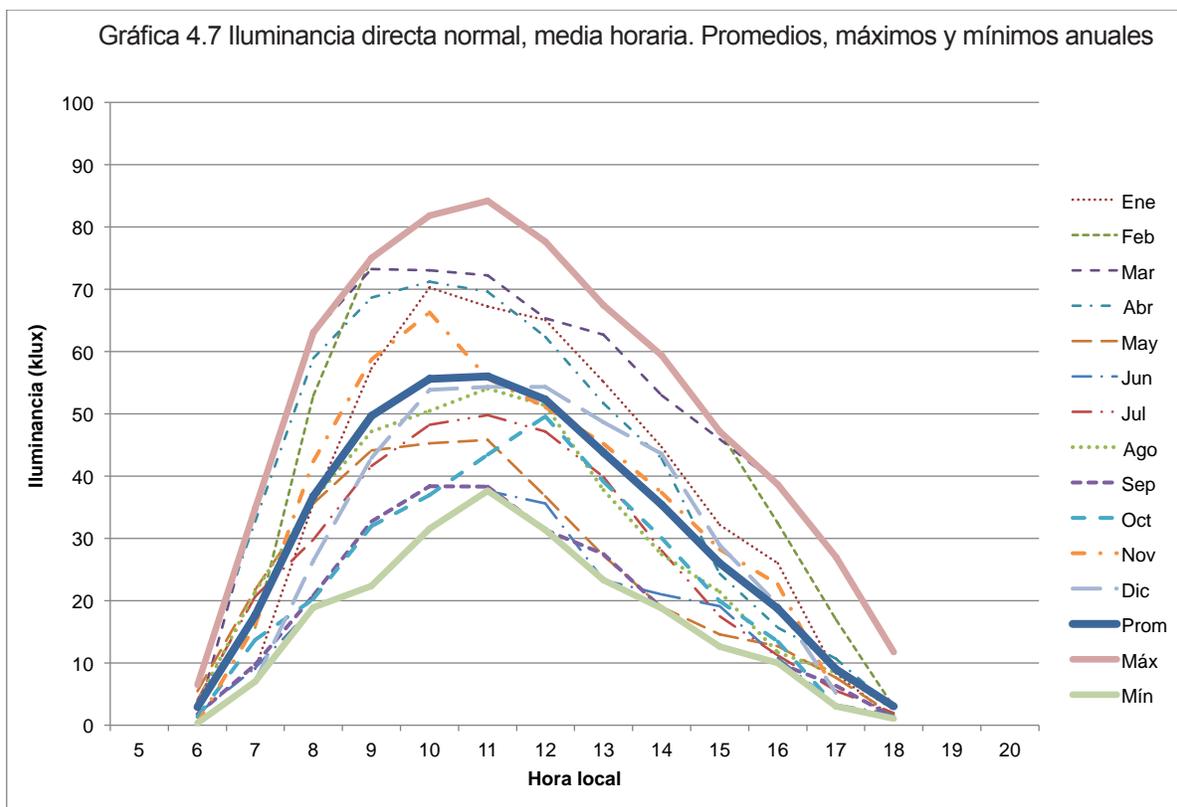


Tabla 4.25 Irradiancia vertical Este, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			197	437	529	462	289	131	85	71	58	41	21	7		
Feb			322	631	685	559	355	144	81	69	58	44	26	10		
Mar		110	436	706	697	530	304	118	79	67	58	45	26	12		
Abr		184	495	682	642	493	303	126	91	82	74	59	35	13		
May		140	351	494	497	394	266	143	106	87	71	53	35	16		
Jun		61	190	319	335	335	262	154	125	98	82	59	37	18	4	
Jul		87	305	408	473	411	285	141	98	84	73	58	34	16	3	
Ago		124	354	494	542	441	298	149	108	91	73	59	41	18	2	
Sep		70	177	310	409	382	256	149	106	89	70	54	27	11		
Oct		55	244	313	385	323	222	115	85	78	58	38	17	3		
Nov		40	278	498	531	410	212	108	85	69	52	35	16			
Dic			171	362	445	382	234	106	81	67	51	35	16			

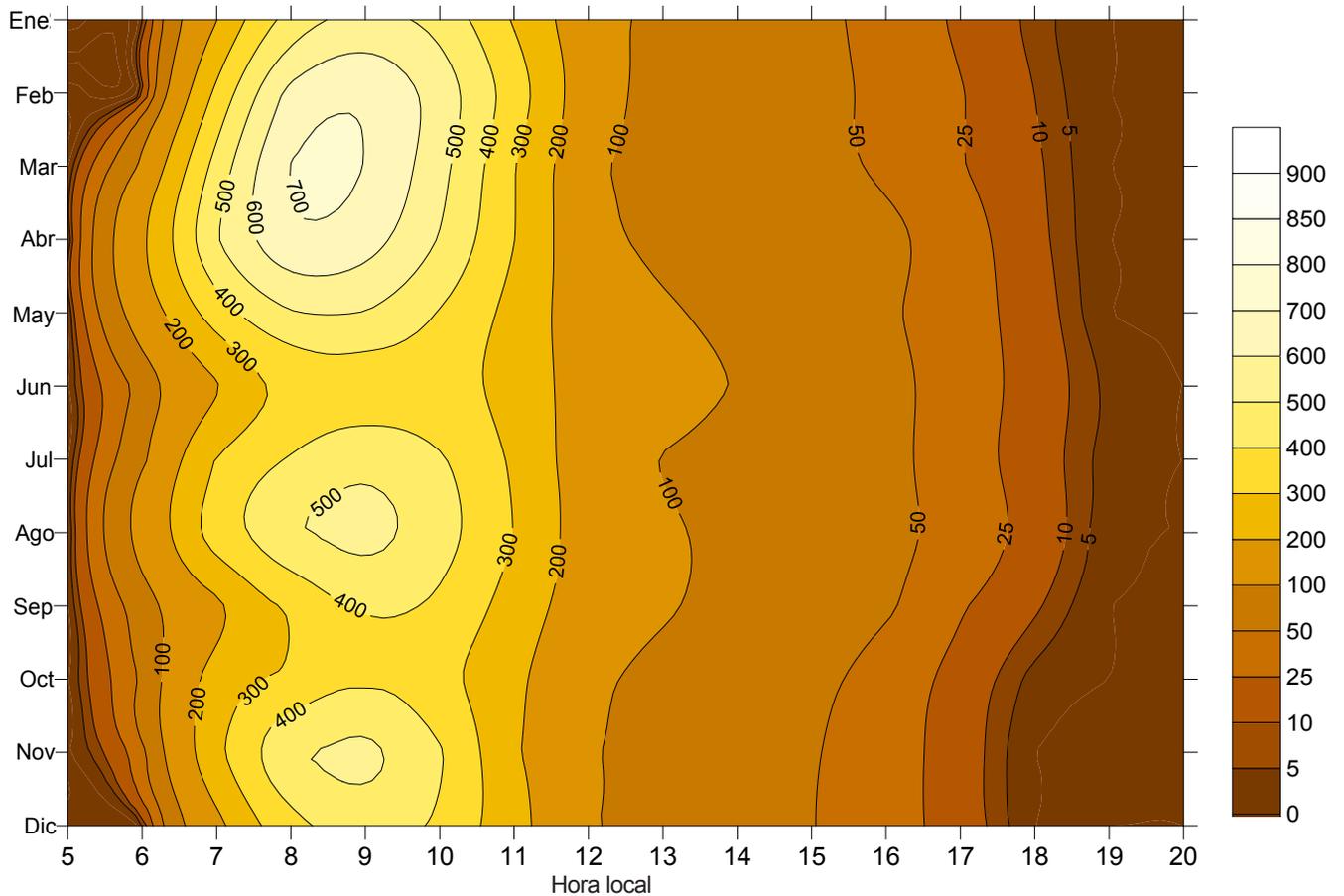


Figura 4.7: Irradiancia vertical este, media horaria en W/m²

Tabla 4.26 Irradiancia vertical Este, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		97	293	471	514	427	274	132	94	79	65	48	28	12	3	
Máx		184	495	706	697	559	355	154	125	98	82	59	41	18	4	
Mín		40	171	310	335	323	212	106	79	67	51	35	16	3	2	

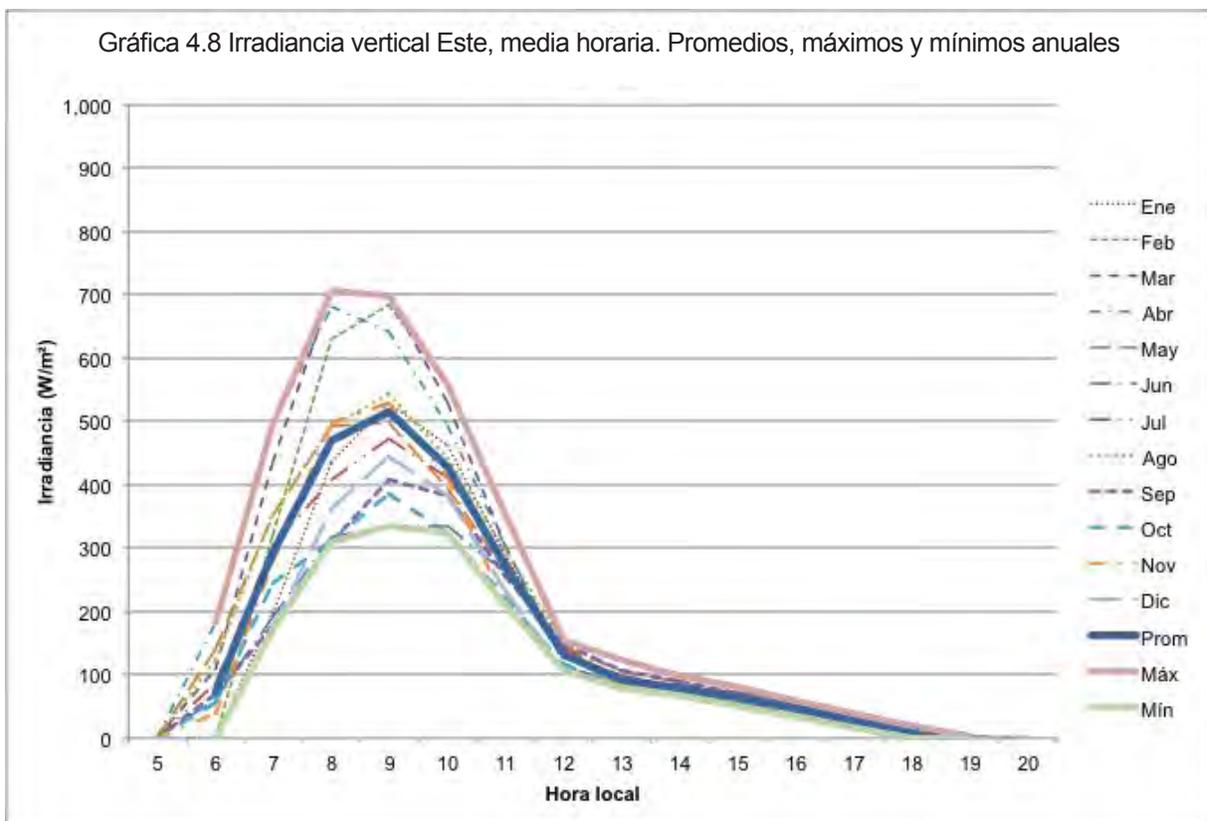


Tabla 4.27 Irradiancia vertical Sur, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			111	280	441	554	566	565	488	411	298	218	107	26		
Feb			121	299	430	506	546	545	486	421	323	210	116	29		
Mar		8	80	189	263	326	346	333	297	219	152	97	39	14		
Abr		18	53	100	146	186	211	203	174	135	96	69	40	15		
May		17	48	82	102	118	132	133	110	96	74	55	34	15		
Jun		15	44	75	100	119	129	128	124	103	85	61	38	18	2	
Jul		13	40	66	89	106	119	111	107	92	76	58	33	15	3	
Ago		16	45	89	126	155	170	169	142	114	84	65	39	16	4	
Sep		14	47	106	182	248	265	251	211	153	106	69	28	11		
Oct		19	101	169	267	324	383	392	314	254	163	88	35	3		
Nov		20	152	336	477	554	508	485	430	334	252	169	79			
Dic			104	268	427	526	553	545	501	425	295	199	89			

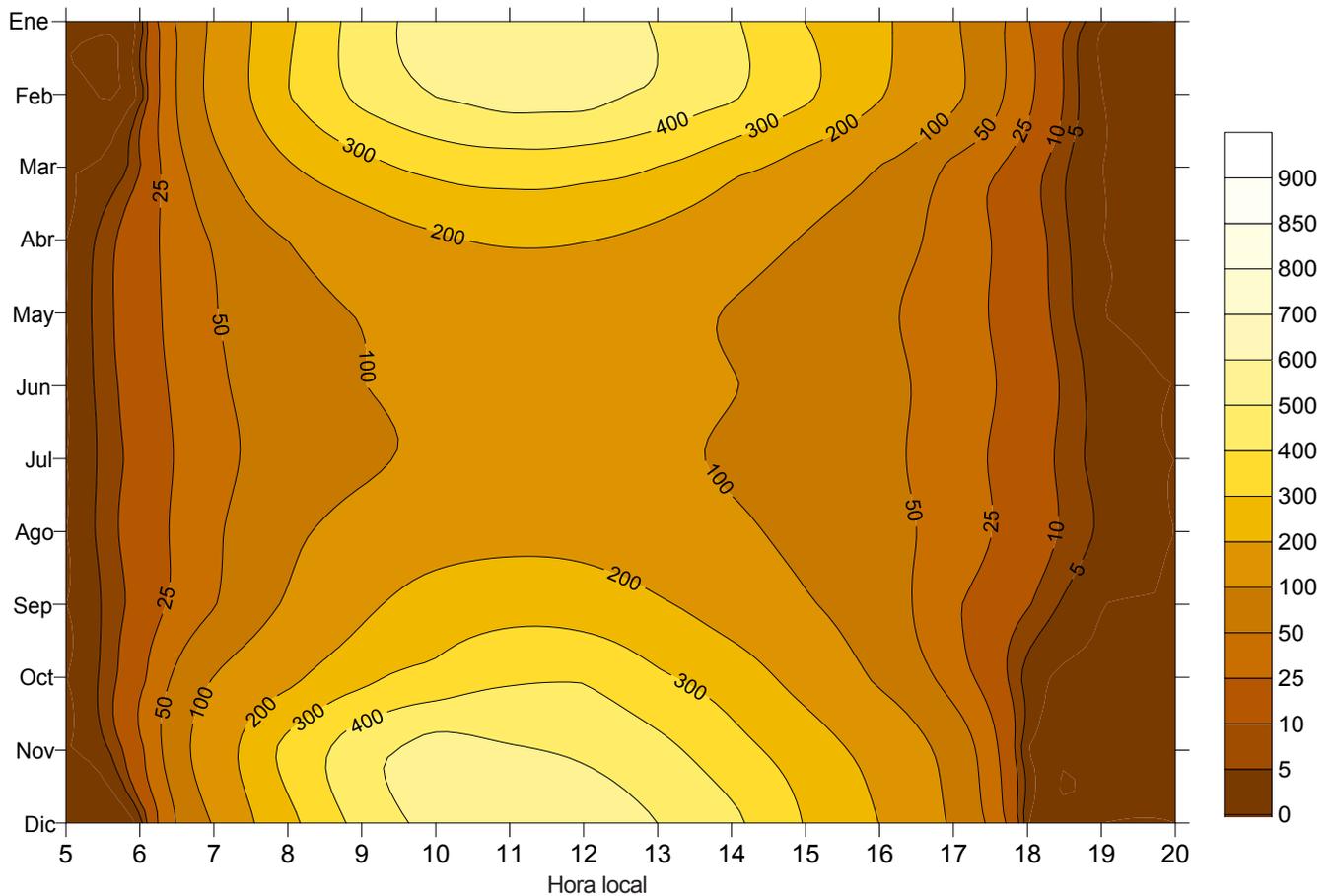


Figura 4.8: Irradiancia vertical sur, media horaria en W/m²

Tabla 4.28 Irradiancia vertical Sur, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		16	79	171	254	310	327	322	282	230	167	113	56	16	3	
Máx		20	152	336	477	554	566	565	501	425	323	218	116	29	4	
Mín		8	40	66	89	106	119	111	107	92	74	55	28	3	2	

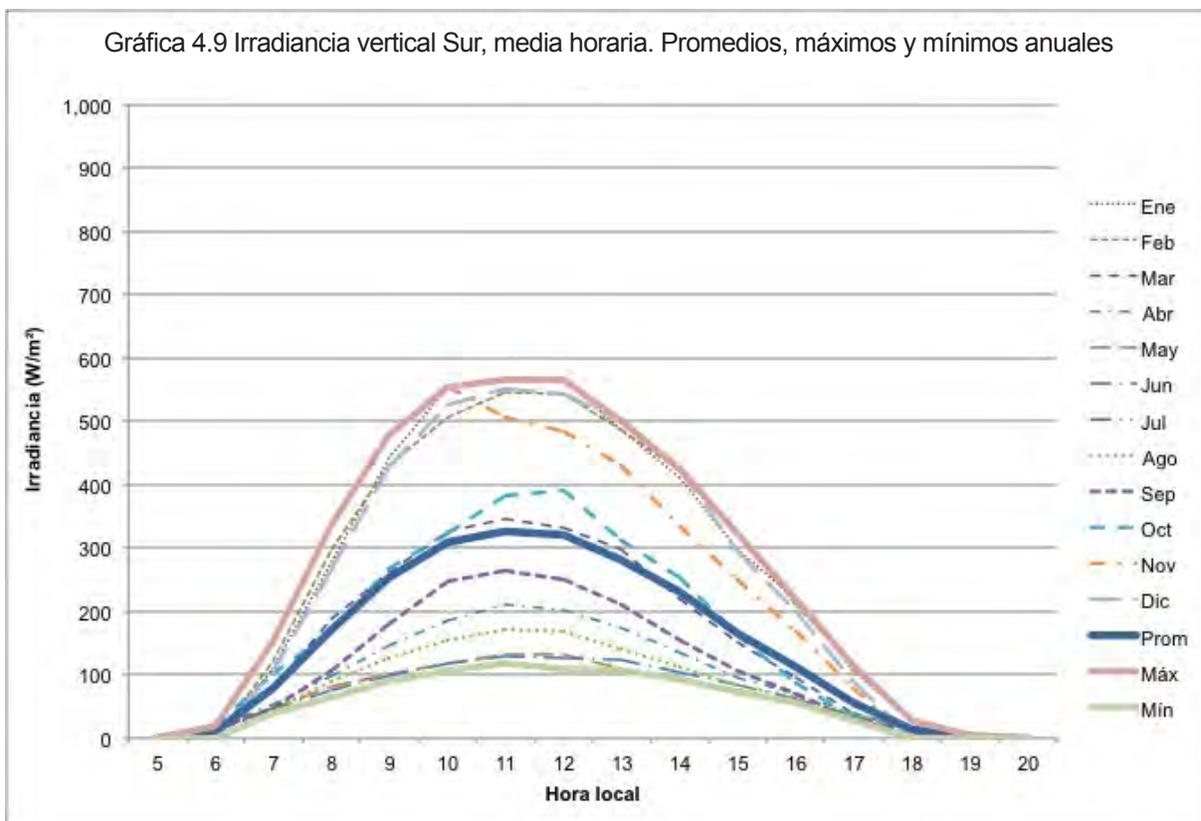


Tabla 4.29 Irradiancia vertical Oeste, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			12	28	42	53	70	107	225	330	365	361	228	67		
Feb			16	29	36	43	57	91	226	390	463	430	338	98		
Mar		5	18	29	36	47	60	90	211	311	385	390	318	166		
Abr		12	29	40	49	59	79	112	234	336	317	285	243	102		
May		13	35	52	68	82	103	135	178	216	203	232	183	80		
Jun		13	35	57	74	91	111	130	185	217	197	151	93	85	5	
Jul		11	31	48	61	78	94	111	185	243	175	161	92	46	5	
Ago		12	29	50	65	76	91	121	204	258	257	196	172	93	3	
Sep		8	26	50	71	94	110	140	213	230	221	194	150	52		
Oct		8	26	43	62	81	101	142	242	321	294	239	110	10		
Nov		5	19	37	48	62	86	143	276	340	359	329	194			
Dic			14	32	48	62	78	121	256	363	361	323	175			

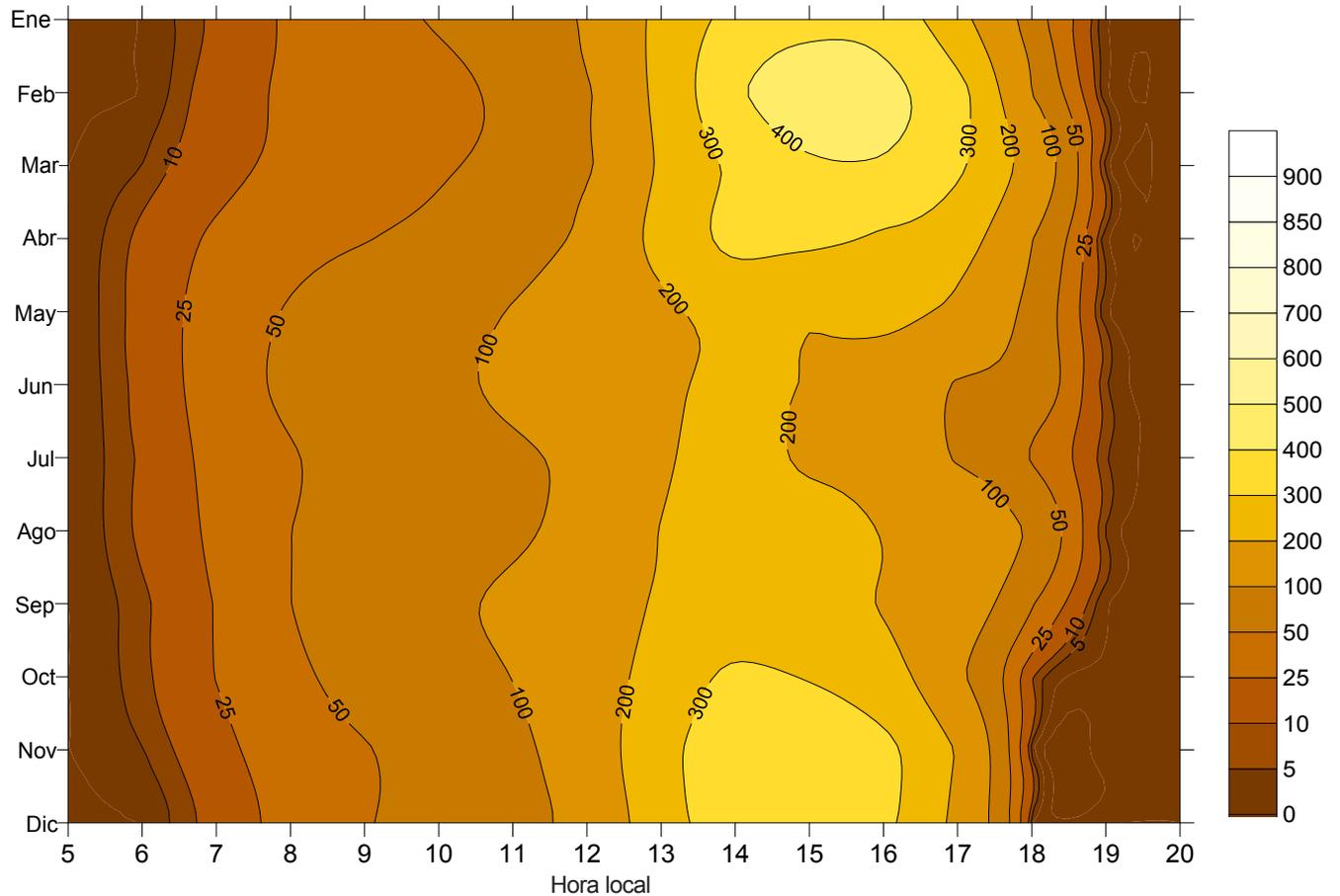


Figura 4.9: Irradiancia vertical oeste, media horaria en W/m²

Tabla 4.30 Irradiancia vertical Oeste, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		10	24	41	55	69	87	120	220	296	300	274	191	80	4	
Máx		13	35	57	74	94	111	143	276	390	463	430	338	166	5	
Mín		5	12	28	36	43	57	90	178	216	175	151	92	10	3	

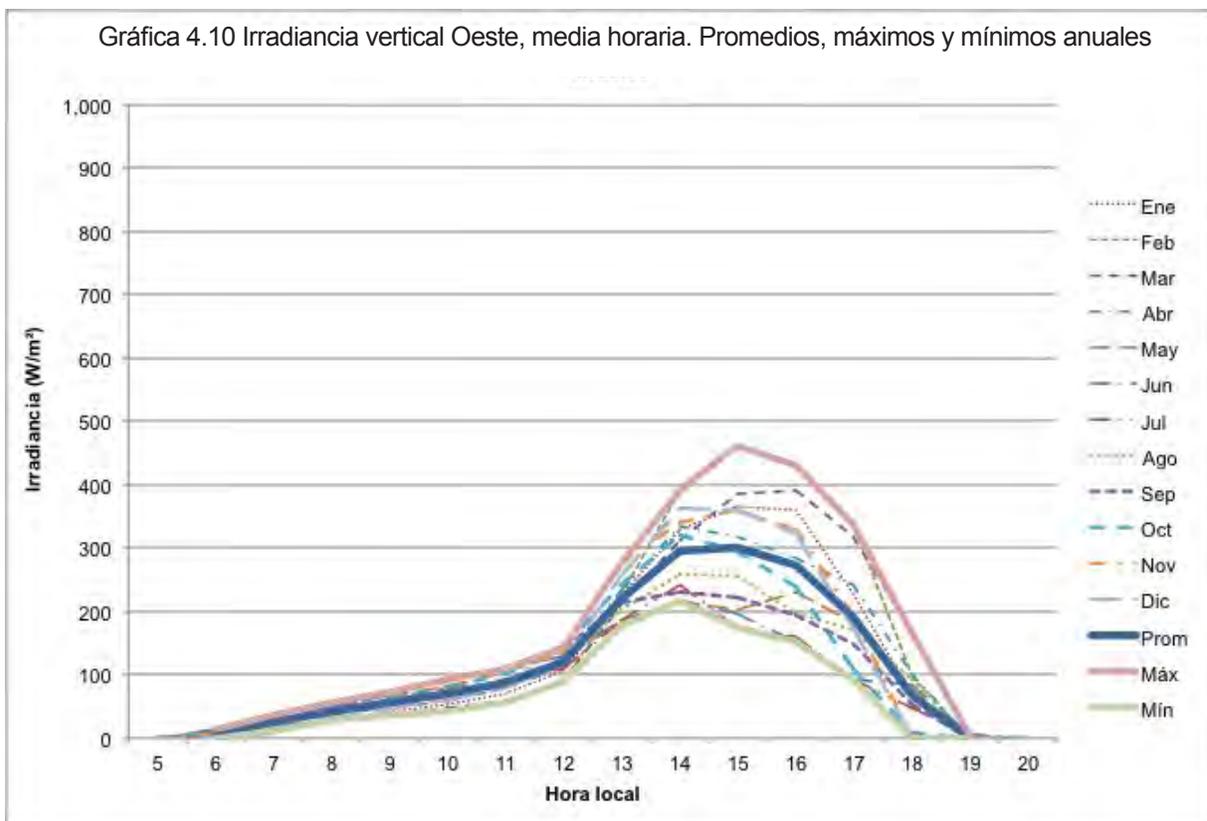


Tabla 4.31 Irradiancia vertical Norte, media horaria en W/m²

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			13	30	42	47	53	59	62	63	56	43	22	7		
Feb			18	33	41	43	47	55	59	63	60	48	30	12		
Mar		8	25	39	45	52	56	63	73	75	73	59	41	23		
Abr		23	48	63	66	69	78	82	91	95	87	75	63	36		
May		39	73	87	100	105	113	123	111	100	93	91	62	32		
Jun		28	67	85	103	121	132	130	129	119	122	104	61	45	3	
Jul		32	66	80	95	105	109	110	106	105	99	92	53	32	2	
Ago		24	53	73	88	92	95	101	106	98	87	74	58	34	2	
Sep		10	31	58	81	98	103	103	97	86	73	56	33	16		
Oct		9	29	48	65	74	78	75	73	74	57	41	19	3		
Nov		5	21	40	49	54	62	70	70	64	50	36	16			
Dic			14	34	49	55	57	57	59	58	50	35	17			

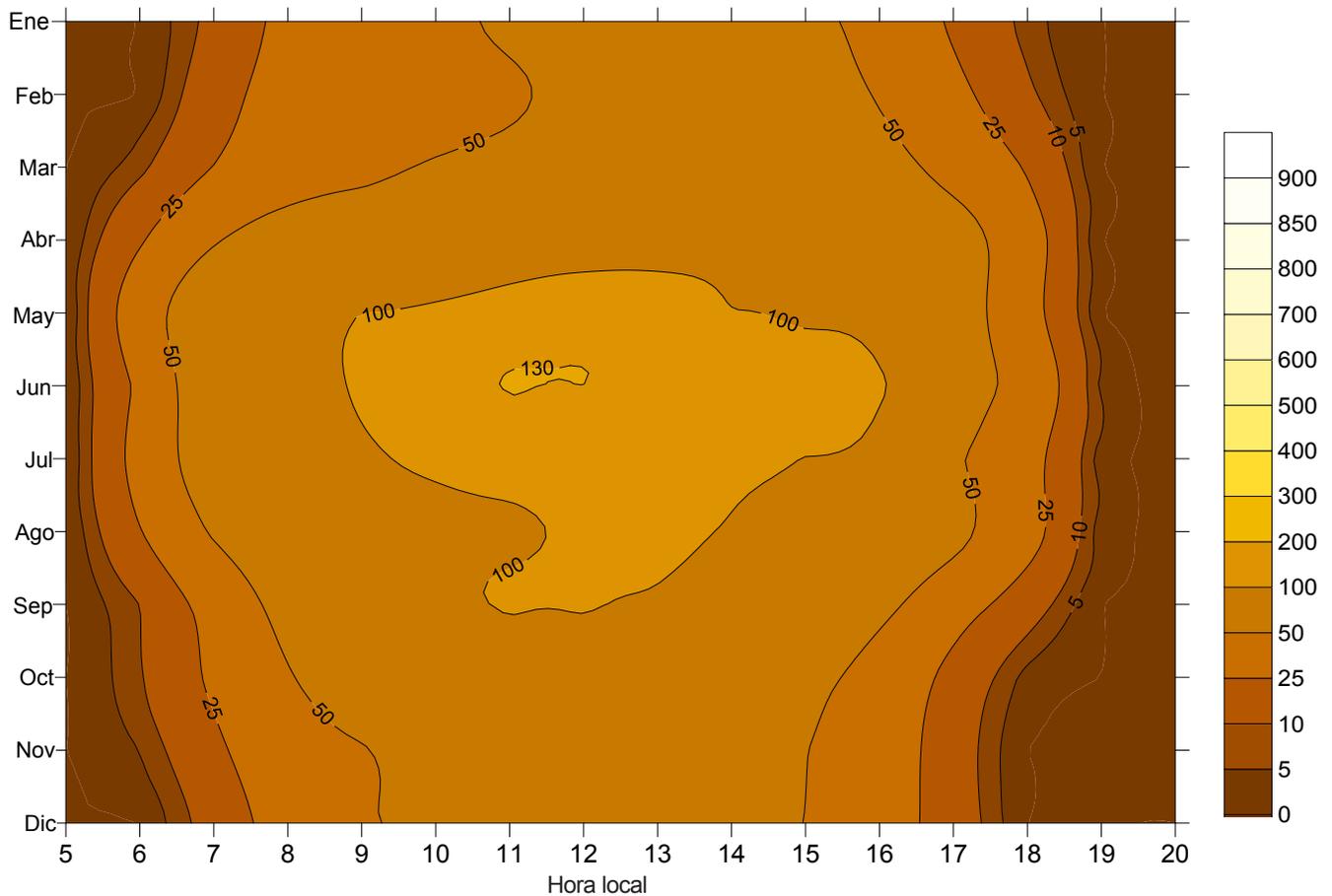


Figura 4.10: Irradiancia vertical norte, media horaria en W/m²

Tabla 4.32 Irradiancia vertical Norte, media horaria en W/m². Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		20	38	56	69	76	82	86	86	83	76	63	40	24	3	
Máx		39	73	87	103	121	132	130	129	119	122	104	63	45	3	
Mín		5	13	30	41	43	47	55	59	58	50	35	16	3	2	

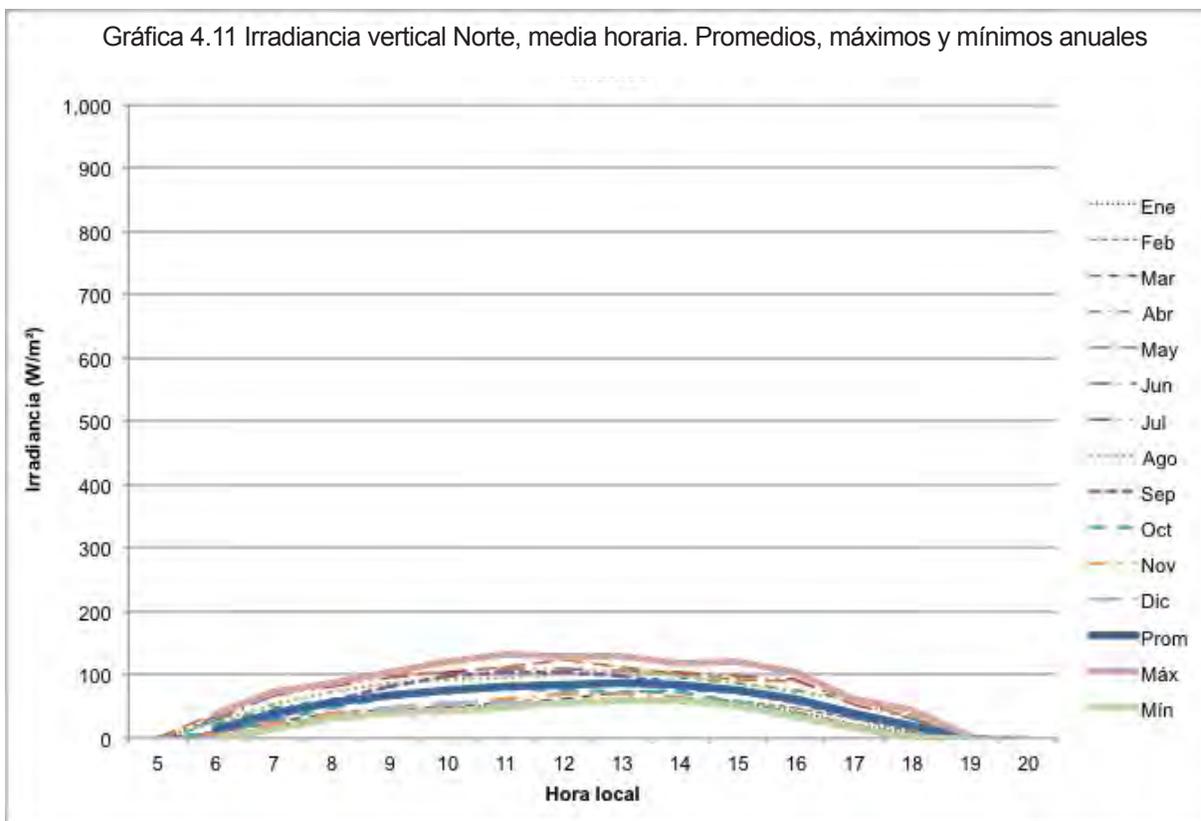


Tabla 4.33 Iluminancia vertical Este, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			12	40	54	49	31	15	10	8	7	5	3	1		
Feb			23	59	70	58	38	17	10	8	7	5	3	2		
Mar		6	37	72	74	57	35	14	9	8	7	6	4	2		
Abr		12	44	70	68	52	33	14	10	9	8	7	4	2		
May		11	34	51	52	42	29	16	12	10	8	6	4	2		
Jun		5	19	34	36	36	29	17	14	11	9	7	4	2	0.3	
Jul		7	30	42	50	44	31	15	11	10	8	7	4	2	0.3	
Ago		9	33	51	56	46	32	16	12	10	8	7	5	2	0.3	
Sep		5	16	31	40	38	26	16	11	9	8	6	3	1		
Oct		3	21	31	38	32	23	12	9	8	6	4	2			
Nov		2	21	47	52	41	22	11	9	8	6	4	2			
Dic			11	33	43	38	24	11	9	8	6	4	2			

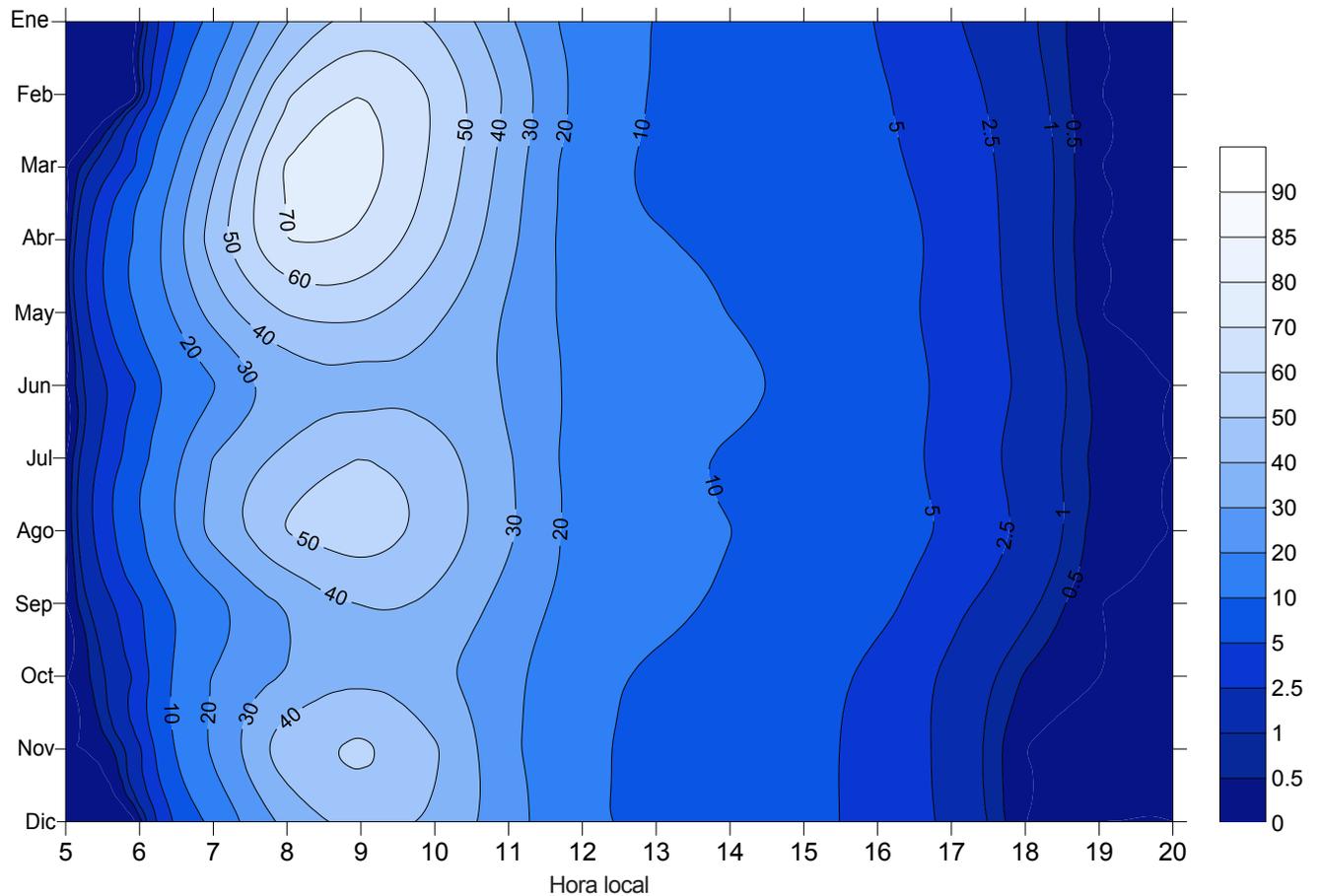


Figura 4.11: Iluminancia vertical este, media horaria en klux

Tabla 4.34 Iluminancia vertical Este, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		7	25	47	53	45	29	14	11	9	7	6	3	2	0.3	
Máx		12	44	72	74	58	38	17	14	11	9	7	5	2	0.3	
Mín		2	11	31	36	32	22	11	9	8	6	4	2	1	0.3	

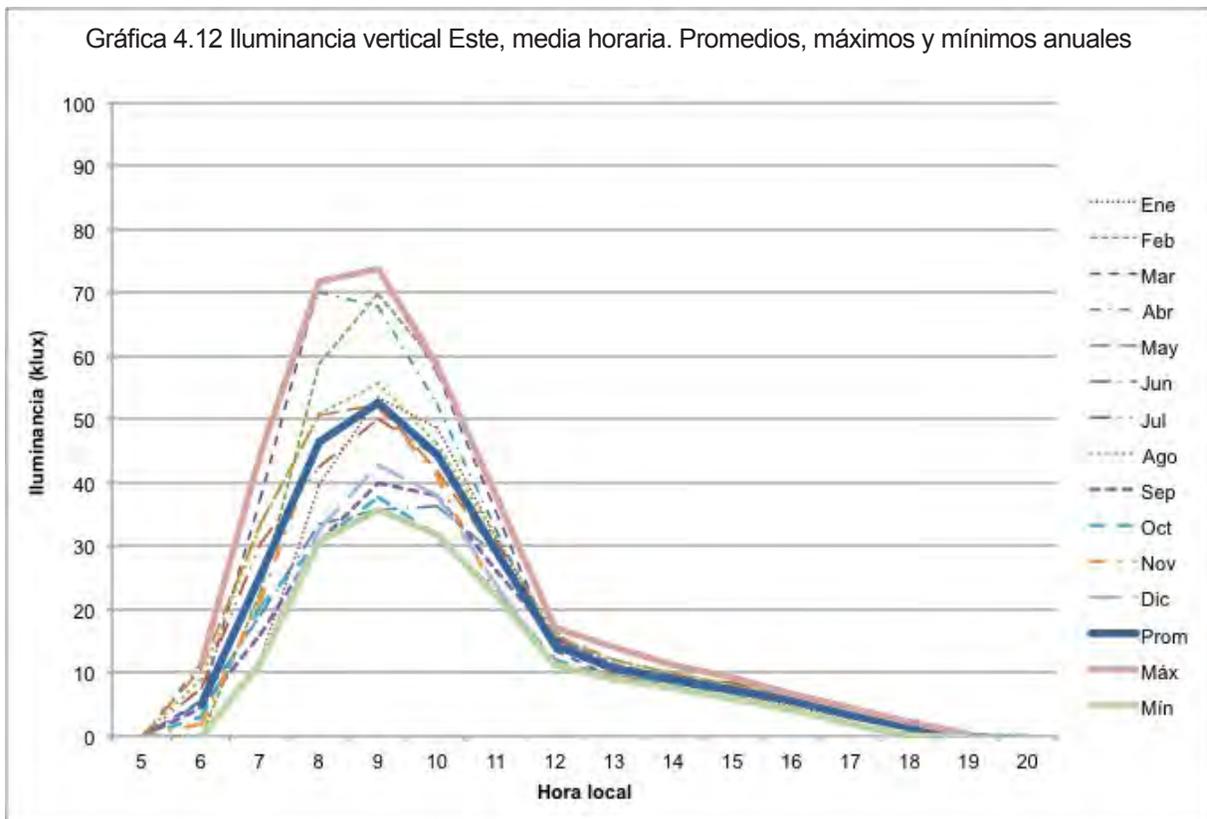


Tabla 4.35 Iluminancia vertical Sur, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			7	26	43	55	57	56	47	39	30	21	9	2		
Feb			9	27	41	49	53	54	48	41	32	21	11	3		
Mar		1	8	19	29	34	36	35	32	26	19	14	7	3		
Abr		2	5	9	14	18	21	20	18	15	11	8	5	2		
May		2	5	8	11	12	14	14	12	11	8	6	4	2		
Jun		2	5	8	10	12	13	14	13	11	9	7	4	2	0.3	
Jul		1	4	7	9	11	12	12	12	10	9	7	4	2	0.3	
Ago		2	4	8	12	15	16	17	15	12	9	7	4	2	0.2	
Sep		1	4	10	17	23	25	24	20	15	11	8	3	1		
Oct		1	9	16	25	30	35	35	28	23	16	9	3			
Nov		1	12	30	44	52	47	43	37	29	23	14	5			
Dic			7	24	40	50	53	52	48	40	28	17	6			

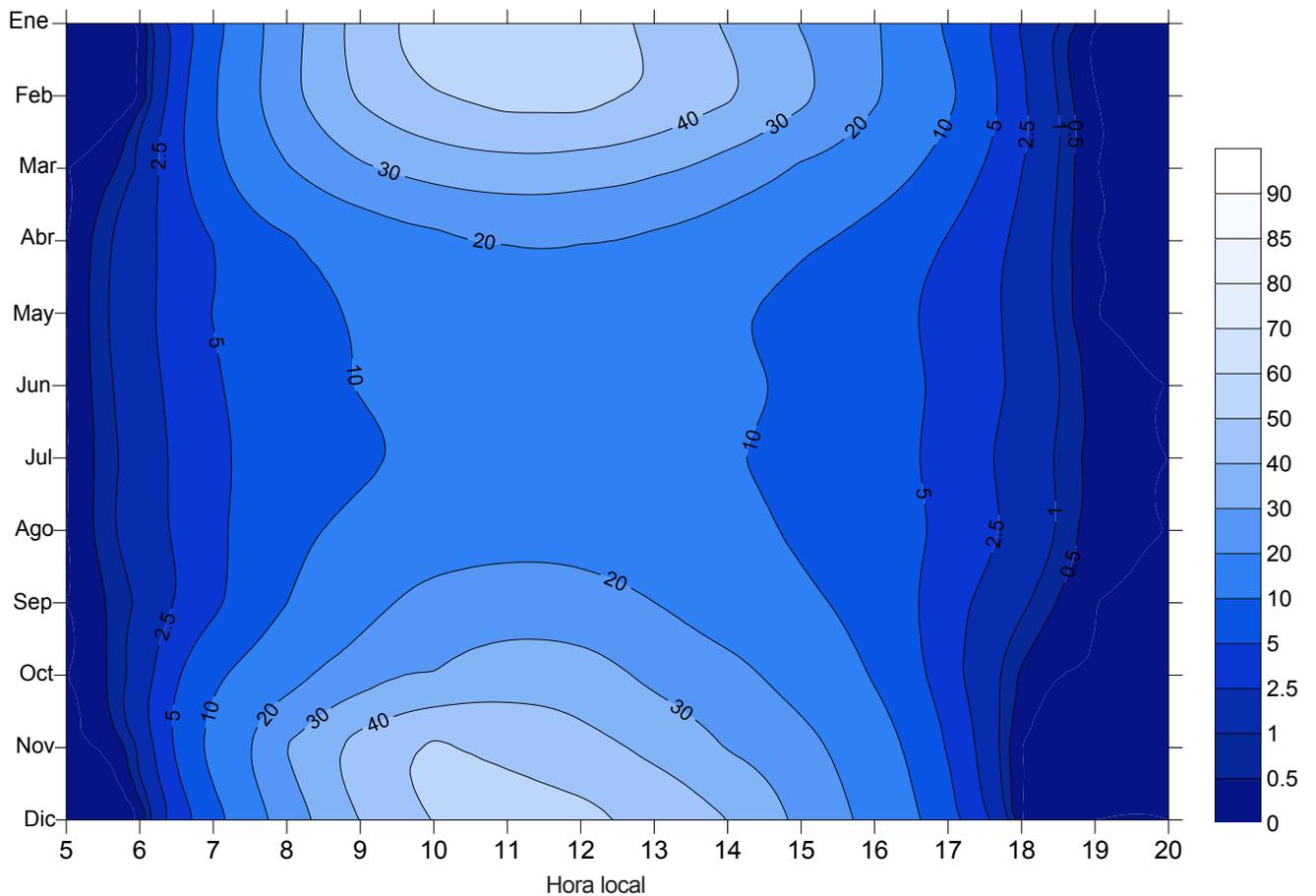


Figura 4.12: Iluminancia vertical sur, media horaria en klux

Tabla 4.36 Iluminancia vertical Sur, media horaria. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		2	7	16	25	30	32	31	27	23	17	11	5	2	0.3	
Máx		2	12	30	44	55	57	56	48	41	32	21	11	3	0.3	
Mín		1	4	7	9	11	12	12	12	10	8	6	3	1	0.2	

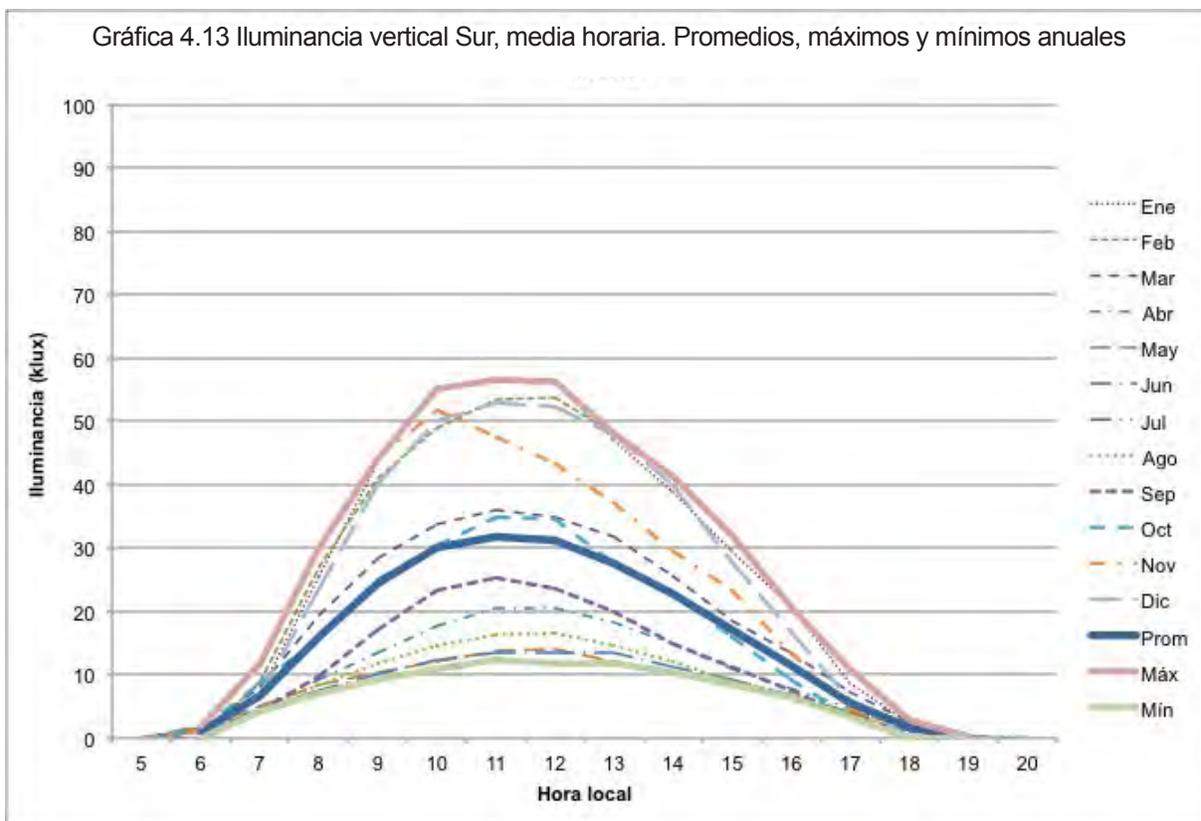


Tabla 4.37 Iluminancia vertical Oeste, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			2	3	5	6	8	11	24	35	37	34	17	4		
Feb			2	3	4	5	6	9	23	40	47	42	28	6		
Mar		1	2	3	4	5	7	9	20	35	44	44	34	13		
Abr		1	3	4	5	6	8	11	23	34	32	29	23	8		
May		2	4	6	7	9	11	14	18	22	20	24	17	7		
Jun		1	4	6	8	10	12	14	19	20	19	16	10	6	0.7	
Jul		1	3	5	6	8	10	11	18	21	15	15	9	5	0.3	
Ago		1	3	5	7	8	9	12	20	22	21	18	16	8	0.3	
Sep		1	3	5	7	9	11	13	20	19	18	17	13	4		
Oct		1	3	4	6	8	10	13	23	28	26	19	7	1		
Nov		1	2	4	5	6	8	14	27	33	34	24	10			
Dic			2	3	5	6	8	12	25	36	34	26	11			

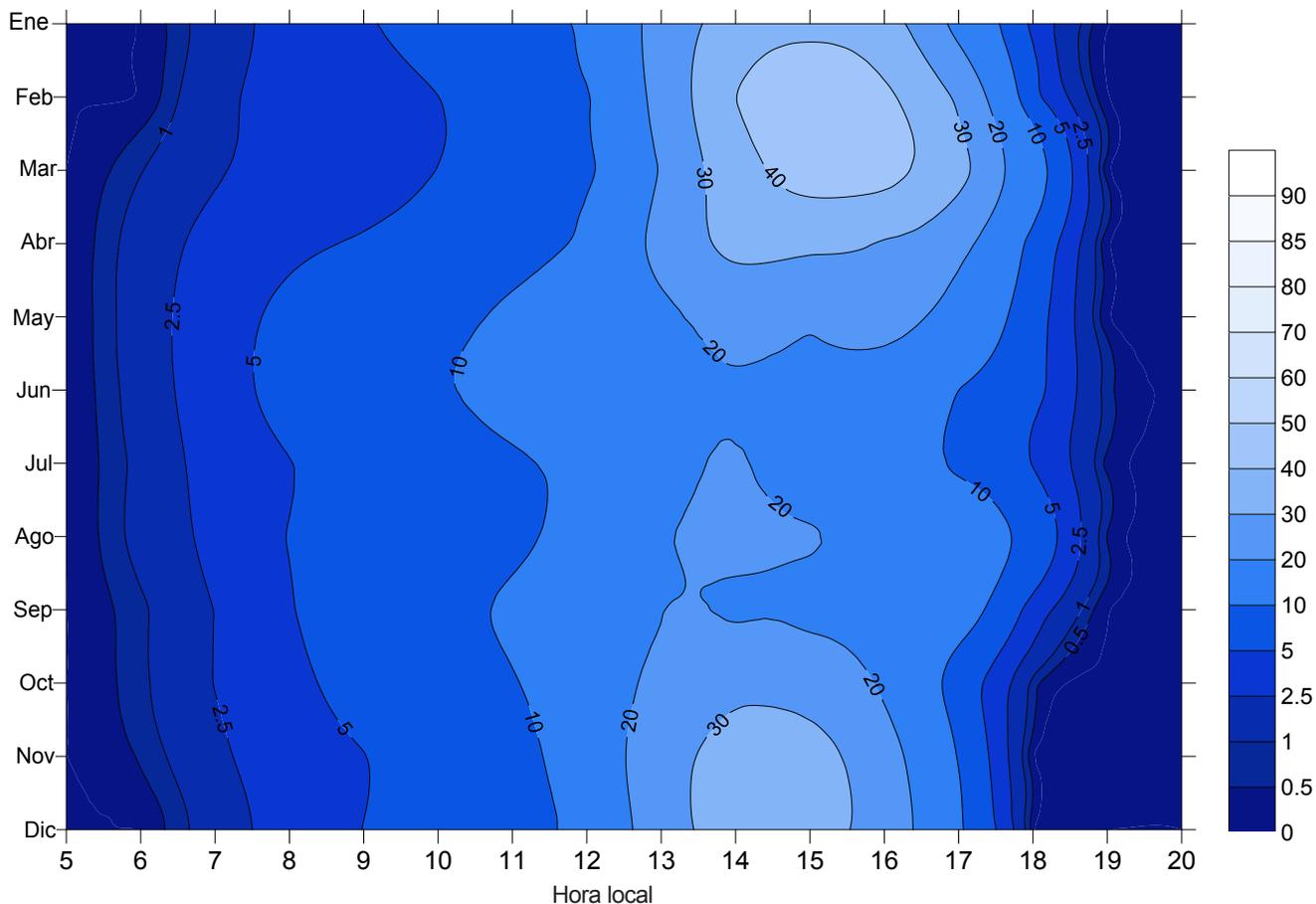


Figura 4.13: Iluminancia vertical oeste, media horaria en klux

Tabla 4.38 Iluminancia vertical Oeste, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		1	3	4	6	7	9	12	22	29	29	26	16	6	0.4	
Máx		2	4	6	8	10	12	14	27	40	47	44	34	13	0.7	
Mín		1	2	3	4	5	6	9	18	19	15	15	7	1	0.3	

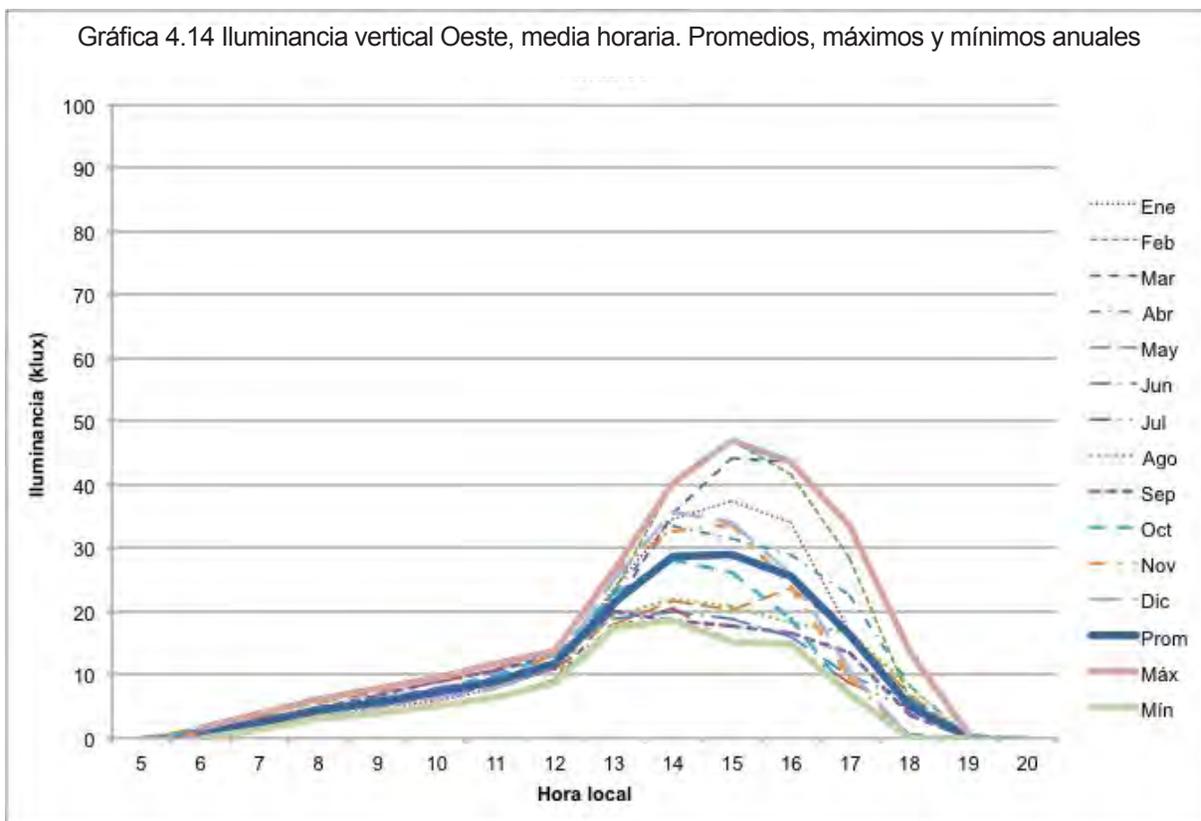


Tabla 4.39 Iluminancia vertical Norte media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			2	4	5	5	6	6	7	7	6	5	3	1		
Feb			2	4	5	5	5	6	7	7	7	6	4	2		
Mar		1	3	5	5	6	6	7	8	8	8	6	4	2		
Abr		3	6	7	8	8	9	9	10	10	9	8	6	3		
May		4	10	12	12	12	13	13	12	11	10	10	7	3		
Jun		3	8	12	13	14	15	14	14	13	13	11	6	3	0.5	
Jul		3	10	12	12	12	12	12	11	11	10	10	6	3	0.2	
Ago		3	7	9	10	10	10	11	11	10	9	8	6	3	0.3	
Sep		1	3	6	8	9	10	10	9	8	7	5	3	1		
Oct		1	3	5	6	7	7	7	7	7	5	4	2			
Nov		1	2	4	5	6	7	7	7	7	5	4	2			
Dic			2	4	5	6	6	6	7	6	6	4	2			

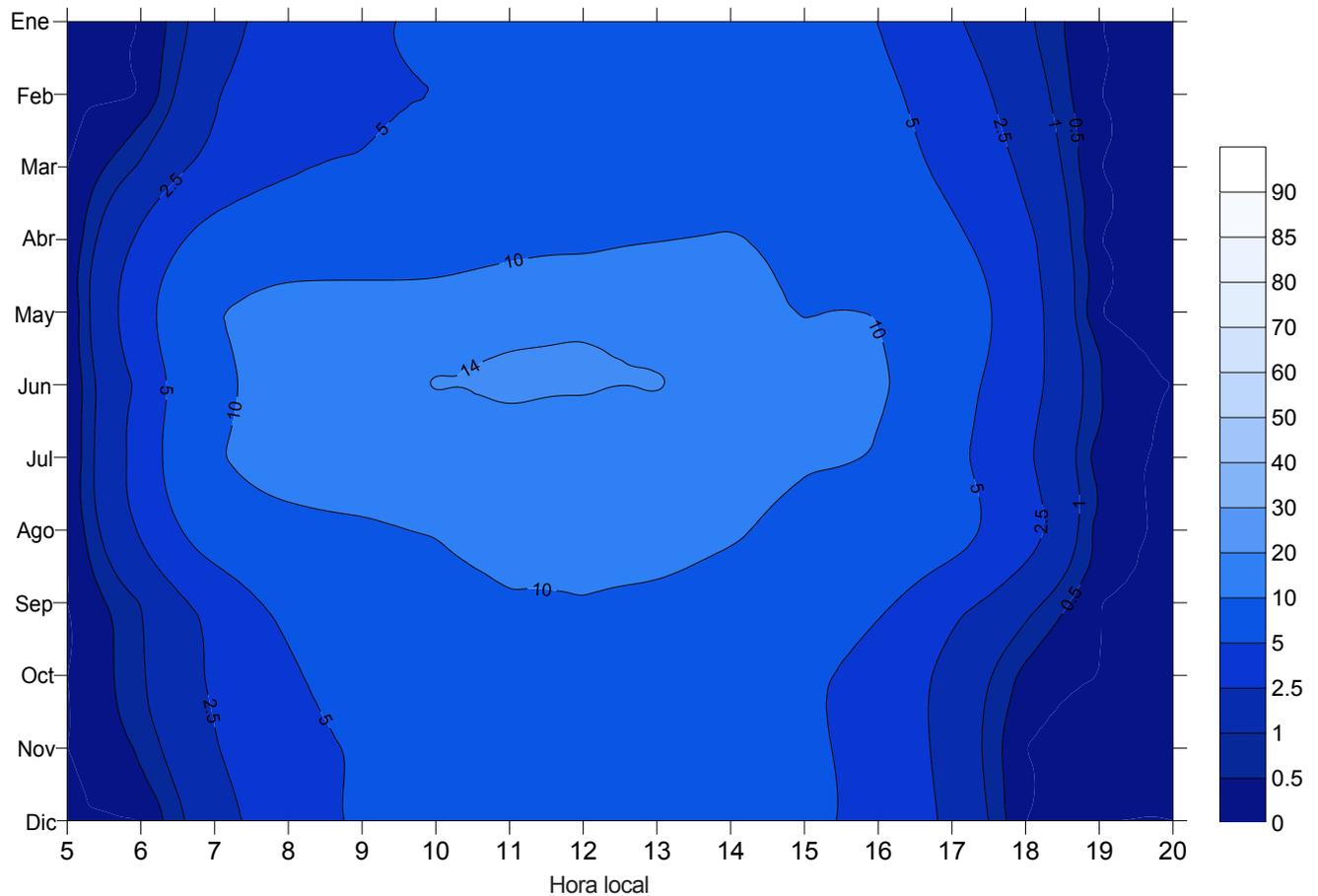
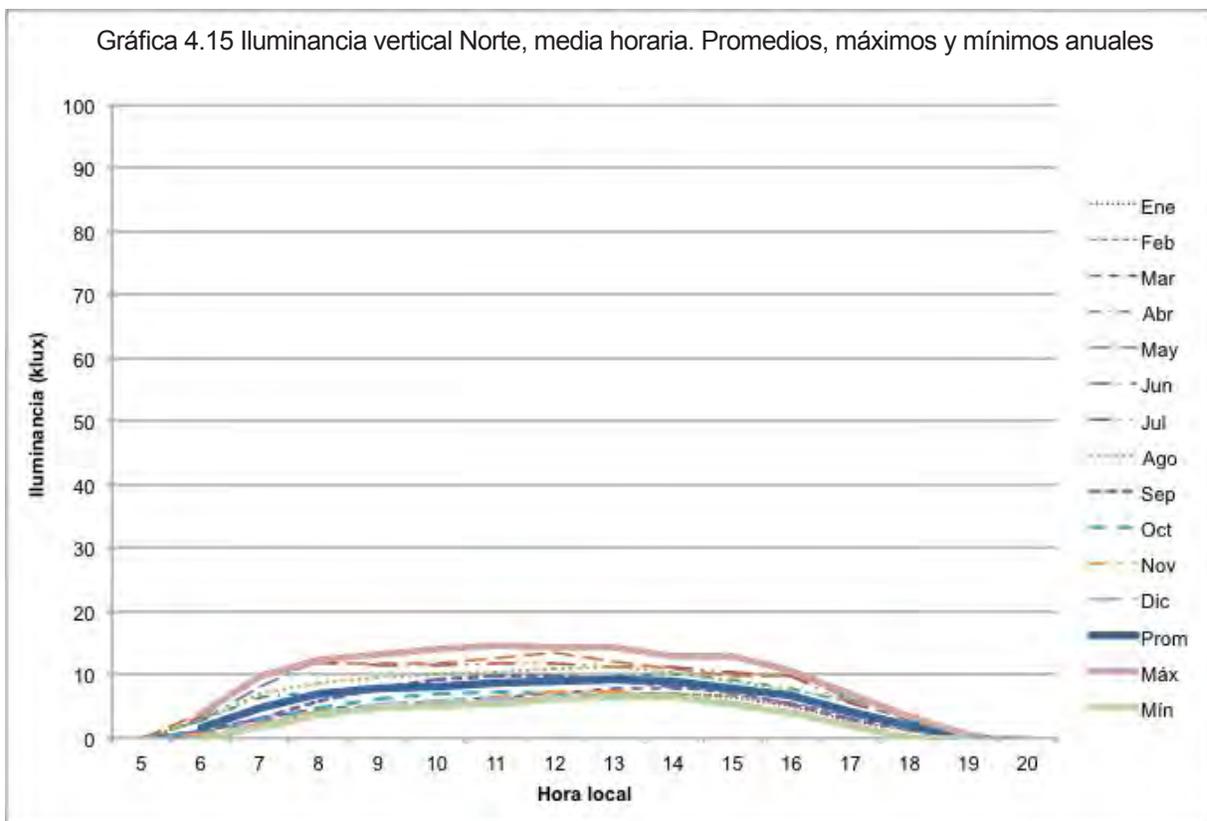


Figura 4.14: Iluminancia vertical norte, media horaria en klux

Tabla 4.40 Iluminancia vertical Norte, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prom		2	5	7	8	8	9	9	9	9	8	7	4	2	0.3	
Máx		4	10	12	13	14	15	14	14	13	13	11	7	3	0.5	
Mín		1	2	4	5	5	5	6	7	6	5	4	2	1	0.2	



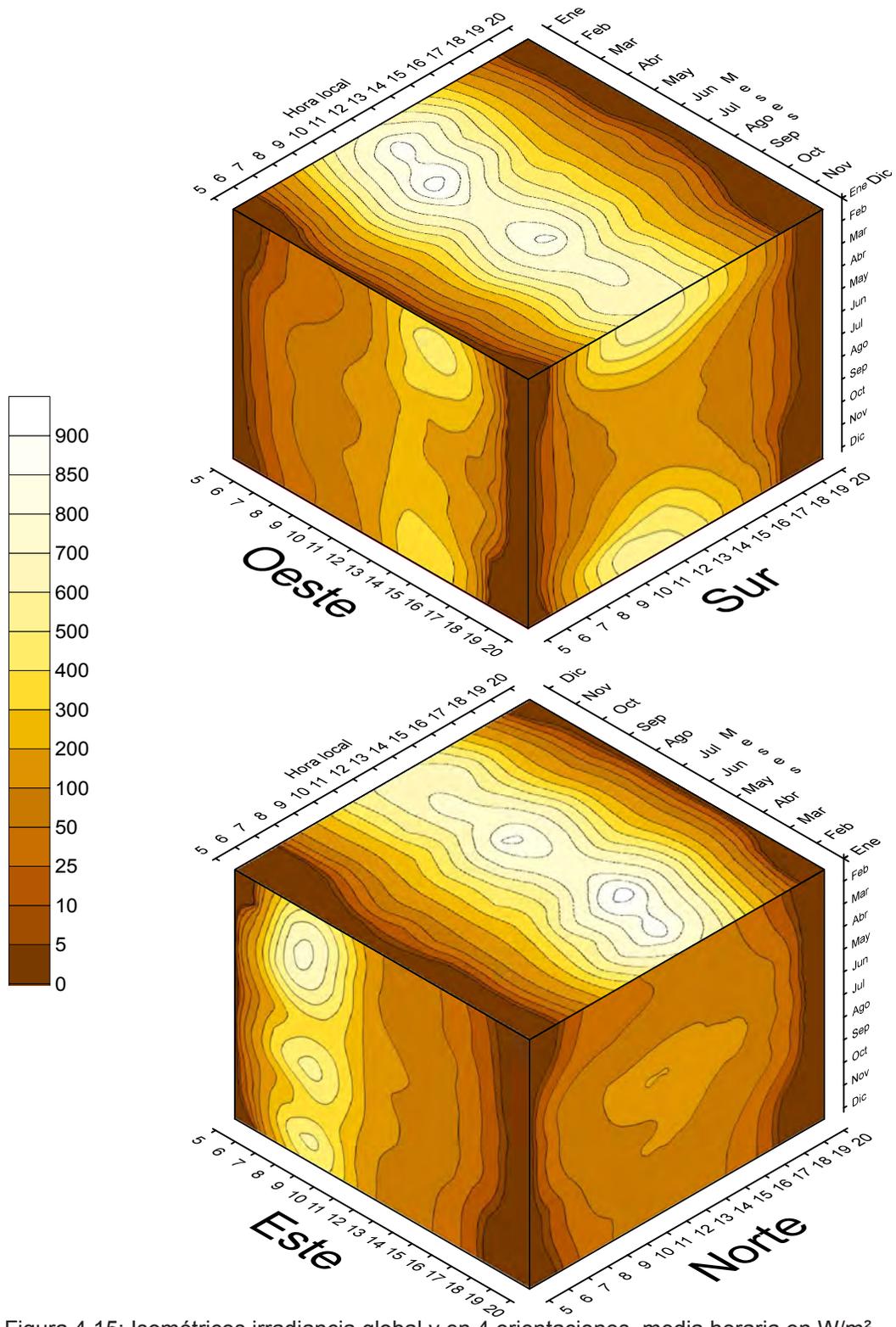


Figura 4.15: Isométricos irradiancia global y en 4 orientaciones, media horaria en W/m^2

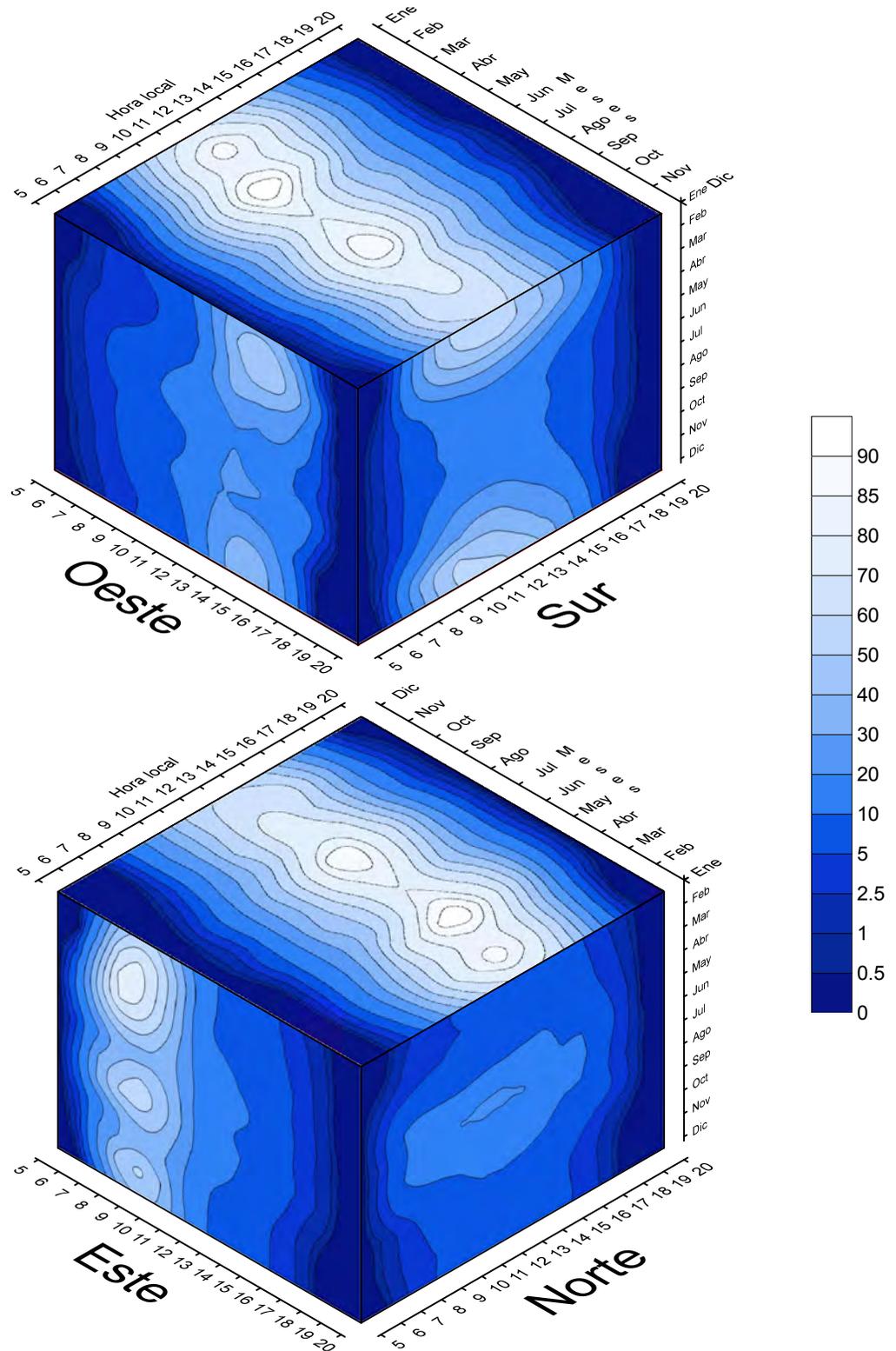
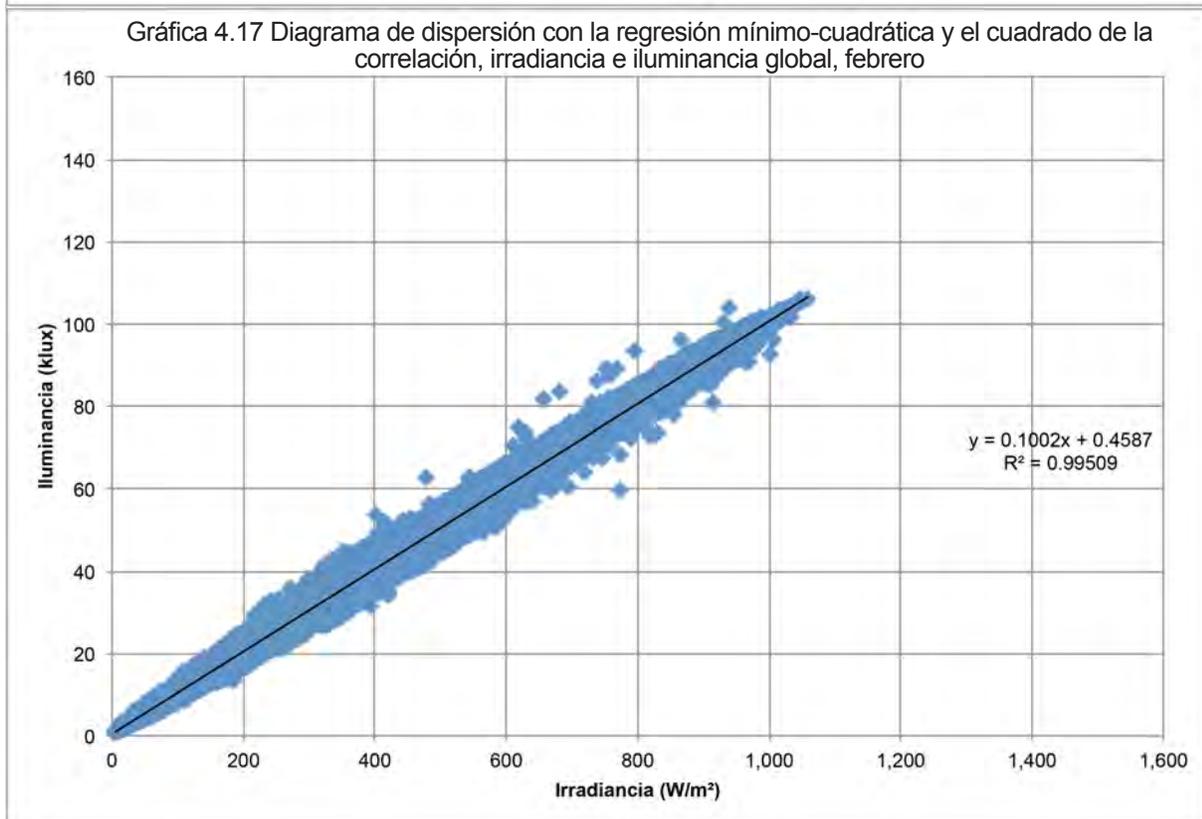
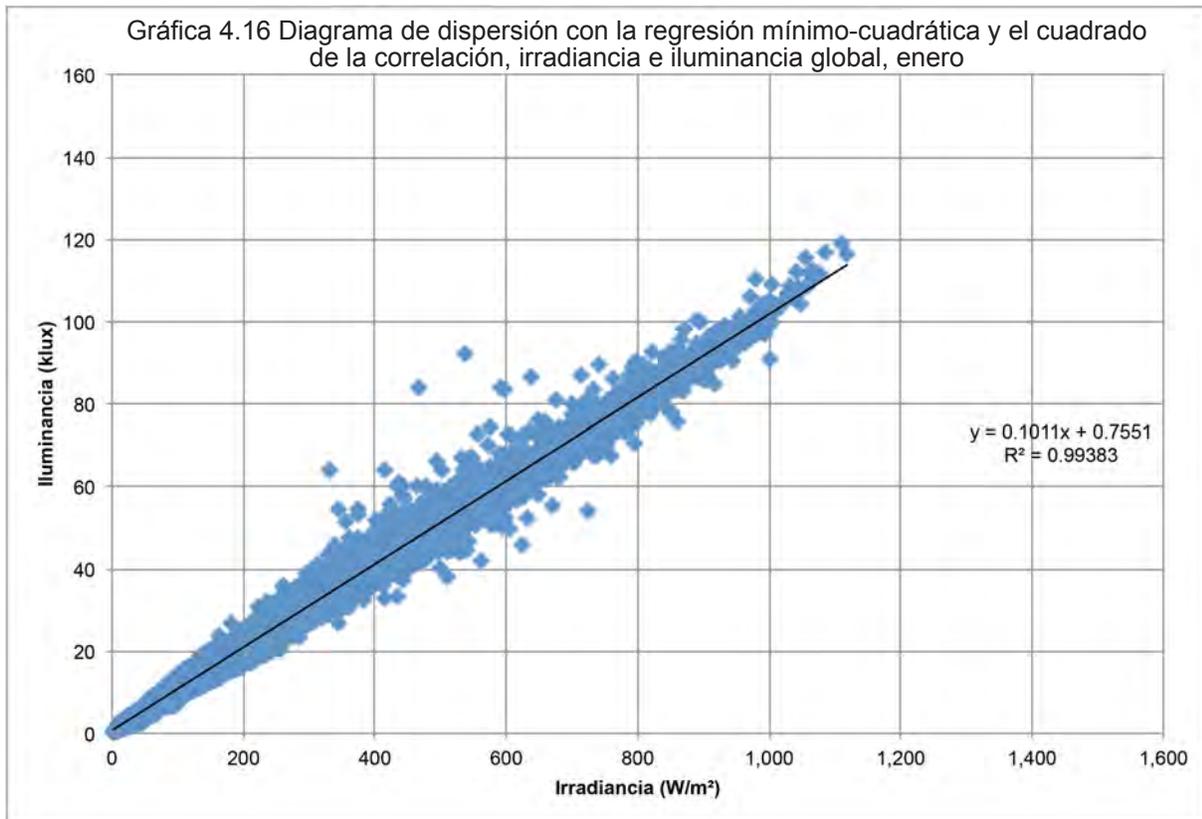
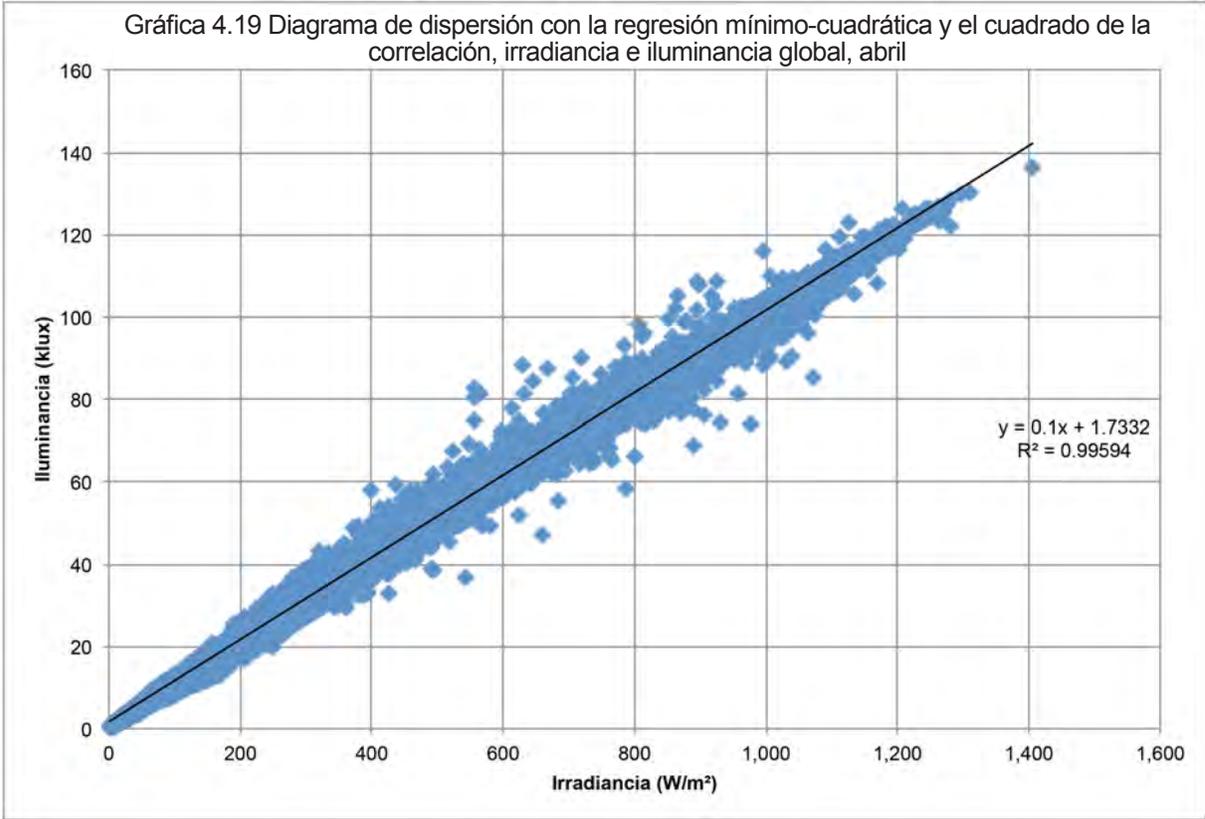
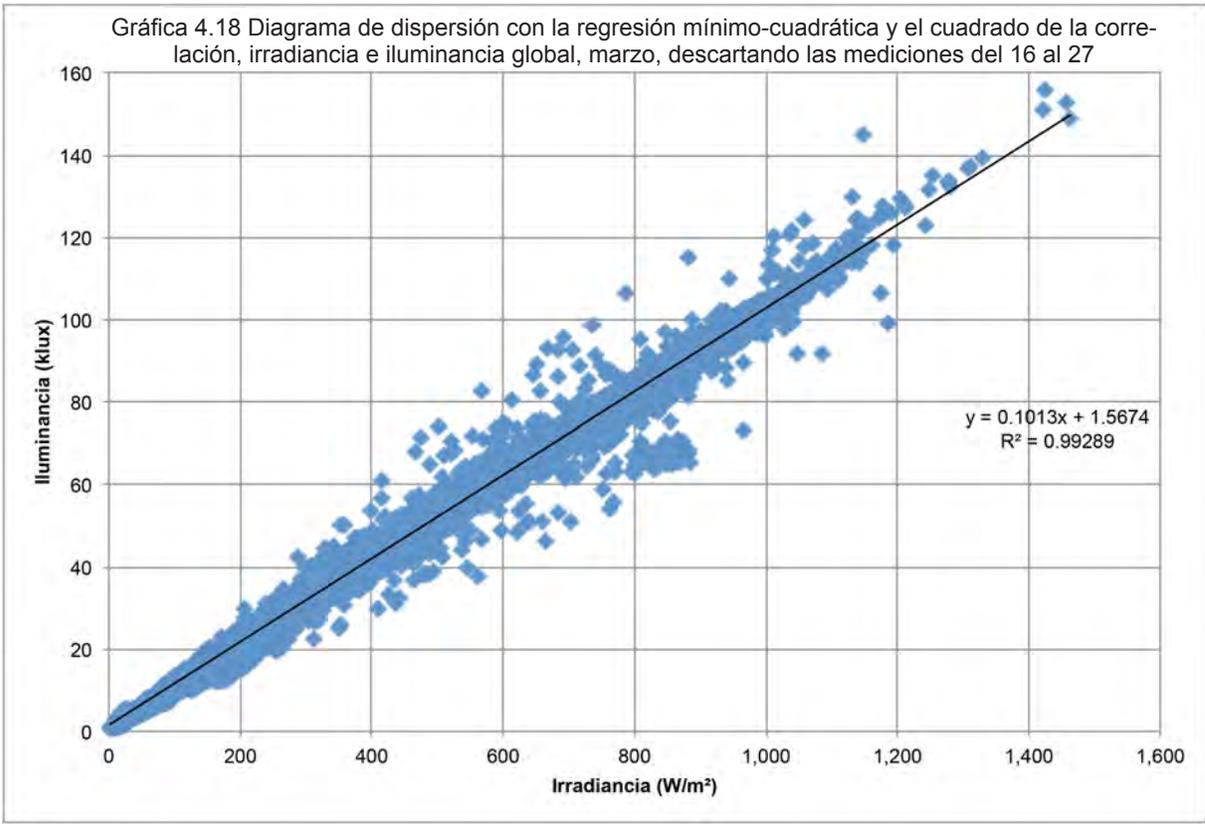
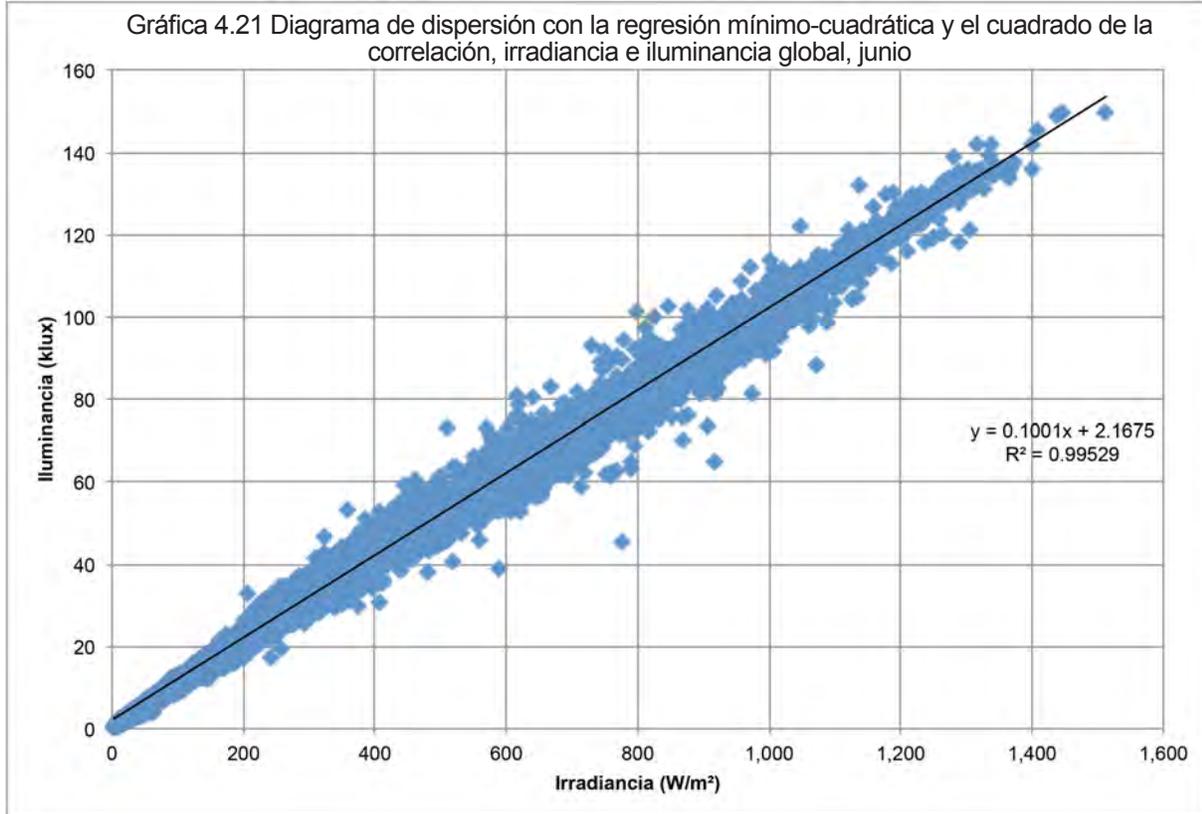
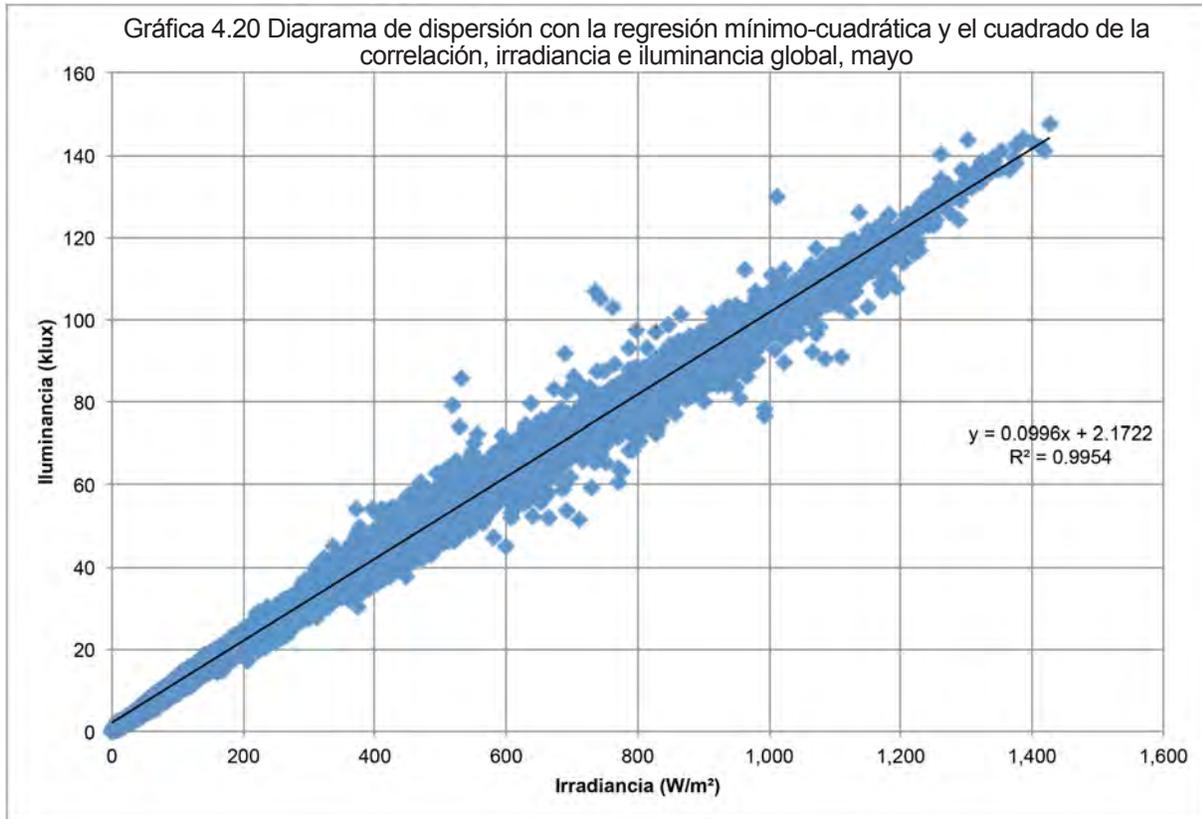
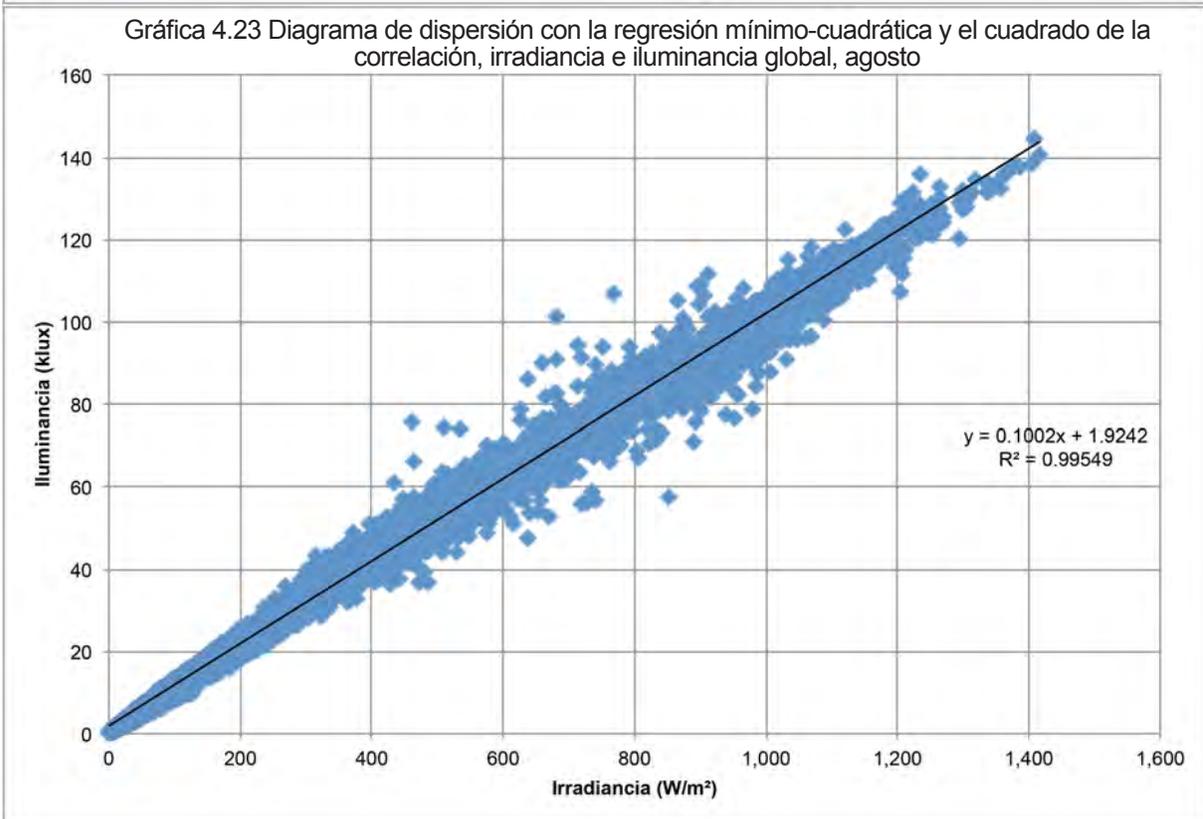
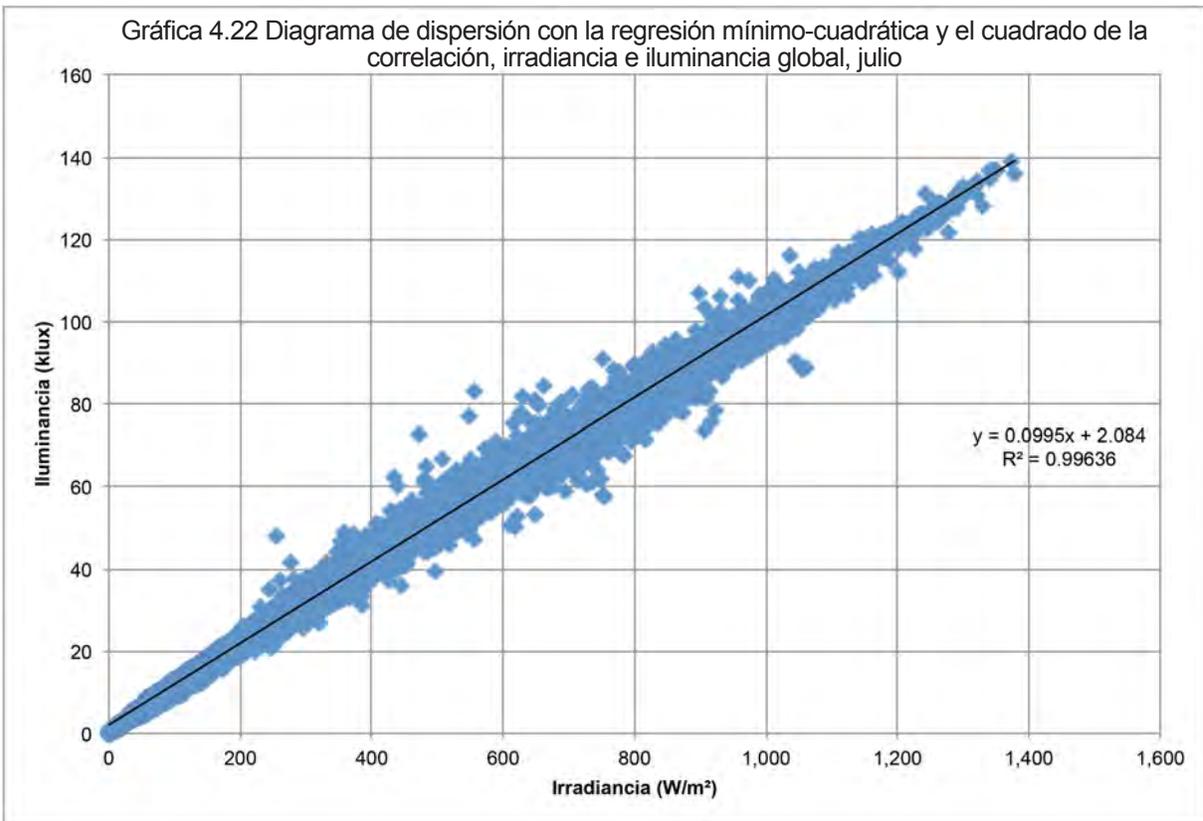


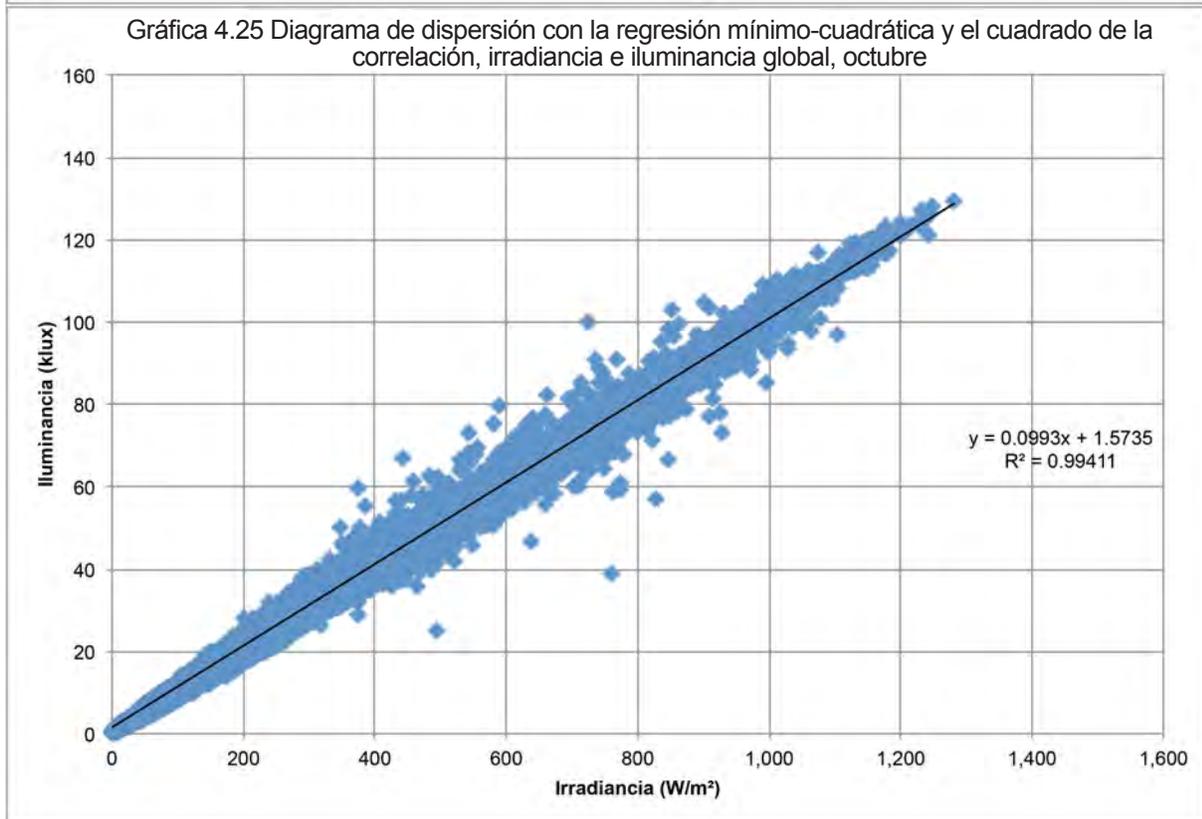
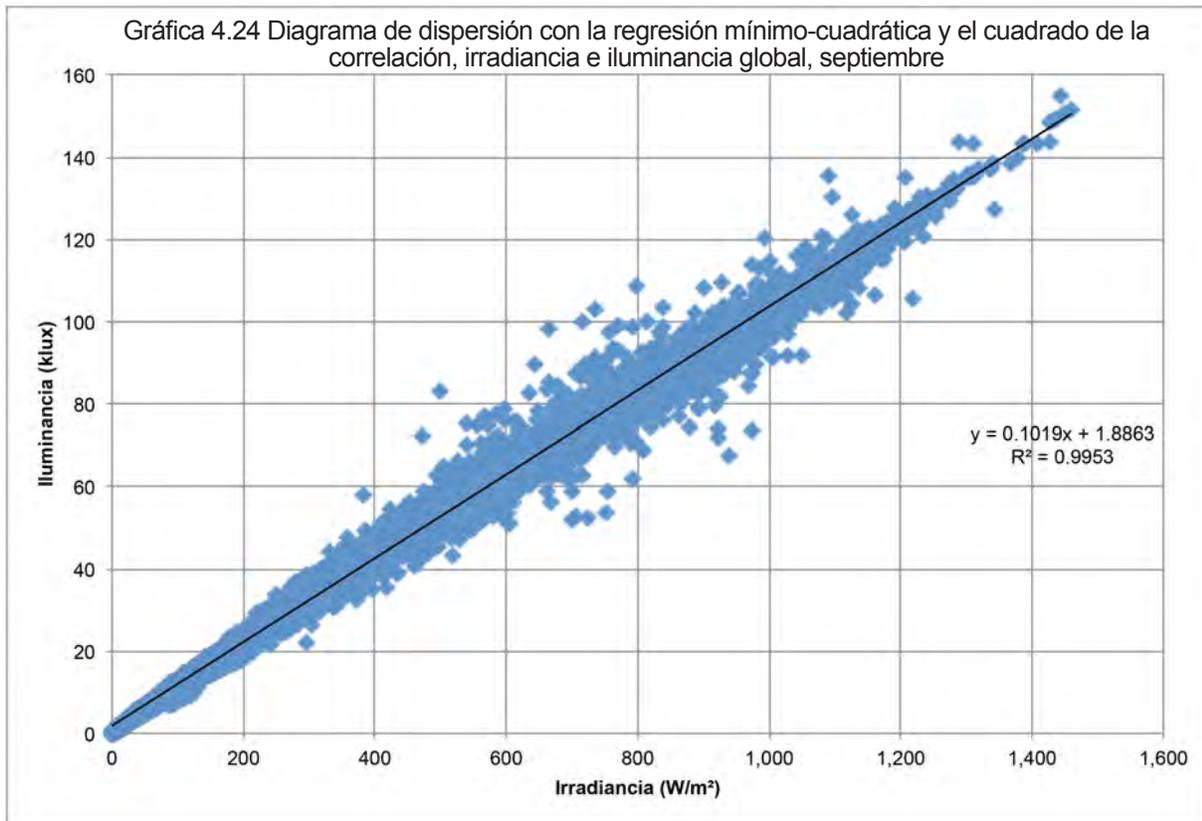
Figura 4.16: Isométricos iluminancia global y en 4 orientaciones, media horaria en klux











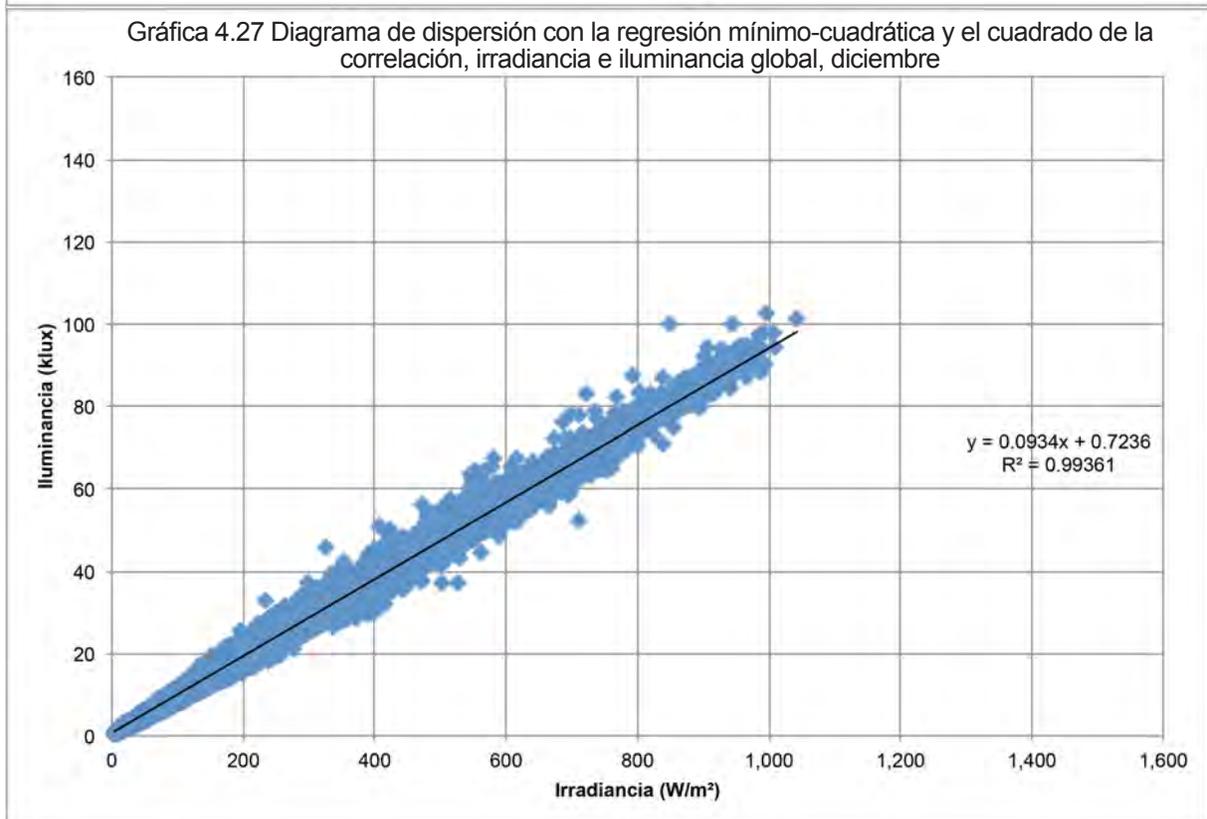
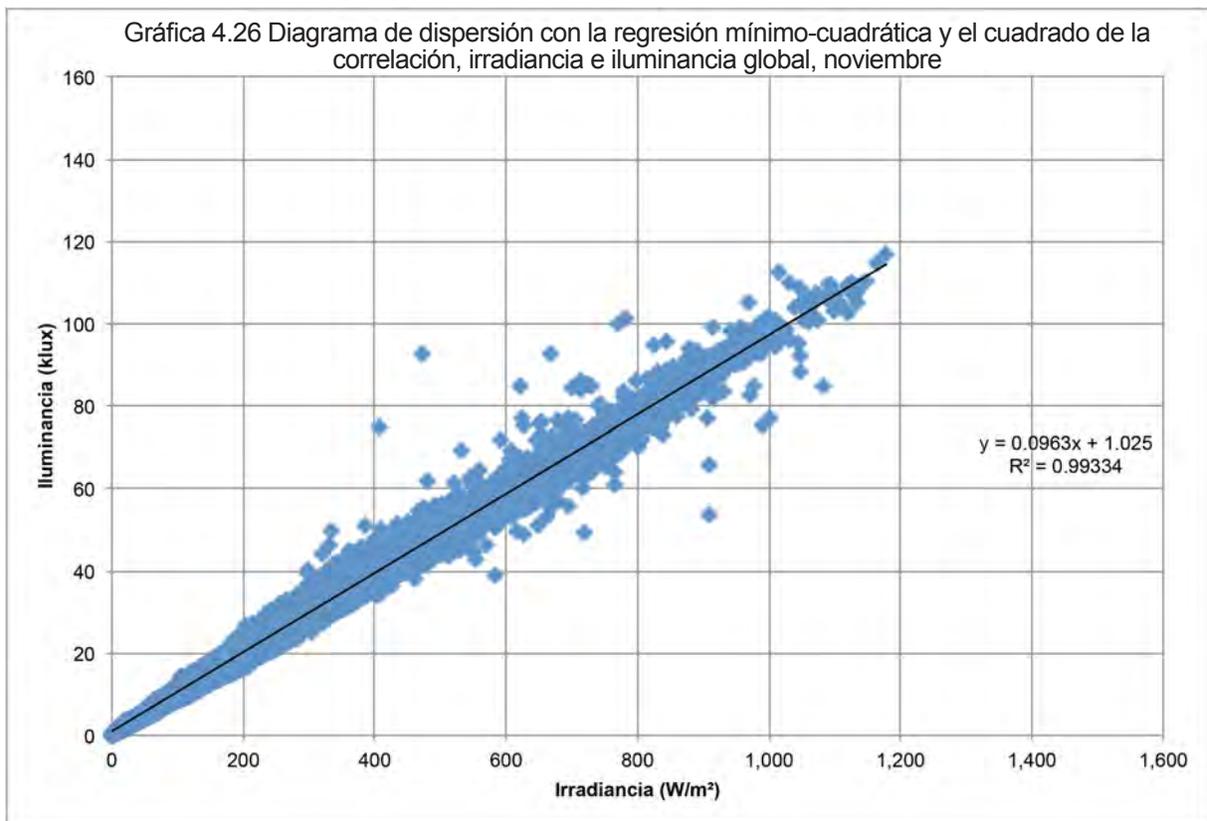


Tabla 4.41 Coeficientes del cuadrado de la correlación mensuales

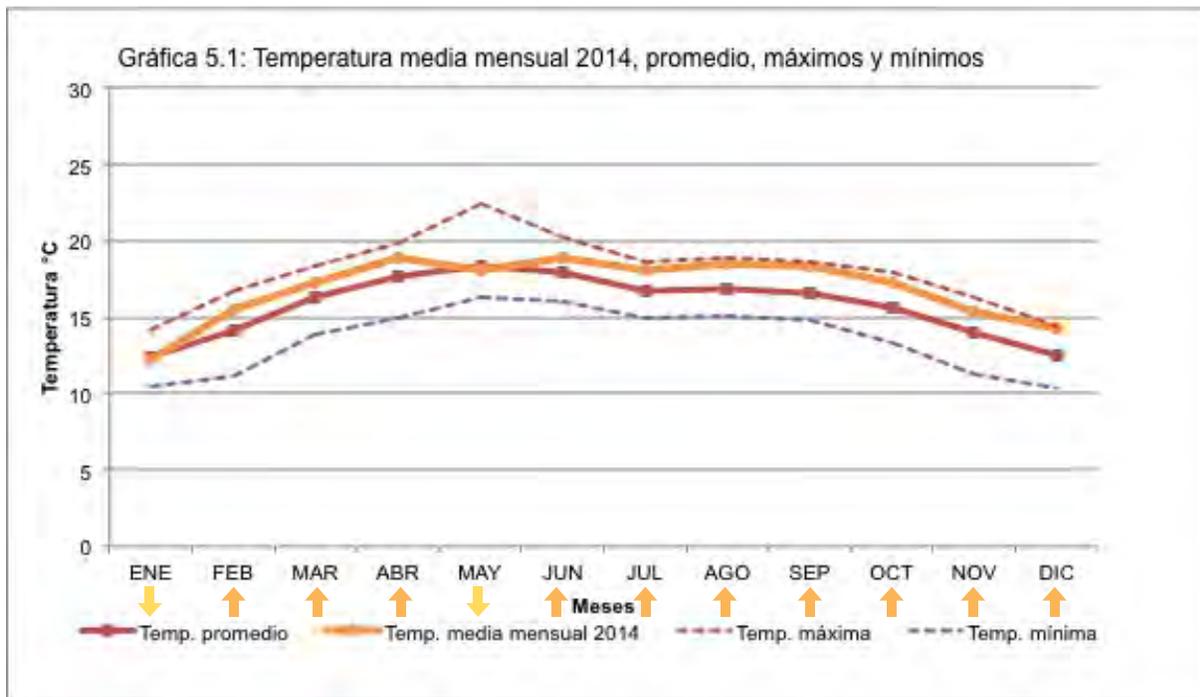
Mes	Coeficientes del cuadrado de la correlación r^2	Mes	Coeficientes del cuadrado de la correlación r^2
Enero	0.99383	Julio	0.99636
Febrero	0.99509	Agosto	0.99549
Marzo	0.99289	Septiembre	0.99530
Abril	0.99594	Octubre	0.99411
Mayo	0.99540	Noviembre	0.99334
Junio	0.99529	Diciembre	0.99361

Nota: Se descartan las fallas de medición del 16 al 27 de marzo

5.1 VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA AMBIENTE Y LA PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL DE 2014 CON LA CLIMATOLOGÍA DEL SITIO Y OBSERVACIONES DE LA NUBOSIDAD DEL CIELO

Para analizar el comportamiento de los flujos radiométricos y fotométricos medidos en 2014 es necesario conocer las características climáticas de este año en relación con la climatología del sitio. Por lo tanto, se evalúa la variabilidad de la temperatura y la precipitación registradas en 2014 —con sus promedios mensuales, máximos y mínimos—, contra las mediciones tomadas entre 1963 a 2012 ambas en el “Observatorio meteorológico” del Colegio de Geografía de esta universidad.

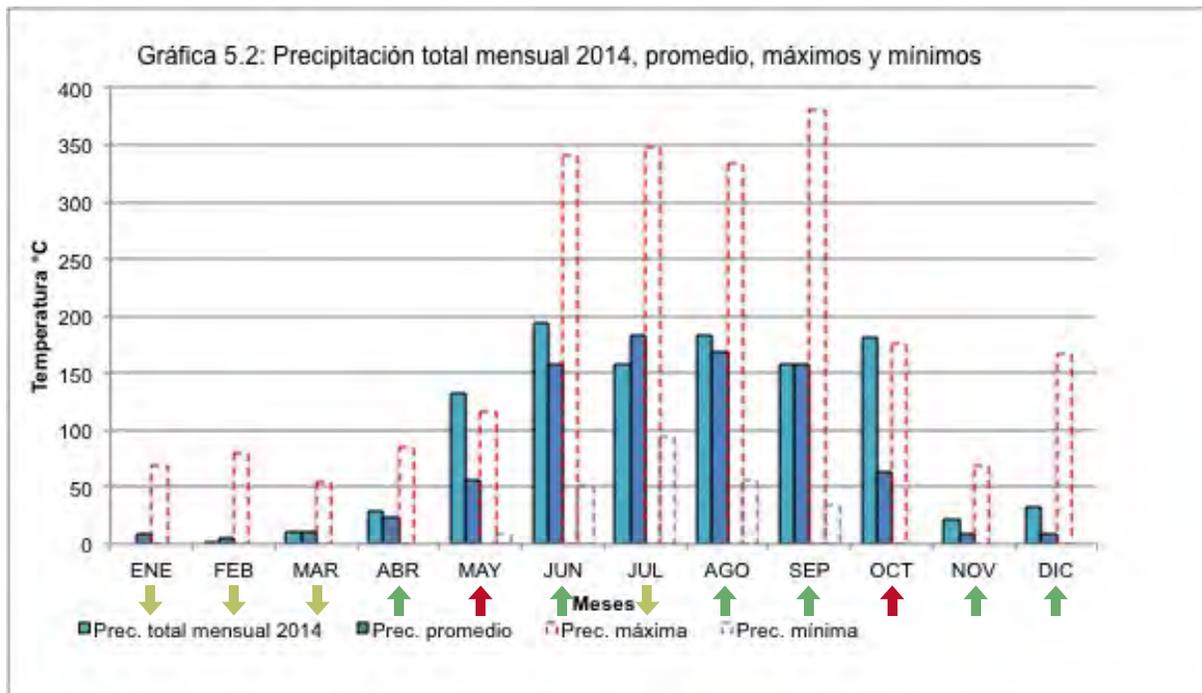
Temperatura. En la gráfica 5.1 se compara la temperatura ambiente media mensual registrada en 2014 con el promedio, los máximos y mínimos mensuales reportados durante los 49 años de muestra. El sentido de las flechas representa mayor o menor temperatura media mensual registrada en el 2014 en comparación con la temperatura promedio. La temperatura media mensual del 2014 es, en promedio, 1 grado mayor que la temperatura promedio registrada en el periodo patrón. En enero y mayo, la temperatura es ligeramente inferior —por menos de medio grado— y en los meses restantes, la temperatura es mayor con una variación de 1 a 1.8 grados, siendo la mayor diferencia en diciembre. Esto quiere decir que 2014 fue un año cálido en comparación con la temperatura promedio del sitio.



Aun así, la temperatura de 2014 se encuentra dentro de los rangos climatológicos. La temperatura se encuentra de enero a abril de 1 a 2 grados por debajo de la temperatura máxima; en mayo, 5 grados por debajo, y de junio a diciembre, aproximadamente 1 grado por debajo de la máxima. (Gráfica 5.1)

Precipitación. La precipitación total mensual de 2014 es 246 mm mayor que la precipitación total media mensual promedio registrada en el periodo muestra. En enero, febrero, marzo y julio, la precipitación es menor que la precipitación promedio. En los meses restantes la precipitación es mayor; la mayor diferencia la presentan mayo y octubre con 76 y 118 mm, respectivamente.

De enero a abril, de junio a septiembre, así como de noviembre a diciembre las precipitaciones del 2014 se encuentran por debajo del máximo, Sin embargo, en mayo y octubre las precipitaciones sobrepasan al máximo registrado de 1963 a 2012 por 17 y 4 mm, respectivamente. Estos datos indican que 2014 fue un año, en general, más lluvioso en comparación



con la climatología del sitio. En la gráfica 5.2 las flechas en color verde muestran si la precipitación mensual de 2014 es inferior o supera el promedio, mientras que las flechas en color rojo muestran los meses en los cuales la precipitación de 2014 sobrepasa los máximos registrados en el periodo de estudio. (Gráfica 5.2)

Temperatura y precipitación del 2014 en relación con las temporadas climáticas y observaciones de la nubosidad del cielo. El año 2014 es un año cálido y lluvioso en comparación con la climatología del sitio. Según el “Reporte del clima de México”, 2014 fue clasificado como el año más caluroso en toda la República Mexicana desde 1971.¹ Según los datos del observatorio de meteorológico de la UNAM, la temperatura ambiente y la mayoría de las precipitaciones del 2014 se encuentra dentro de los rangos máximos y mínimos registrados de 1963 a 2012. Las excepciones son mayo y octubre, cuyas precipitaciones sobrepasan los máximos registrados.

¹ CONAGUA, “Reporte del clima en México” (México, DF: Comisión Nacional del Agua y Servicio Meteorológico Nacional, en línea <<http://smn1.conagua.gob.mx/climatologia/analisis/reporte/Anual2014.pdf>>, consulta: 05/05/2017, 2014.

Los meses de enero y febrero del 2014 son representativos de la temporada seca-fría; más seca y un poco más cálida en febrero. Las bajas temperaturas en esta época son consecuencia de la altitud de la cuenca y del paso de grandes masas de aire frío polar en esta región. Las pocas precipitaciones —en febrero 1 mm— se deben a vórtices fríos, depresiones ciclónicas y nortes del Golfo de México. En estos dos meses los cielos son mayormente despejados (figura 5.1) y en muy pocas ocasiones parcialmente nublados con nubes ligeras. Esto es comprobable con las imágenes de la cámara de nubosidad ubicada en la Plataforma de Observación de Luz Natural en esta universidad.



Figura 5.1: Fotografía de la cámara de nubosidad, 17/02/2014, altura solar: 38.06°, ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo mayormente despejado.

Los meses de marzo y abril del 2014 son representativos de la temporada seca-caliente. Esta temporada fue más calurosa, con 4 mm más de lluvias en el mes de abril. Según la cámara de nubosidad, estas lluvias se presentan, principalmente, a partir de la tarde-noche y, en abril, en pocas ocasiones durante todo el día (figura 5.2). El resto de los días presentan cielos despejados y, ocasionalmente, parcialmente nublados con nubes ligeras por la tarde. En esta región y época, los vientos contralisios secos generan poca nubosidad y, por ende, cielos despejados en marzo y abril. Las altas temperaturas corresponden a los cielos despejados por las mañanas y al medio día. También coinciden con el equinoccio, momento en el cual aumenta la energía de radiación solar captada por cada metro cuadrado de superficie, debido a la verticalidad de los rayos solares sobre la horizontal.



Figura 5.2: Fotografía de la cámara de nubosidad, 23/04/2014, altura solar: 77.11°, ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo parcialmente nublado y lluvia.

El mes de mayo del 2014 es un mes de transición entre la temporada seca-caliente y la de lluvias. Este presenta una baja en temperatura ambiente, con relación a la temperatura del mes anterior y a la temperatura promedio. La precipitación sobrepasa el máximo registrado. En general, la temporada de lluvias en México comienza entre mayo y julio, y termina entre septiembre y octubre.² La temporada de lluvias en la cuenca se debe principalmente a los vientos alisios húmedos provenientes del Golfo de México y a los movimiento convectivos dentro de la cuenca, así como a la actividad ciclónica de esta época.³ Las altas precipitaciones en mayo del 2014 se debieron, en parte, a la actividad ciclónica del Pacífico, la cual comenzó temprano con el huracán Amanda, categoría 4, con duración del 22 al 29 de mayo; ha sido el huracán más fuerte en la zona noreste del Pacífico registrado en el mes de mayo.⁴ Según la cámara de nubosidad, a principios de mayo se presentan cielos despejados y cielos parcialmente nublados con nubes ligeras por la tarde. De mitades a finales de mayo se presentan los días con cielo nublado (figura 5.3) y lluviosos, a consecuencia principalmente del huracán

2 Víctor O. Magaña Rueda, *Los impactos de El Niño en México* (México, DF: UNAM, en línea, <http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/>, consulta: 03/12/2013, Capítulo 2 Climatología de México, 1999), 25.

3 Enriqueta García, *Los climas del Valle de México* (Chapingo: Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, 1968), 3-5; Enriqueta García, *Apuntes de climatología*, 1.^a ed. 1967 (México, DF: UNAM, 2014), 44-54; Ernesto Jáuregui Ostos, *El clima de la Ciudad de México* (México DF: UNAM, Instituto de Geografía, 2000), 31.

4 Stancy R. Steward, “Hurricane Amanda” (Estados Unidos de Norteamérica: NOAA, National Hurricane Center, en línea, <http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/summary_epac_2014.pdf>, consulta: 05/05/2017, 2014)

Amanda en el Pacífico. A estos días también le debemos, en parte, la baja en la temperatura ambiente promedio mensual de mayo.



Figura 5.3: Fotografía de la cámara de nubosidad, 25/05/2014, altura solar: 76.67°, ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo nublado.

El mes de junio del 2014 representa la temporada de lluvias, aunque con precipitaciones por arriba del promedio. Durante este mes la temporada ciclónica del Pacífico presenta tres tormentas tropicales y un huracán, Cristina, de categoría 4.⁵ Este último se adelanta a la temporada de huracanes y dura del 9 al 15 de junio. La mayoría de los cielos en este mes son parcialmente nublados con nubes de ligeras a densas, principalmente por la tarde (figura 5.4). También se presentan cielos completamente nublados a mitades del mes con nubosidad de ligera a densa, de la cual cae precipitación por la tarde.



Figura 5.4: Fotografía de la cámara de nubosidad, 12/06/2014, altura solar: 3.71°, ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo parcialmente nublado con nubes de ligeras a densas.

5 Robbie Berg, “2014 Eastern Pacific Hurricane Season” (Estados Unidos de Norteamérica: NOAA, National Hurricane Center, en línea, <http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/summary_epac_2014.pdf>, consulta: 05/05/2017, 2015)

El mes de julio de 2014, es parte de la temporada de lluvias. Presenta una disminución en las precipitaciones por debajo, tanto del promedio registrado como del total mensual del mes anterior y del mes siguiente; esto indica una sequía intraestival conocida como canícula.⁶ Los cielos en este mes varían, según la cámara de nubosidad, de despejados por las mañanas con nubes ligeras por la tarde; parcialmente nublados por la mañana y la tarde (figura 5.5), hasta nublados densos con lluvia (figura 5.6).



Figura 5.5: Fotografía de la cámara de nubosidad, 20/07/2014, altura solar: 35.54°, ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo parcialmente nublado.



Figura 5.6: Fotografía de la cámara de nubosidad, 15/07/2014, altura solar: 59.21°, ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo nublado denso y lluvia.

Los meses de agosto y septiembre del 2014, son representativos de la temporada de lluvias, aunque agosto presenta más lluvias que el promedio. Los cielos en estos meses varían de despejados por las mañanas y nubes ligeras por la tarde, pasando por parcialmente nublados por la mañana y por la tarde, hasta nublados densos todo el día (figura 5.7). Las lluvias caen principalmente en la tarde-noche.

⁶ CONAGUA, “Reporte del clima en México”, 15.



Figura 5.7: Fotografía de la cámara de nubosidad, 07/08/2014, altura solar: 63.57° , ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo nublado denso.

El mes de octubre del 2014, es un mes de transición entre la temporada de lluvias y la seca-fría, el cual presenta precipitaciones por arriba del promedio. Esto se debe, en parte, a la actividad ciclónica del Atlántico en este mes, la cual presentó dos huracanes: el primero, Fay, del 10 al 13; el segundo, Gonzalo, de categoría 4, del 12 al 19; además de una tormenta tropical, Hanna, del 22 al 28 de octubre.⁷ Esta última se adentró al Caribe, al Golfo de México y a las costas mexicanas. Los cielos en este mes del 2014 son despejados o parcialmente nublados (figura 5.8). También se presentan días con cielo totalmente despejado y días con cielo nublado y lluvioso.



Figura 5.8: Fotografía de la cámara de nubosidad, 10/10/2014, altura solar: 17.34° , ubicada en la “Plataforma de observación de luz natural”, la cual muestra un cielo parcialmente nublado.

Noviembre y diciembre del 2014 son parte de la temporada seca-fría, aunque presentan temperaturas más elevadas y mayores precipitaciones en comparación al promedio. Esto indica que en 2014, la temporada seca-fría de finales del año fue menos seca y más calurosa.

7 Richard, J. Pasch, “2014 Atlantic Hurricane Season” (Estados Unidos de Norteamérica: NOAA, National Hurricane Center, en línea, <http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/summary_atlc_2014.pdf>, consulta: 05/05/2017, 2015)

En resumen, la primera temporada seca-fría del año 2014 es más seca y más calurosa con cielos despejados, principalmente en febrero. La temporada seca-caliente es más cálida y más lluviosa en abril con cielos despejados por las mañanas y ligeramente nublados por la tarde, las lluvias se presentan por la tarde-noche y en raras ocasiones durante todo el día. La temporada de lluvias del 2014 es extensa —comienza en mayo y termina en octubre— y es intensa; los cielos son parcialmente nublados con Sol aparente en las horas centrales del día, las lluvias se presentan por la tarde y también se muestran días completamente nublados y lluviosos. El año 2014 presenta la canícula en julio, donde los cielos son despejados por las mañanas con nubes ligeras por la tarde, pasan a parcialmente nublados, tanto por la mañana como por la tarde con Sol aparente, hasta nublados con nubosidad densa con lluvia. La última temporada seca-fría del año fue más lluviosa y más calurosa. (Figura 5.9)

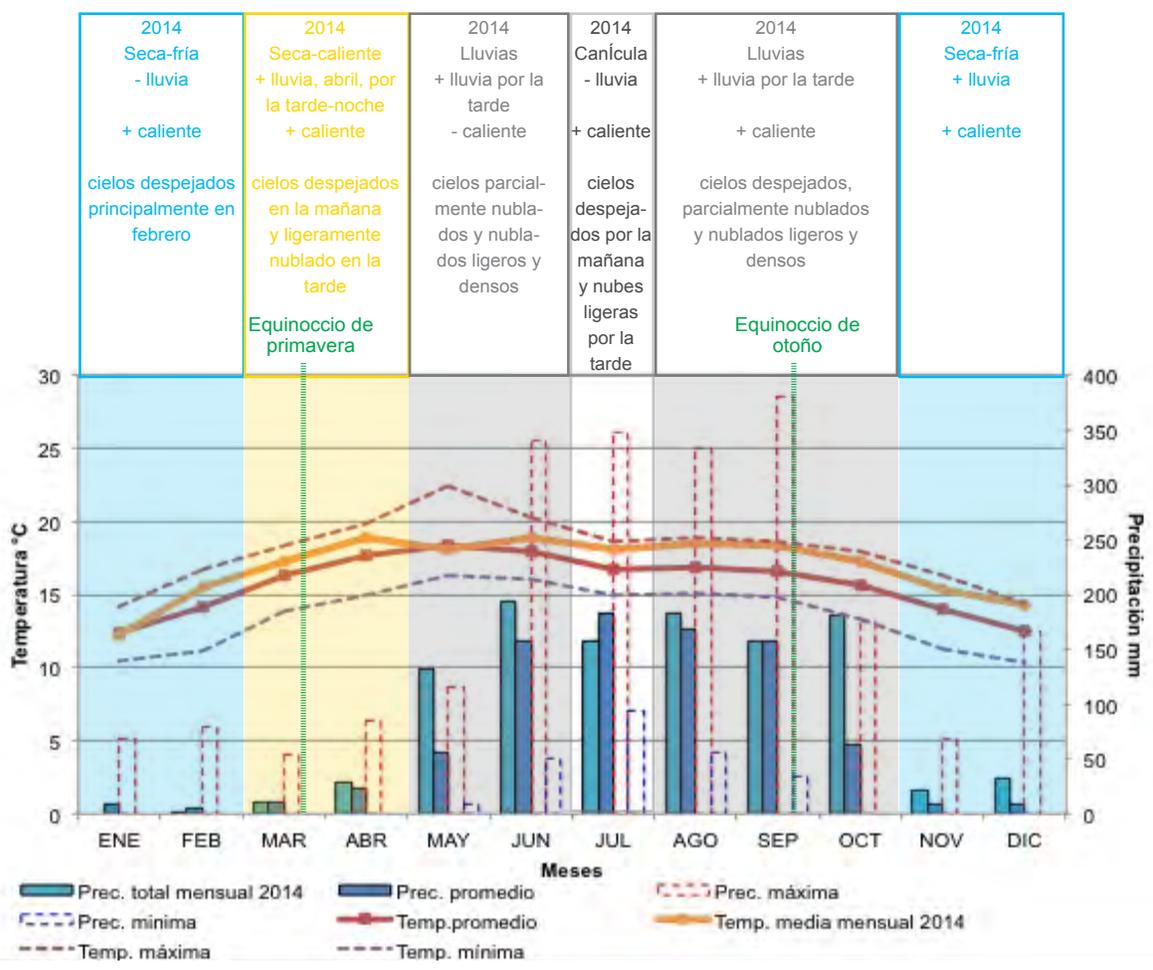


Figura 5.9: Relación de la temperatura y precipitación del 2014 con las temporadas climáticas y con la nubosidad del cielo.

5.2 ANÁLISIS DE LAS TRAYECTORIAS SOLARES DEL SITIO

Para describir el comportamiento de la irradiancia y la iluminancia medidas en la “Plataforma de Observación de Luz Natural” a lo largo de un ciclo climatológico es necesario comprender las trayectorias solares del sitio, cuya latitud es de 19.32° Norte. Los recorridos del Sol a lo largo del día y del año determinan los ángulos de incidencia de los rayos solares sobre las superficies. El ángulo de incidencia de los rayos solares establece la densidad de captación de energía de radiación que recibirá la superficie; esta captará la energía de forma proporcional al coseno del ángulo de incidencia.⁸ De tal forma que mientras menor sea el ángulo incidente, mayor será la energía de radiación solar captada por la superficie. Si el ángulo de incidencia aumenta —con relación a la superficie— la energía captada disminuirá. Este hecho determina la interacción de las superficies con los ángulos de incidencia solares a lo largo del día y del año para un sitio en específico. Por lo tanto, es importante conocer las trayectorias del sitio en cuestión y emplearlas para analizar el comportamiento de los parámetros medidos.

Los planos que contienen las trayectorias solares en cada punto geográfico están inclinados igual a la latitud del sitio; por lo tanto, los planos de los recorridos solares en el sitio de estudio están inclinados a 19.32 grados, a partir del cenit, hacia el Sur geográfico. En los equinoccios de primavera y de otoño, el 21 o 22 de marzo y el 22 o 23 de septiembre, respectivamente —cuando la declinación solar es igual a 0 grados— el Sol sale exactamente en el Este y se eleva hasta alcanzar el punto más alto en la bóveda celeste. En este momento, el Sol tiene un ángulo cenital igual a la latitud del sitio debido a la inclinación de los planos. Posteriormente, desciende para ocultarse exactamente en el Oeste.

Después del equinoccio de otoño, conforme avanzan los días y con esto la declinación solar, los planos que contienen las trayectorias solares se desplazan hacia el Sur hasta alcanzar el solsticio de invierno el 21 o 22 de diciembre. En estas fechas, el Sol sale por el sureste y se eleva para alcanzar el medio día solar. En este momento el Sol presenta un ángulo cenital de 42.77 grados —resultado de la suma de los 19.32 grados más los 23.44 grados de la de-

8 David Riveros Rosas, “Notas de solarimetría” (Chihuahua: Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2011), 11.

clinación solar—. Posteriormente, desciende y se oculta en el suroeste. Después del solsticio de invierno, los planos se desplazan hacia el Norte para alcanzar el equinoccio de primavera el 21 o 22 de marzo.

Posterior al equinoccio de primavera, los planos se desplazan otros 23.44 grados hacia el Norte para alcanzar el solsticio de verano el 21 o 22 de junio, donde el Sol sale por el noreste y se oculta por el noroeste, y al medio día solar presenta un ángulo cenital de 4.11° hacia el Norte.

En este último trayecto, exactamente el 17 o 18 de mayo, ocurre el primer paso del Sol por el cenit del lugar a las 12 del día en tiempo solar verdadero, que equivale a las 12:33 horas en tiempo local, sin contemplar el horario de verano. El segundo paso del Sol por el cenit del sitio ocurre el 26 o 27 de julio a las 12 del día en tiempo solar verdadero, lo que equivale a las 12:43 en hora local, por el desplazamiento de los planos solares del solsticio de verano al equinoccio de otoño. (Figuras 5.10 y 5.11)

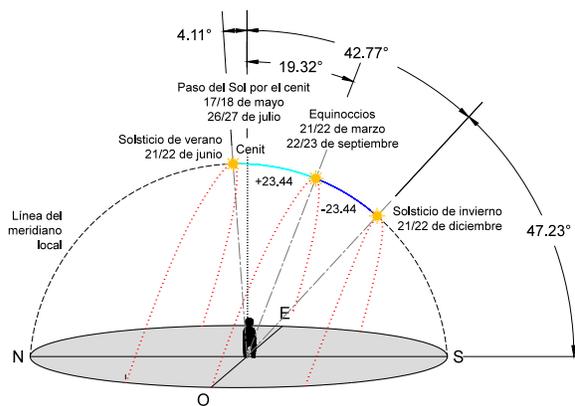


Figura 5.10: Esquema de las trayectorias solares de la “Plataforma de observación de luz natural”

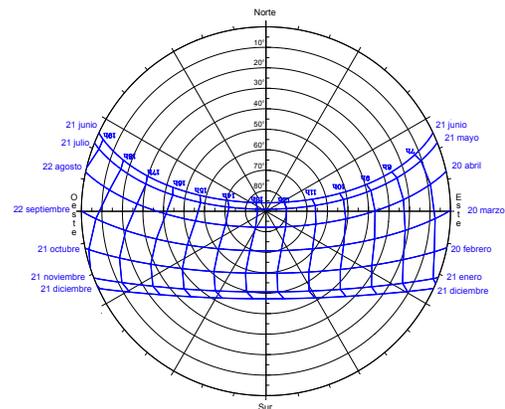


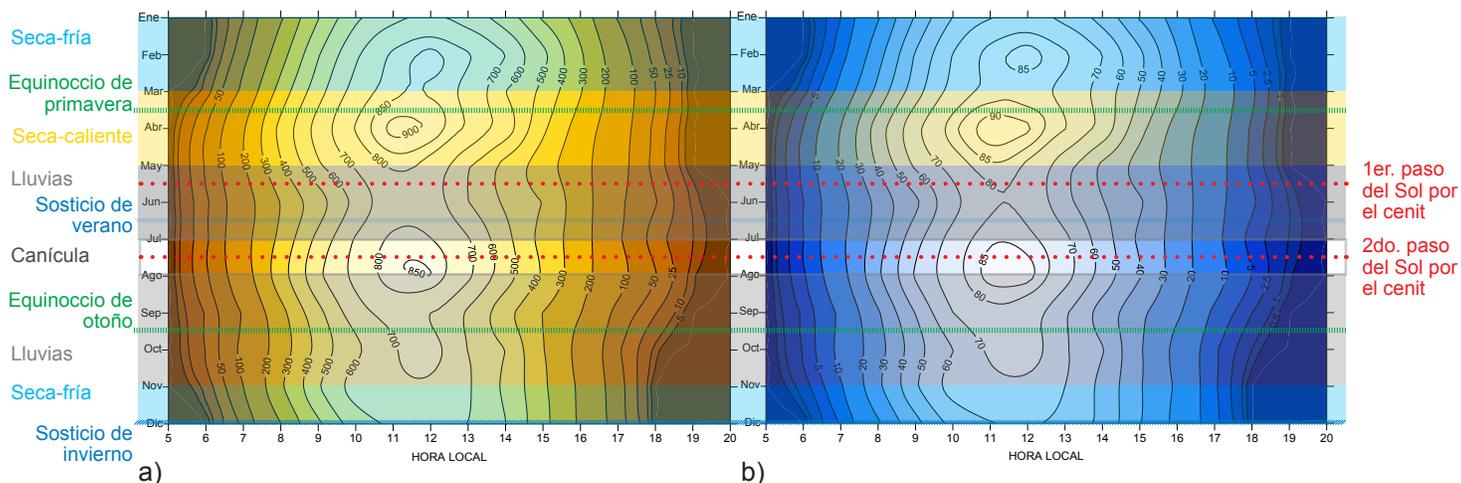
Figura 5.11: Proyección estereográfica polar generada en la página de la Universidad de Oregon, Estados Unidos de Norteamérica, para las coordenadas geográficas de la plataforma de observación: 19.32°N y 99.17°O <<http://solardat.uoregon.edu/download/temp/22579600.pdf>>

5.3 COMPORTAMIENTO DE LA IRRADIANCIA E ILUMINANCIA GLOBAL, DIRECTA, DIFUSA Y VERTICAL AL ESTE, SUR, OESTE Y NORTE CON INFORMACIÓN MEDIDA DE UN CICLO CLIMATOLÓGICO

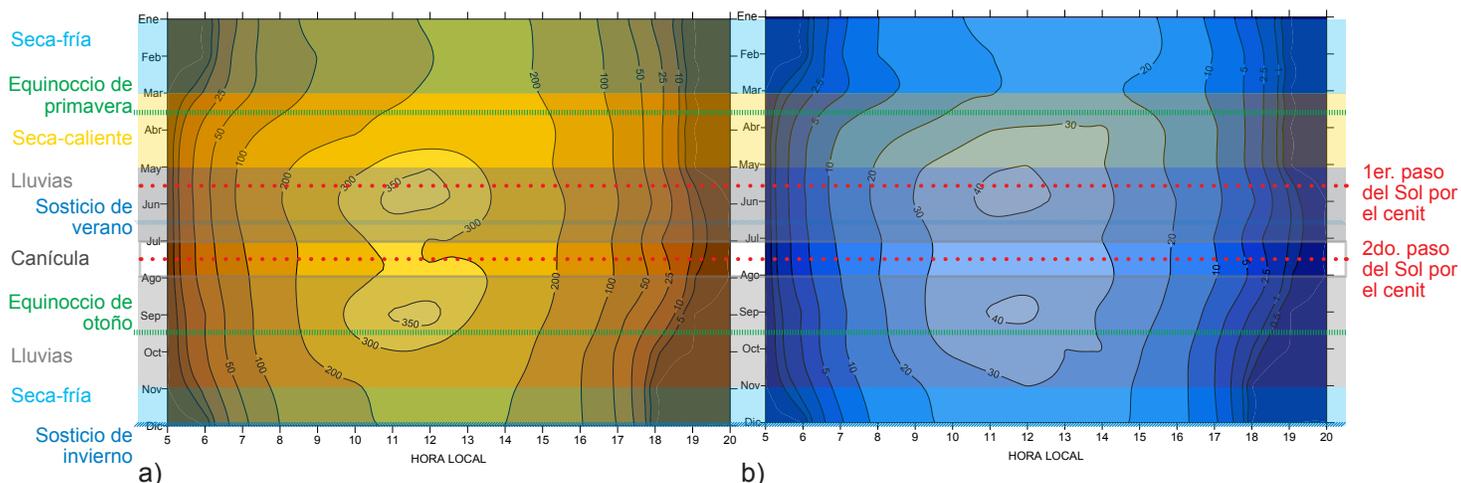
Para evaluar el comportamiento de los flujos radiométricos y fotométricos registrados es importante relacionar las figuras —presentadas en el inciso 4.2— de cada parámetro medido con las trayectorias solares del sitio —solsticios, equinoccios y pasos del Sol por el cenit del lugar—, así como con las temporadas y las características climáticas a lo largo de 2014. Las figuras 5.12 a la 5.18 muestran la irradiancia, *a*, y la iluminancia, *b*, registradas durante el 2014. El eje horizontal representa la hora local y el eje vertical los meses del año. La irradiancia es representada en gradientes con tonalidades café y amarillo; el color café refleja los valores más bajos y el amarillo los valores más altos. En la irradiancia las isolíneas se revelan, en general, cada 100 W/m² y a cada 5, 15, 25 o 50 W/m² cuando es pertinente. La iluminancia es representada en gradientes con tonalidades azules; el azul oscuro refleja los valores más bajos y el azul claro los valores más altos. Las isolíneas que conforman la figura se revelan, en general, cada 10 klux y a cada 0.5, 2.5 o 5 klux cuando es pertinente. Los gradientes de la irradiancia y la iluminancia muestran patrones similares, las pequeñas diferencias se deben a la representación de sus magnitudes a través de las isolíneas; contemplando que existe una ligera diferencia en las magnitudes de ambos parámetros, como lo expresan las regresiones mínimas cuadráticas de los diagramas de dispersión de la irradiancia e iluminancia global, los cuales se analizan en el inciso 5.4.1

5.3.1 Irradiancia e iluminancia global, difusa y directa

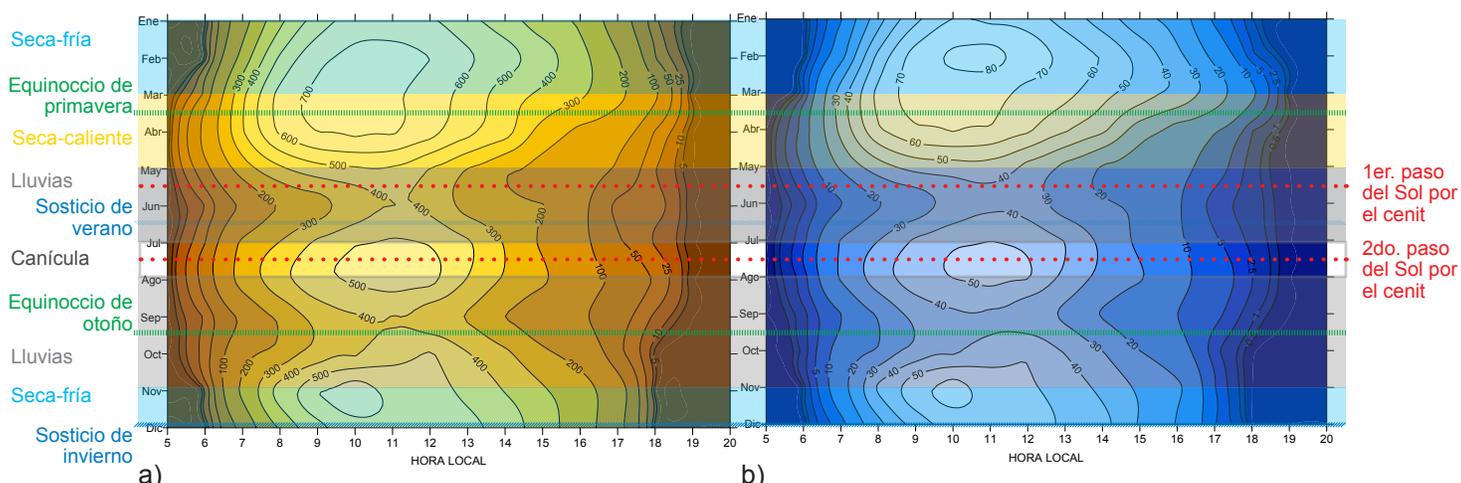
En las figuras 5.12 hasta la 5.14 se relacionan horizontalmente los flujos globales, difusos y directos —tanto de la irradiancia como de la iluminancia— y se marcan los solsticios, los equinoccios, el paso del Sol por el cenit del lugar, los límites de las temporadas climáticas y la canícula para la descripción temporal de cada uno de estos parámetros.



a) b)
 Figura 5.12: Flujos globales, a) irradiancia y b) iluminancia



a) b)
 Figura 5.13: Flujos difusos, a) irradiancia y b) iluminancia



a) b)
 Figura 5.14: Flujos directos, a) irradiancia y b) iluminancia

Flujos globales. En los flujos globales (figura 5.12) los valores más altos a lo largo del día se presentan de las 10 a las 14 horas, aproximadamente, con valores que superan los 600 W/m^2 o 60 klx hasta los 900 W/m^2 o 90 klx , el comportamiento de la irradiancia y de la iluminancia es similar. Ambos parámetros globales registrados en 2014 presentan tres máximos entre las 10:30 y las 12:30 del día, hora local. El primer máximo se presenta en febrero con un valor de 850 W/m^2 o 85 klx ; en la irradiancia este máximo se une con el segundo máximo en abril con valores de 900 W/m^2 o 90 klx , y el tercero de la mitad de junio a la mitad de agosto, tanto en la irradiancia como en la iluminancia global.

El primer máximo es consecuencia de los cielos despejados del mes de febrero, el cual presenta solo 1 mm de lluvia, menos del promedio.

El segundo máximo y el más intenso de los tres, en abril, se debe a los cielos despejados de la mañana y mitad del día. Aunque se presentan lluvias en este mes, estas caen por la tarde-noche. En estas fechas al medio día solar, este segundo máximo también coincide con que los ángulos incidentes sobre una superficie horizontal son menores, aumentando la densidad de captación de radiación solar.

El tercer máximo está relacionado con la canícula del 2014. A los cielos despejados de esta característica climática se le atribuye el tercer máximo en los flujos globales de la irradiancia y de la iluminancia. En este caso, el tercer máximo también coincide con el segundo paso del Sol por el cenit, el 27 de julio, donde la densidad de captación de radiación solar sería de 100%. Sin embargo, este máximo está desplazado 1 hora antes del instante donde el Sol llega al cenit del lugar. El primer paso del Sol por el cenit, el 18 de mayo, se desvanece dentro de la temporada de lluvias del 2014.

Flujos difusos. En la figura 5.13, los valores más altos de los flujos difusos se presentan de las 9:30 a las 13:30 horas —en el caso de la irradiancia— y hasta las 14 horas —en el caso de la iluminancia—, donde los valores superan los 300 W/m^2 o 30 klux y llegan a los 350 W/m^2 o 40 klux . En estos flujos se presentan dos máximos a lo largo del año.

El primer máximo se presenta en ambos parámetros entre las 10:45 y las 12:30 del día en hora local de mayo a mitades de junio —entre el segundo y el tercer máximo de los flujos globales— justo dentro de la temporada de lluvias del 2014, la cual comienza en mayo. El segundo máximo se presenta en septiembre entre las 10:45 y las 12:30 —por debajo del tercer máximo de los flujos globales— dentro de la temporada de lluvias. Los cielos parcialmente nublados y nublados ligeros a densos de la temporada lluviosa del 2014 generan el aumento de los flujos difusos, reflejándose en estos máximos.

Flujos directos. En la figura 5.14, los valores más altos se presentan de las 8 a las 14 horas con valores que superan los 300 W/m² o 30 klux hasta los 700 W/m² o 80 klux. El flujo directo muestra tres máximos en ambos parámetros.

El primero, el más intenso, se presenta de mitades de enero hasta abril de las 8:30 a las 12 horas en la irradiancia directa —donde el valor máximo es de 700 W/m²—. En la iluminancia directa este máximo se presenta de principios de enero hasta abril y hasta las 12:30 horas —con un valor de 70 klux— y dentro de este se presenta otro máximo de 80 klux en febrero también por la mañana. Se atribuye a los cielos despejados de la temporada de secas del 2014 —tanto fría como caliente— este primer máximo directo y aunque en abril se presentan precipitaciones, estas generalmente son por la tarde-noche, dejando las mañanas y el medio día con cielos despejados.

El segundo máximo se presenta de las 9:45 a las 12 horas con valores de 500 W/m² o 50 klux durante el mes de julio. Este máximo es resultado de los cielos despejados de la mañana de la canícula del 2014. También está relacionado con el segundo paso del Sol por el cenit del lugar. En este caso los instrumentos que miden los flujos directos de forma perpendicular están captando la radiación solar con el Sol en el cenit, cuyo camino óptico es menor en comparación con su posición en el horizonte.

El tercer máximo se presenta de las 9 o 9:30 a las 10:30 horas con valores de 600 W/m² o 60 klux en noviembre. Los cielos despejados de noviembre del 2014 son responsables de este

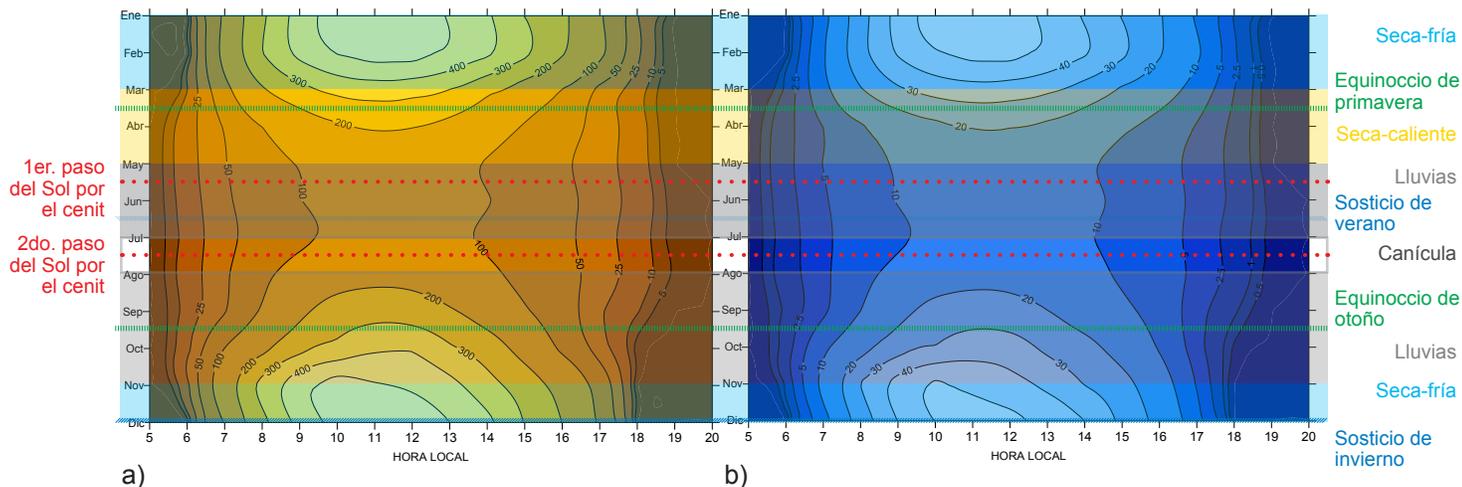
máximo. Este tercer máximo de los flujos directos no se ve reflejado en los flujos globales debido a la inclinación oblicua de los ángulos solares incidentes a finales del año sobre una superficie horizontal y a la posición de los instrumentos que miden los flujos globales, a diferencia de los flujos directos, los cuales son captados por instrumentos orientados para recibir los rayos solares perpendicularmente.

En la figura 5.14, los flujos directos indican que los rayos solares que llegan a la superficie de la Tierra son más intensos por la mañana que por la tarde. Esto se debe a la nubosidad, la cual se forma principalmente por las tardes en el sitio de estudio y a los componentes atmosféricos presentes en la atmósfera del lugar. Como se indica en el inciso 3.1.1, la parte sur-poniente de la cuenca recibe por la tarde las partículas suspendidas —generadas principalmente en el Norte de la cuenca—, donde gran parte de estas quedan atrapadas por la barrera orográfica. De la misma forma, gases como los óxidos de nitrógenos son arrastrados por los vientos dominantes del Norte y se concentran en el sur-poniente, donde bajo la incidencia de los rayos solares se convierten en ozono troposférico. La nubosidad, así como las partículas suspendidas y los gases contaminantes son los responsables de atenuar los flujos directos por la tarde.

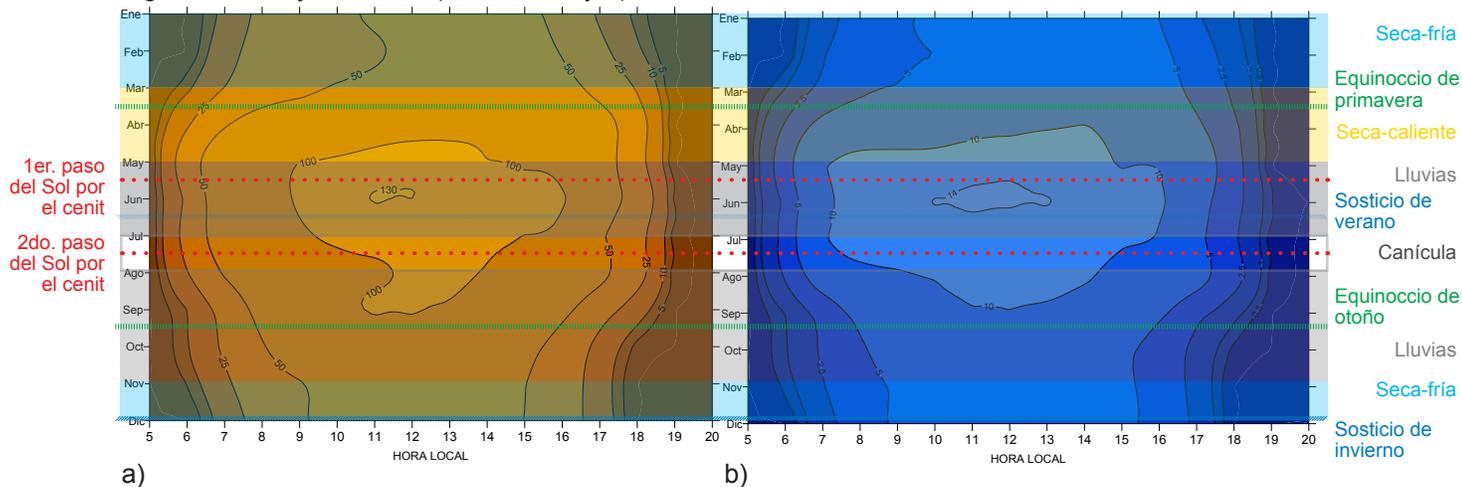
5.3.2 Irradiancia e iluminancia vertical al Este, Sur, Oeste y Norte

En las figuras 5.15 hasta la 5.18 se relacionan horizontalmente los flujos verticales de la irradiancia y la iluminancia en cada orientación comenzando por el Sur, Norte, Este y finalizando con el Oeste. En estas figuras se marcan los solsticios, los equinoccios, el paso del Sol por el cenit del lugar, los límites de las temporadas climáticas y la canícula para la descripción temporal de cada uno de estos parámetros verticales medidos.

Estos parámetros reciben los flujos difusos radiométricos y fotométricos de una porción de la bóveda celeste —hacia donde están orientados— y los flujos directos, provenientes de los rayos solares, cuyos ángulos incidentes varían según la posición del Sol a lo largo del día y del año. Estos parámetros verticales no consideran la reflexión del suelo.



a) b)
 Figura 5.15 Flujos al Sur, a) irradiancia y b) iluminancia



a) b)
 Figura 5.16 Flujos al Norte, a) irradiancia y b) iluminancia

Flujos verticales al Sur. Los flujos verticales de irradiancia e iluminancia al Sur (figura 5.15) presentan los valores más altos del principio del año hasta el equinoccio de primavera y del equinoccio de otoño a finales del año —pasando por el solsticio de invierno— de las 7:30 a las 16 horas, con valores desde 200 W/m² o 20 klux hasta 450 W/m² o 45 klux en la irradiancia y en la iluminancia. El máximo valor al Sur se presenta en ambos flujos de las 9:30 a las 13 horas, aproximadamente, de enero a febrero y de noviembre a diciembre.

Los máximos en esta orientación están relacionados con las trayectorias solares del sitio. En el otoño e invierno, los rayos solares tienen un ángulo incidente menor sobre los planos orientados al Sur; esto quiere decir que inciden de forma más directa sobre estos planos, captando más radiación solar. A partir del equinoccio de otoño, el Sol sale del sureste y se eleva durante el día, incidiendo en la orientación Sur con ángulos cada vez más perpendiculares al plano, conforme se acerca el solsticio de invierno. En este momento, el ángulo de incidencia es de 47.23 grados al medio día solar; posteriormente, el Sol se oculta en el suroeste (figura 5.10 y 5.11). Estos máximos también son consecuencia de los cielos despejados de la temporada seca-fría de principio y de finales del 2014. Estos cielos permiten la alta irradiancia e iluminancia y, aunque noviembre y diciembre del 2014 presentan más lluvias que el promedio, estas caen por la tarde-noche.

Flujos verticales al Norte. En la orientación opuesta al Sur, el Norte (figura 5.16), los valores más altos, por arriba de 100 W/m^2 o 10 klux hasta los 130 W/m^2 o 14 klux, se presentan de mayo a septiembre de las 9 a las 16 horas en la irradiancia y de 7 a 16 horas en el caso de la iluminancia. Los valores más altos son cercanos a los dos pasos del Sol por el cenit del lugar. Entre estos dos pasos, el Sol incide sobre la superficie al Norte en las horas centrales del día, elevando los flujos incidentes en esta orientación.

El máximo valor en la irradiancia de 130 W/m^2 y en la iluminancia de 14 klux se presenta en junio; en la irradiancia, al medio día, y en la iluminancia, entre las 10 y las 13 horas. Este es el resultado de la incidencia de los flujos directos en el Norte en el solsticio de verano en esta latitud. (Figura 5.10 y 5.11)

Flujos verticales al Este. Los valores más altos en esta orientación (figura 5.17), se presentan por la mañana desde las 7 hasta las 11:30 horas, aproximadamente, con valores por arriba de 200 W/m^2 o 20 klux hasta 700 W/m^2 o 70 klux. Estos valores altos son consecuencia de la orientación y la salida del Sol a lo largo del año. (Figura 5.10 y 5.11)

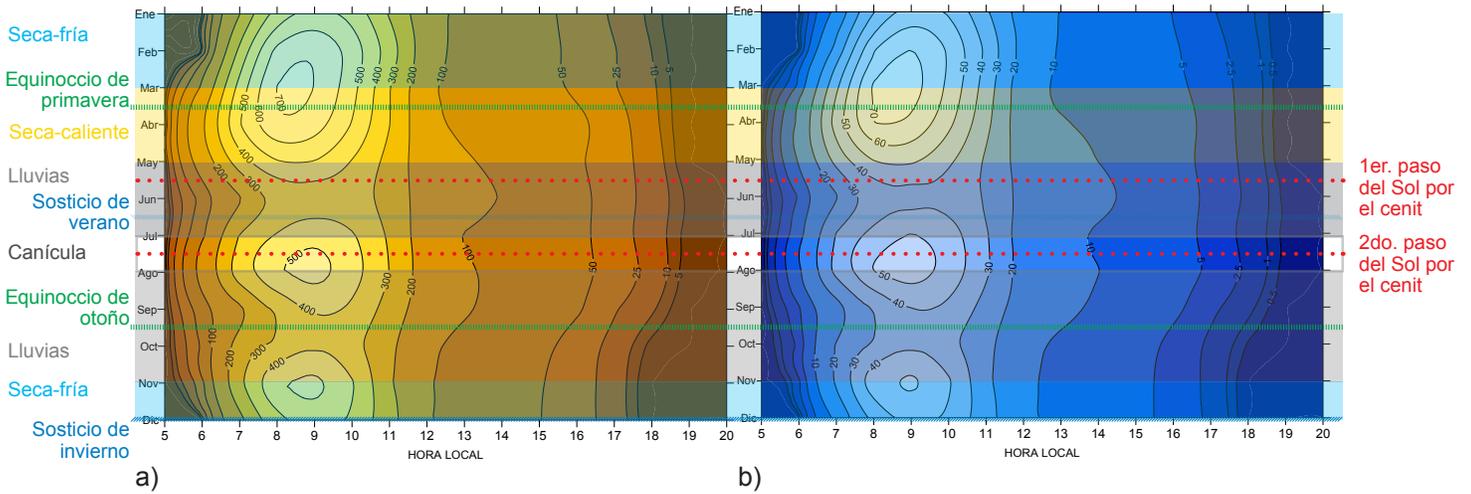


Figura 5.17: Flujos al Este, a) irradiancia y b) iluminancia

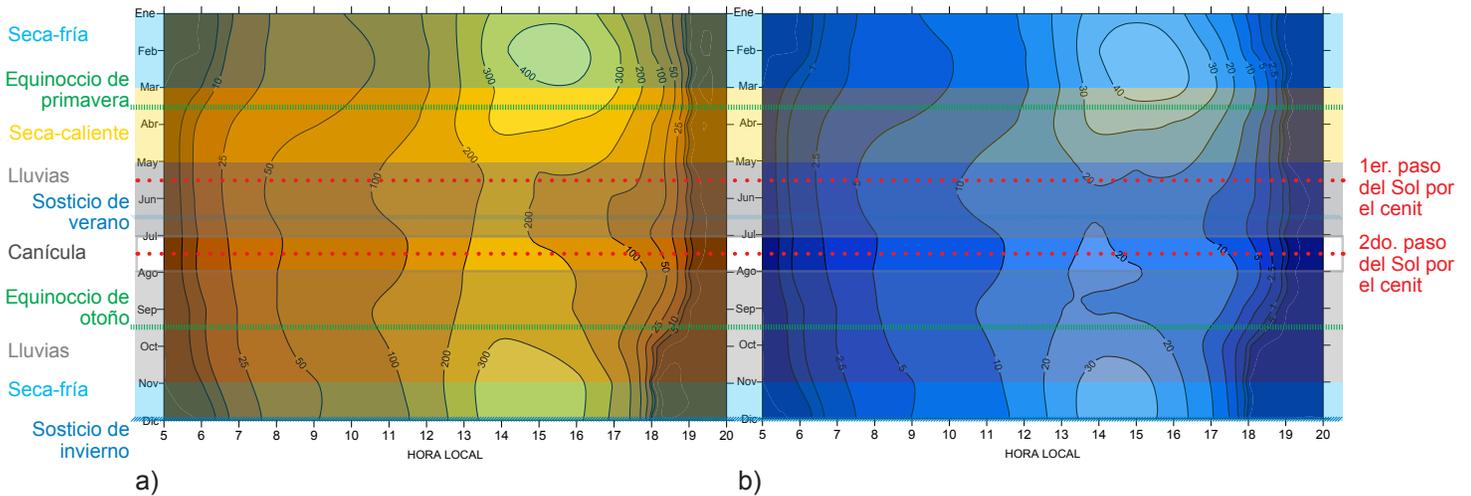


Figura 5.18: Flujos al Oeste, a) irradiancia y b) iluminancia

Son tres los máximos que presentan estos flujos verticales al Este. El primero y más intenso, con valores de 700 W/m^2 o 70 klux , ocurre en el equinoccio de primavera entre las 8 y 9 de la mañana. El segundo, con valores de 500 W/m^2 o 50 klux , en julio de las 8:30 a las 9:30, y el tercero, con valores de 450 W/m^2 o 45 klux , en noviembre entre las 8 y las 9 de la mañana. El primer máximo en marzo está relacionado con la temporada seca-caliente. El segundo máximo en julio se relaciona con la canícula y el tercer máximo en noviembre, con la temporada seca-fría. En todos los casos los cielos despejados por la mañana en estos meses de 2014 propician estos máximos valores registrados.

Flujos verticales al Oeste. En esta orientación (figura 5.18), los flujos más altos se presentan en la tarde, a partir de las 12:30 hasta las 17 o 17:30 horas, aproximadamente, con valores desde 200 W/m² o 20 klux hasta 400 W/m² o 40 klux. Estos valores son menores a los que registra la orientación Este, a pesar de la simetría en las trayectorias solares. En este caso, las condiciones climáticas del sitio determinan esta diferencia. La climatología del sitio indica que la nubosidad y las precipitaciones se presentan principalmente por la tarde; estas disminuyen los flujos incidentes al Oeste.

En esta orientación se presentan dos máximos: el primero de mitades de enero a marzo con valores de 400 W/m² o 40 klux, y el segundo de octubre a diciembre con valores de 300 W/m² o 30 klux. Ambos máximos se presentan en la temporada seca-fría de principios y finales del 2014. En esta orientación se desvanece el máximo que se presenta en la orientación Este en julio. Este desvanecimiento se debe a que julio del 2014 presenta nubosidad y precipitaciones por la tarde, atenuando los flujos al Oeste.

En resumen, en la primera temporada seca-fría del 2014 —la cual fue más seca y más calurosa de lo usual— y en la temporada seca-caliente —más cálida y más lluviosa con relación a la climatología del sitio, específicamente en abril—, los flujos horizontales globales y directos normales presentan valores máximos debido a los cielos despejados durante el día. Los flujos horizontales globales, directos normales y los flujos globales al Sur presentan estos máximos en las horas centrales del día, mientras que los flujos globales al Este presentan valores máximos en las mañanas y al Oeste por las tardes, debido a las trayectorias solares del lugar. En la temporada de lluvias del 2014, la cual fue extensa e intensa —con cielos parcialmente nublados en las horas centrales del día y lluvias por la tarde y noche, así como días completamente nublados y lluviosos— los flujos horizontales difusos presentan sus valores máximos. Al mismo tiempo, los flujos horizontales globales y directos normales presentan valores mínimos en las mismas horas centrales del día. En el mes de julio del 2014, dentro de la temporada de lluvias, se presenta una canícula. En esta, los flujos horizontales globales y

directos normales aumentan, mientras que los flujos difusos disminuyen, en gran medida por los cielos despejados durante el día y el segundo paso del Sol por el cenit del lugar. Los flujos globales orientados hacia el Sur y Norte están más influenciados por las trayectorias solares que por los cielos despejados de la canícula. En la orientación Este, los cielos despejados de la mañana en la canícula elevan los flujos, mientras que con la presencia de nubosidad por las tardes en la cuenca, los flujos en el mes de julio en la orientación Oeste disminuyen. En la última temporada seca-fría del año 2014 —la cual fue más lluviosa y más calurosa de lo usual— los flujos normales directos presentan valores altos, lo cual no se logra reflejar en los flujos globales horizontales debido a la alta inclinación de los rayos solares sobre una superficie horizontal en esta época del año. Mientras que en los flujos globales verticales sí se logra reflejar este incremento, las orientaciones al Sur, Este y Oeste presentan valores altos en diferentes horarios de acuerdo con las trayectorias solares del sitio.

El análisis de las características climáticas del 2014, de las trayectorias solares del sitio y del comportamiento temporal de los flujos radiométricos y fotométricos indican que existe una clara interrelación entre ellos, son complementarios, no se contraponen ni se contradicen entre sí. Estos análisis nos llevan al entendimiento integral del fenómeno natural relacionado con la distribución temporal y espacial de los flujos radiométricos y lumínicos sobre la superficie de la Tierra.

5.4 RELACIÓN ENTRE LA IRRADIANCIA E ILUMINANCIA Y DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA LUMINOSA MEDIA HORARIA MENSUAL GLOBAL Y DIFUSA

Los flujos radiométricos y fotométricos son registrados de forma simultánea en el ORS y en la “Plataforma de observación de luz natural”, a través de piranómetros —de la marca Kipp and Zonen, CMP21— y fotómetros —de la marca LI-COR, LI-210SA—. Es de especial interés para este trabajo analizar la relación entre la irradiancia y la iluminancia medidas en la Cuenca de México, ya que diferentes estudios concuerdan que esta relación varía según las carac-

terísticas geográficas y climáticas de cada lugar.⁹ Al conocer la relación entre ambas, es posible predecir un flujo a partir de otro bajo diferentes condiciones atmosféricas. Las mediciones de irradiancia son más comunes a nivel local, nacional y mundial que las mediciones de iluminancia; por lo tanto, son los flujos fotométricos los que podrán estimarse —si no se cuenta con registros de estos— a partir de los radiométricos.

5.4.1 Análisis de los diagramas de dispersión, de la regresión mínimo cuadrática y el cuadrado de la correlación de la irradiancia e iluminancia global

Los doce diagramas de dispersión del 2014 (gráficas 4.16 a la 4.27), muestran la relación entre la irradiancia —variable explicativa— y la iluminancia —variable respuesta—. La asociación entre ambas variables es positiva, lineal y fuerte.

La regresión mínimo cuadrática, $y = bx + a$ traza una línea recta lo más cercano a todos los puntos del diagrama y facilita la predicción de los valores de la variable respuesta; en este caso, la iluminancia. De tal forma, si sustituimos “x” por un valor concreto de irradiancia, simulamos la iluminancia.

El cuadrado de la correlación, R^2 , es la variación que esperamos obtener de la ecuación de la regresión a medida que “x” se mueve a lo largo de la recta.¹⁰ Los coeficientes del cuadrado de la correlación de todos los meses de 2014 indican que más de 99% de la variación de la iluminancia con respecto a la irradiancia se explican por la relación lineal. (Tabla 4.41). Existen pocos puntos que se distinguen del aspecto general del gráfico, alejándose de la línea recta; estos son conocidos como observaciones atípicas y se analizarán más adelante.

Entre la irradiancia y la iluminancia global existe una relación causa-efecto, debido a que el flujo fotométrico es una franja de todo el espectro radiométrico. Sin embargo, la nubosidad, el vapor de agua, la concentración de aerosoles y de gases, pueden modificar

9 A.H. Fakra, H. Boyer, F. Miranville y D. Bigot, “A Simple Evaluation of Global and Diffuse Luminous Efficacy for All Sky Conditions in Tropical and Humid Climate”, *Renewable Energy* 36, n.º 1 (2011): 298–306, 1.

10 David S. Moore, *Estadística aplicada básica*. Trad. por Jordi Comas (Barcelona: Antoni Bosch, 1995), 126.

ligeramente esta relación.¹¹ Dada esta fuerte linealidad positiva entre ambos flujos globales, analizaremos la eficacia luminosa, con el fin de predecir la iluminancia a partir de la irradiancia.

5.4.2 Eficacia luminosa media horaria mensual, promedios, máximos y mínimos

La eficacia luminosa es una propiedad de las fuentes lumínicas, la cual indica la porción del flujo radiométrico utilizable para la visión humana.¹² La eficacia luminosa es la razón entre el flujo fotométrico —lux o lm/m²— y el flujo radiométrico —W/m²— y, por ende, sus unidades son lm/W. A través de estudios experimentales se han establecido valores para la eficacia luminosa global, difusa y directa bajo diferentes condiciones de cielo, los cuales miden la irradiancia y la iluminancia de forma simultánea. Estos trabajos concluyen que la eficacia luminosa global varía entre 105 y 128 lm/W para condiciones de cielo promedio.¹³ Para la eficacia luminosa difusa se ha tomado la constante de 125 lm/W.¹⁴ Los valores de eficacia luminosa han sido empleados para estimar la iluminancia exterior a partir de la irradiancia, en particular donde solo existen registros de irradiancia. Sin embargo, los mismos estudios advierten de la cautela necesaria para realizar esta predicción, ya que los rangos de los valores de la eficacia luminosa varían de una región a otra.¹⁵ Cada región tiene sus propios rangos de eficacia luminosa; ya que la variabilidad de los rangos de cada sitio depende del clima local, de la geografía del sitio y de fenómenos meteorológicos observados en la región.

Dadas las particularidades del sitio de estudio, una aportación de este trabajo es determinar los valores de la eficacia luminosa promedio horaria para cada mes del año, a partir de las mediciones realizadas de irradiancia e iluminancia global y difusa en 2014.

11 D. Dumortier, "Evaluation of Luminous Efficacy Models According to Sky Types and Atmospheric Conditions", *Proceedings Lux Europa Conference* (1997): 1068–1080, 1.

12 Joseph C. Lam y Danny H.W. Li, "Luminous Efficacy of Daylight Under Different Sky Conditions", *Energy Conversion and Management* 37, n.º 12 (1996): 1703–11, 1.

13 A.H. Fakra *et al.*, "A Simple Evaluation of Global and Diffuse Luminous Efficacy for All Sky Conditions in Tropical and Humid Climate", 1; Tariq Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 2.ª ed. (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004), 107; Ralph G. Hopkinson, P. Petherbridge y James Longmore, *Daylighting* (Londres: Heinemann, 1966), 50.

14 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 107.

15 Hyo Joo Kong y Jeong Tai Kim, "Modeling Luminous Efficacy of Daylight for Yongin, South Korea", *Energy & Buildings* 62 (2013): 550–58, 550.

Observaciones atípicas a partir del cálculo de la eficacia luminosa. Antes de determinar los valores de la eficacia luminosa para el sitio de estudio, es necesario identificar las observaciones atípicas encontradas en los diagramas de dispersión de la irradiancia y la iluminancia. Para esto, se calcula la eficacia luminosa para cada medida de iluminancia e irradiancia validadas. Posteriormente, se estandarizan los valores medidos a través del promedio y de la desviación estándar. El valor estandarizado muestra el número de desviaciones estándar que difiere de la media o valor promedio.¹⁶ Por lo tanto, si el valor estandarizado calculado es menor a -3 o mayor a 3, significa que se encuentra a más de 3 desviaciones estándar a partir de la media y, por lo tanto, se considera atípico. El promedio anual de la suma de observaciones atípicas mensuales es de 1% del total de mediciones, lo cual no es significativo y, por esta razón, no se investiga más a fondo estas observaciones atípicas (tabla 5. 1). Pero sí se puede deducir que, en parte, se debe a la sensibilidad de cada uno de los sensores y al tiempo de respuesta de cada uno de estos, ya que las mediciones son muestras que se toman cada minuto.

Tabla 5.1 Porcentaje de observaciones atípicas para el flujo global y difuso

Meses	Global			Difusa		
	Promedio eficacia luminosa	Desviación estándar	% de observaciones fuera de 3 desviaciones estándar	Promedio eficacia luminosa	Desviación estándar	% de observaciones fuera de 3 desviaciones estándar
Enero	103.1	10.3	1.5	125.6	14.3	0.1
Febrero	101.2	8.4	1.7	130.6	10.3	0.7
Marzo	103.6	10.9	1.2	102.7	14.6	0.9
Abril	103.8	7.7	1.3	120.6	12.4	0.1
Mayo	105.1	9.2	0.9	113.7	12.4	0.3
Junio	107.1	8.0	1.4	114.1	10.2	0.8
Julio	104.7	15.7	0.5	113.6	17.1	0.4
Agosto	103.4	9.5	1.4	114.2	14.6	0.1
Septiembre	106.3	28.3	1.1	111.2	11.1	0.7
Octubre	105.7	10.6	0.8	118.8	13.1	0.4
Noviembre	98.4	9.9	0.8	118.4	13.8	0.3
Diciembre	94.2	8.0	1.0	116.1	13.4	0.1
Promedio anual	103		1	117		0.4

16 Moore, *Estadística aplicada básica*, 68.

Dado que la relación entre los flujos globales es lineal y fuerte, se supone lo mismo para los flujos difusos y se realiza el mismo proceso —descrito en el párrafo anterior— para el flujo difuso radiométrico y fotométrico medidos. Según la tabla 5.1, el promedio anual de la suma de observaciones atípicas mensuales es de 0.4% del total de mediciones, inferior al de los flujos globales. De la misma forma, estos son insignificantes y no se investigan más a fondo estas observaciones.

Eficacia luminosa media horaria mensual global. Para determinar los valores de la eficacia luminosa media horaria y mensual global se dividen los valores validados y promediados de la iluminancia y de la irradiancia global. La tabla se muestra a continuación. (Tabla 5.2 y 5.3)

Tabla 5.2 Eficacia luminosa media horaria mensual global, en lm/W

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Ene		100	102	104	104	104	103	103	103	101	100	95	119		103
Feb		95	102	104	103	102	101	101	100	99	98	95	115		101
Mar	114	104	97	99	99	98	95	101	108	106	107	109	112		104
Abr	106	105	106	105	104	103	102	102	102	103	103	101	108		104
May	108	107	107	106	104	103	103	103	104	105	105	103	109		105
Jun	112	108	108	107	106	105	104	104	105	105	106	109	108	113	107
Jul	112	107	108	106	104	103	102	102	103	104	105	109	108	92	105
Ago	101	107	107	105	105	104	103	103	103	104	106	105	95	101	103
Sep	109	108	109	108	107	106	105	105	106	108	107	108	97		106
Oct	103	103	106	105	104	103	102	103	102	102	102	102	138		106
Nov	113	93	98	99	99	99	99	98	98	97	102	84			98
Dic		91	95	96	97	97	96	95	94	93	93	89			94

Tabla 5.3 Eficacia luminosa media horaria mensual global, en lm/W. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Prom	109	102	104	104	103	102	101	102	102	102	103	101	111	102	103
Máx	114	108	109	108	107	106	105	105	108	108	107	109	138	113	110
Mín	101	91	95	96	97	97	95	95	94	93	93	84	95	92	94

Eficacia luminosa media horaria mensual difusa. Para determinar los valores de la eficacia luminosa media horaria y mensual difusa se dividen los valores validados y promediados de la iluminancia y de la irradiancia difusa. La tabla se muestra a continuación. (Tabla 5.4 y 5.5)

Tabla 5.4 Eficacia luminosa media horaria mensual difusa, en lm/W

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Ene		128	127	126	126	126	126	124	123	122	122	121	135		126
Feb		127	135	138	137	136	131	128	129	127	124	123	133		131
Mar	139	101	100	100	104	105	98	90	93	86	96	107	115		103
Abr	122	124	127	126	125	124	122	119	117	114	113	114	120		121
May	112	113	114	115	117	117	115	114	113	112	113	112	113		114
Jun	113	110	112	112	114	116	116	114	115	114	113	113	118	118	114
Jul	112	112	113	116	116	117	120	119	117	114	113	114	113	94	114
Ago	111	116	116	117	118	118	120	117	115	114	114	114	103	105	114
Sep	110	109	111	112	113	114	113	114	113	112	111	113	99		111
Oct	111	115	115	116	117	119	120	119	117	117	117	119	143		119
Nov	123	114	120	121	122	119	118	116	116	117	120	114			118
Dic		110	114	115	116	117	119	119	118	117	117	115			116

Tabla 5.5 Eficacia luminosa media horaria mensual difusa, en lm/W. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Prom	117	115	117	118	119	119	118	116	115	114	114	115	119	106	116
Máx	139	128	135	138	137	136	131	128	129	127	124	123	143	118	131
Mín	110	101	100	100	104	105	98	90	93	86	96	107	99	94	99

El promedio anual para el 2014 de la eficacia luminosa global es de 103 lm/W, el promedio mínimo de 94 lm/W y el máximo de 110 lm/W. Los mínimos se encuentran en los meses de noviembre y diciembre —98 y 94 lm/W— en la segunda temporada seca-fría del año de estudio, la cual fue más lluviosa y más calurosa de lo usual. Aun así, los cielos despejados y parcialmente nublados de las horas centrales del día de esta temporada generan estos valores de eficacia luminosa. Fuera de estos meses, el patrón de temporadas y de nubosidad no

se ve claramente reflejado en los promedios mensuales de la eficacia luminosa. El promedio anual global se encuentra ligeramente por debajo de los rangos promedios reportados —105 y 128 lm/W—, sin embargo, refleja las condiciones locales de este año.

El promedio anual para el 2014 de la eficacia luminosa difusa es de 116 lm/W, el promedio mínimo de 99 lm/W y el máximo de 131 lm/W. Algunos mínimos se encuentran en el mes de marzo. Este mes mostró ciertas fallas de medición; a este hecho se le atribuye los valores mínimos. El promedio anual difuso se encuentra ligeramente por debajo de la constante reportada —125 lm/W—, lo cual confirma que efectivamente las constantes de la eficacia luminosa varían de región a región.

Los valores de la eficacia luminosa difusa son mayores a la global, esto indica que la eficacia luminosa difusa tiene mayor eficiencia que la global. Esto quiere decir que obtenemos más flujo difuso luminoso por cada unidad de flujo radiante. Esto se debe a que el flujo radiométrico es altamente absorbido por gases como el dióxido de carbono y por algunos aerosoles, mientras que el flujo difuso fotométrico no se ve afectado por la absorción de este gas ni por los aerosoles.¹⁷ De tal forma que, a mayor concentración de gases atmosféricos y de aerosoles en la atmósfera, se obtiene mayor eficacia luminosa difusa en comparación a la eficacia luminosa global. Esto es de especial interés en el sitio de estudio debido a la concentración de dióxido de carbono y aerosoles. La alta eficacia luminosa difusa nos indica que es necesario aprovechar este flujo difuso disponible en el sitio para iluminar naturalmente el interior de las edificaciones a favor del uso eficiente de las energías.

Con los valores de eficacia luminosa que se muestran en las tablas se puede calcular la iluminancia media horaria mensual en esta región de la Cuenca de México o en regiones con las mismas características de la cuenca y en un futuro deberán ser comparados con los resultados de mediciones de periodos de más de un ciclo climatológico.

17 Richard Kittler, Miroslav Kocifaj y Stanislav Darula, *Daylight Science and Daylighting Technology* (Nueva York: Springer, 2011), 104.

5.5 EVALUACIÓN DEL RECURSO LUMÍNICO DIFUSO DE LA CUENCA DE MÉXICO

Según el análisis de la eficacia luminosa en la Cuenca de México, determinada en el inciso anterior, el flujo difuso proporciona más lúmenes por Watt que el flujo global. Esto indica que el flujo difuso es más eficiente, al generar más flujo luminoso por unidad de flujo radiante. Dada esta eficacia, este trabajo de investigación se aboca a la evaluación de los flujos difusos, para su aprovechamiento en los interiores arquitectónicos. Esto con el fin de propiciar el ahorro energético en dichos ambientes.

5.5.1 Iluminancia difusa vertical, simulada a partir de mediciones de la iluminancia vertical global y directa normal

Los valores de la *iluminancia difusa vertical* ($E_{DV(i)}$) se simulan a partir de las mediciones de la iluminancia vertical global en cada una de las orientaciones —Este, Sur, Oeste y Norte— y la iluminancia directa normal, contemplando el ángulo incidente en cada orientación, a través de la siguiente fórmula¹⁸:

$$E_{DV(i)} = E_{GV(i)} - E_{DN} * \text{Cos}(\theta_z) \quad (5.1)$$

$$\text{Para: } \theta_z < 90^\circ, E_{DV(i)} = E_{GV(i)} - E_{DN} * \text{Cos}(\theta_z)$$

$$\text{Para: } \theta_z > 90^\circ, E_{DV(i)} = E_{GV(i)}$$

Donde:

$E_{GV(i)}$ = iluminancia vertical global para cada orientación: Este, Sur, Oeste, Norte, en klux

E_{DN} = iluminancia directa normal, en klux

θ_z = ángulo de incidencia, en radianes

18 A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, y V. Marinelli, "Simplified Correlations of Global, Direct and Diffuse Luminous Efficacy on Horizontal and Vertical Surfaces", *Energy & Buildings* vol. 40, n.º 11 (2008): 1991–2001, 1996.

Para calcular la iluminancia difusa vertical deben ser válidas tanto las mediciones de iluminancia vertical global como la iluminancia directa normal. A continuación, se muestran los valores de la iluminancia difusa vertical media horaria para cada mes del año 2014, los promedios, máximo y mínimos para la orientación Este, Sur, Oeste y Norte.

Iluminancia difusa vertical al Este. La figura 5.19 muestra que los valores más altos de la iluminancia difusa vertical al Este se presentan de marzo a mediados de octubre con valores superiores a los 15 klux de las 7:30 a las 12 horas. Los valores máximos se encuentran en un área que abarca de abril a septiembre de las 8 a las 10 horas, con valores de 20 klux. Estos valores se encuentran entre el primer y el tercer máximo de la iluminancia vertical al Este (figura 4.11) y están relacionados con la temporada de lluvias de la cuenca, donde los cielos despejados, parcialmente nublados y nublados de la mañana, proporcionan estos valores (figura 5.23). También están relacionados con el ángulo incidente sobre el plano vertical al Este. Los valores después del medio día son iguales a los valores de la iluminancia vertical global al Este.

El promedio de la iluminancia difusa vertical al Este, por la mañana hasta las 12 horas, es de 12 klux, con un máximo de 17 y un mínimo de 8 klux. Por la tarde, hasta las 19 horas, el promedio es de 5 klux, con un máximo de 7 y un mínimo de 4 klux. (Tabla 5.7 y gráfica 5.3)

Iluminancia difusa vertical al Sur. A diferencia de la iluminancia global vertical al Sur (figura 4.12), la iluminancia difusa vertical al Sur (figura 5.20), muestra una reducción en los valores en la temporada seca-caliente del año, en marzo y abril en las horas centrales del día, de 10 a 5 klux. Los cielos despejados en estos meses reducen la iluminancia difusa. Asimismo, los valores de la iluminancia global vertical se reducen a 5 klux de las 7 a las 8 horas y de las 15 a las 16:30 horas debido al ángulo incidente sobre el plano vertical al Sur, el cual en estas horas es elevado. En la temporada de lluvias los valores se mantienen en 10 klux, de las 8 a las 15 horas, aproximadamente, y se alargan hasta finales de la temporada seca-fría. Dentro de

estos valores se presenta un máximo de 15 klux en octubre de las 10 a las 12:30 horas aproximadamente. Este se relaciona con las precipitaciones que se presentaron en este mes, las cuales fueron superiores que el promedio y al valor máximo de las precipitaciones registradas desde el 1963, generando nubosidad, la cual aumenta el flujo difuso.

El promedio de la iluminancia difusa vertical al Sur es de 8 klux de las 6 a las 19 horas, con un máximo de 10 y un mínimo de 5 klux a lo largo de todo el año. (Tabla 5.9 y gráfica 5.4)

Iluminancia difusa vertical al Oeste. En comparación con los valores de la iluminancia global vertical al Oeste (figura 4.13), la iluminancia difusa vertical hacia la misma orientación (figura 5.21), presenta una reducción en sus valores más altos de 30 y 20 klux a 10 klux de las 12:30 a las 16 horas aproximadamente y el máximo valor de 40 klux a 15 klux; predominando el valor de 10 klux en las horas de la tarde. Estos valores son más bajos que los mismos valores difusos al Este. Esto se debe a que, en general, la iluminancia global al Oeste y la iluminancia directa normal, por la tarde, presentan valores más bajos. El resultado es una iluminancia difusa vertical menor en el Oeste a diferencia del Este.

El promedio de la iluminancia difusa vertical al Oeste, por la mañana hasta las 12 horas, es de 6 klux, con un máximo de 8 y un mínimo de 4 klux; por la tarde, hasta las 19 horas, el promedio es de 9 klux, con un máximo de 11 y un mínimo de 6 klux. (Tabla 5.11 y gráfica 5.5)

Iluminancia difusa vertical al Norte. La iluminancia difusa vertical al Norte (figura 5.22) presenta una disminución en sus valores, de 10 a 5 klux, en la mañana y en la tarde de mayo a agosto, y más pronunciado en julio. También muestra una reducción del máximo de 14 a 12 klux en el mes de junio en las horas centrales del día, en comparación con la iluminancia global vertical al Norte. En estos meses el Sol sale por el noreste, se oculta en el noroeste y se eleva en la bóveda celeste, incidiendo en el plano Norte. Por lo tanto, esta reducción se debe al resultado de restarle a la iluminancia vertical global al Norte, la directa normal multiplicada por el ángulo incidente sobre tal plano. Esta diferencia incrementa en julio ante el aumento

de la iluminancia directa normal, debido a la presencia de la canícula y los cielos despejados.

El promedio de la iluminancia difusa vertical al Norte es de 6 klux de las 6 a las 19 horas, con un máximo de 9 klux —de mayo a agosto en las horas centrales del día— y un mínimo de 4 klux —en los meses del equinoccio de otoño al equinoccio de primavera—. (Tabla 5.13 y gráfica 5.6)

5.5.2 Iluminancia difusa horizontal

En incisos anteriores se presentan los resultados de las mediciones de la iluminancia horizontal difusa del 2014 y se analizan según la climatología, las características climáticas y las trayectorias solares del sitio. En este apartado se mencionan los valores promedio de este parámetro. Se retoma la tabla 4.22 y se promedian los valores de esta. De tal forma, que el promedio de la iluminancia difusa horizontal en un horario de 6 a 19 horas es de 18 klux, con un máximo de 23 klux —en la temporada de lluvias principalmente— y un mínimo de 11 klux. (Tabla 5.14)

Estos valores promedio son la base para diseñar espacios interiores, los cuales aprovechen el recurso lumínico difuso. Aprovechar el recurso lumínico significa emplearlo útilmente para iluminar un espacio interior, sin comprometer otros aspectos de confort como el alto contraste lumínico o las altas temperaturas en el interior del espacio. Al mismo tiempo generar beneficios, como brindarles a los usuarios el espectro completo de la luz natural para desempeñarse dentro de los ambientes durante las horas del día y propiciar un ahorro energético, al prescindir de la luz artificial durante el día, y bajar las cargas de enfriamiento producidas por los rayos solares incidentes. De tal forma, las estrategias principales para iluminar con luz natural son aprovechar el recurso difuso disponible al máximo y controlar los rayos solares incidentes en los espacios interiores para crear ambientes lumínicos óptimos para el confort de los usuarios.

Tabla 5.6 Iluminancia difusa vertical Este, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			4	10	13	12	11	10	10	8	7	5	3	1		
Feb			7	12	14	12	10	9	10	8	7	5	3	2		
Mar		2	8	13	13	14	11	8	9	8	7	6	4	2		
Abr		5	13	19	18	16	13	11	10	9	8	7	4	2		
May		5	13	20	22	19	17	14	12	10	8	6	4	2		
Jun		4	11	17	21	21	19	15	14	11	9	7	4	2	0.3	
Jul		4	11	17	21	19	16	12	11	10	8	7	4	2	0.3	
Ago		5	12	20	22	20	16	13	12	10	8	7	5	2	0.3	
Sep		2	7	13	18	19	16	14	11	9	8	6	3	1		
Oct		2	8	13	17	15	13	11	9	8	6	4	2	0.4		
Nov		2	6	13	14	12	10	10	9	8	6	4	2			
Dic			4	11	14	12	10	9	9	8	6	4	2			

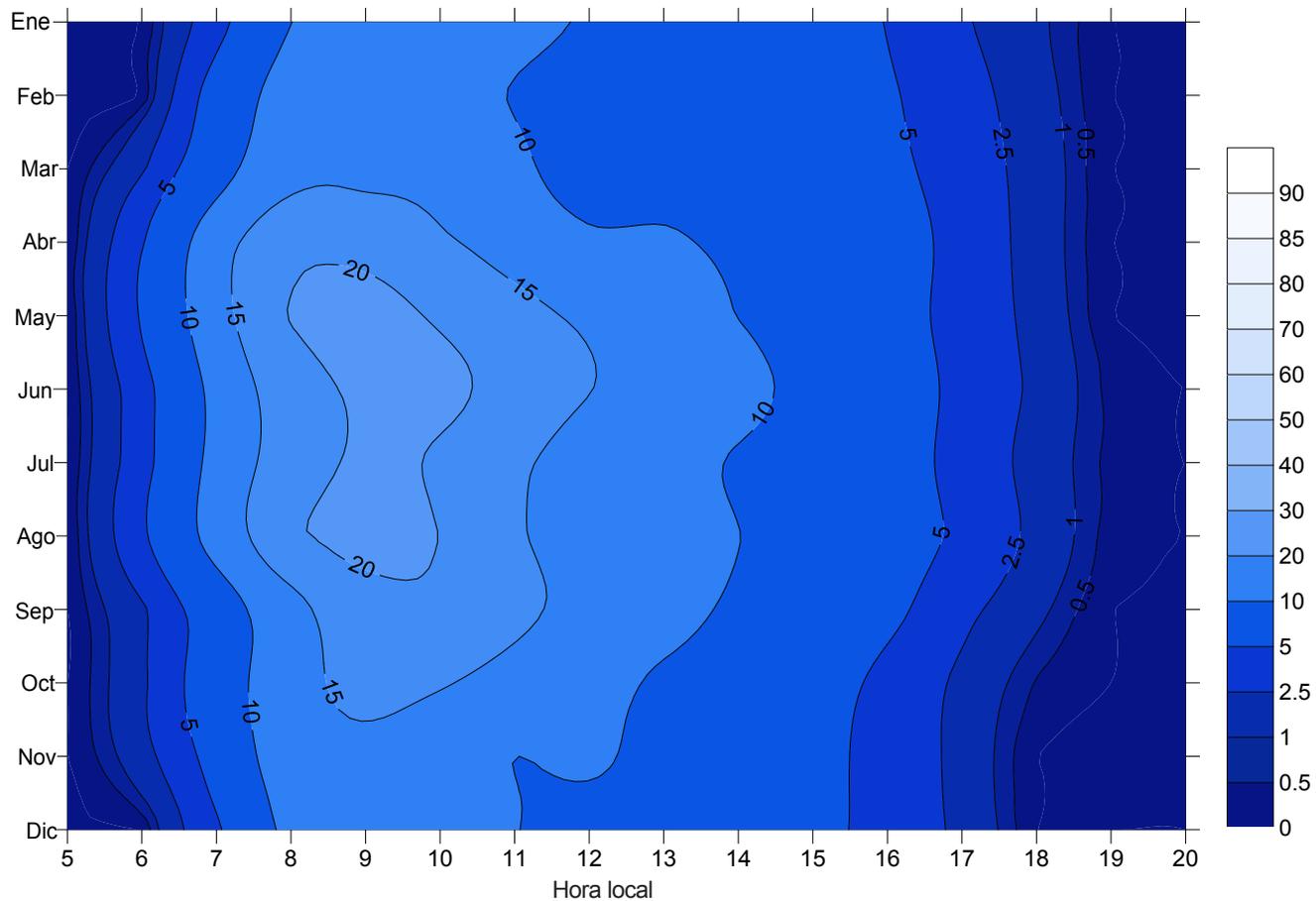


Figura 5.19: Iluminancia difusa vertical Este, media horaria en klux

Tabla 5.7 Iluminancia difusa vertical Este, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Prom	3	9	15	17	16	13	11	11	9	7	6	3	2	0.3
Máx	5	13	20	22	21	19	15	14	11	9	7	5	2	0.3
Mín	2	4	10	13	12	10	8	9	8	6	4	2	0	0.3
Prom				12							5			
Prom máx				17							7			
Prom mín				8							4			

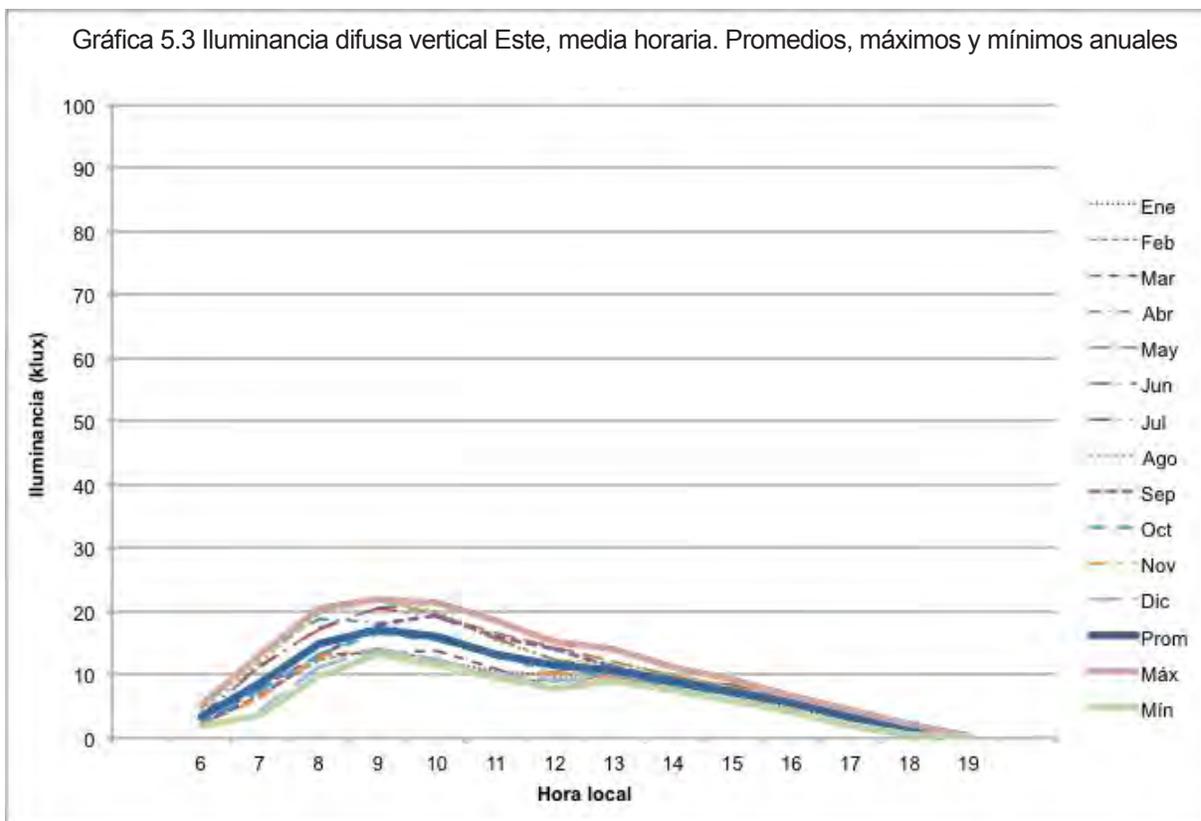


Tabla 5.8 Iluminancia difusa vertical Sur, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Ene			4	9	13	14	15	15	15	14	12	8	4	2		10
Feb			4	8	10	10	10	11	12	11	10	7	4	2		8
Mar		1	4	7	8	9	10	10	9	9	7	4	3	2		6
Abr		1	2	7	9	9	9	9	9	9	8	7	4	2		7
May		1	3	6	9	11	13	13	12	10	8	5	3	1		7
Jun		2	5	8	10	12	13	14	13	11	9	7	4	2	0.3	8
Jul		1	4	7	9	11	12	12	12	10	9	6	4	2	0.3	7
Ago		1	2	6	9	11	12	11	11	10	8	6	3	1	0.2	7
Sep		1	4	8	12	15	15	16	13	10	9	6	3	1		9
Oct		1	5	9	13	15	16	14	12	12	8	5	2	0.4		9
Nov		1	5	10	13	14	14	13	14	11	9	6	2			9
Dic			3	10	15	16	16	15	15	14	10	7	3			11

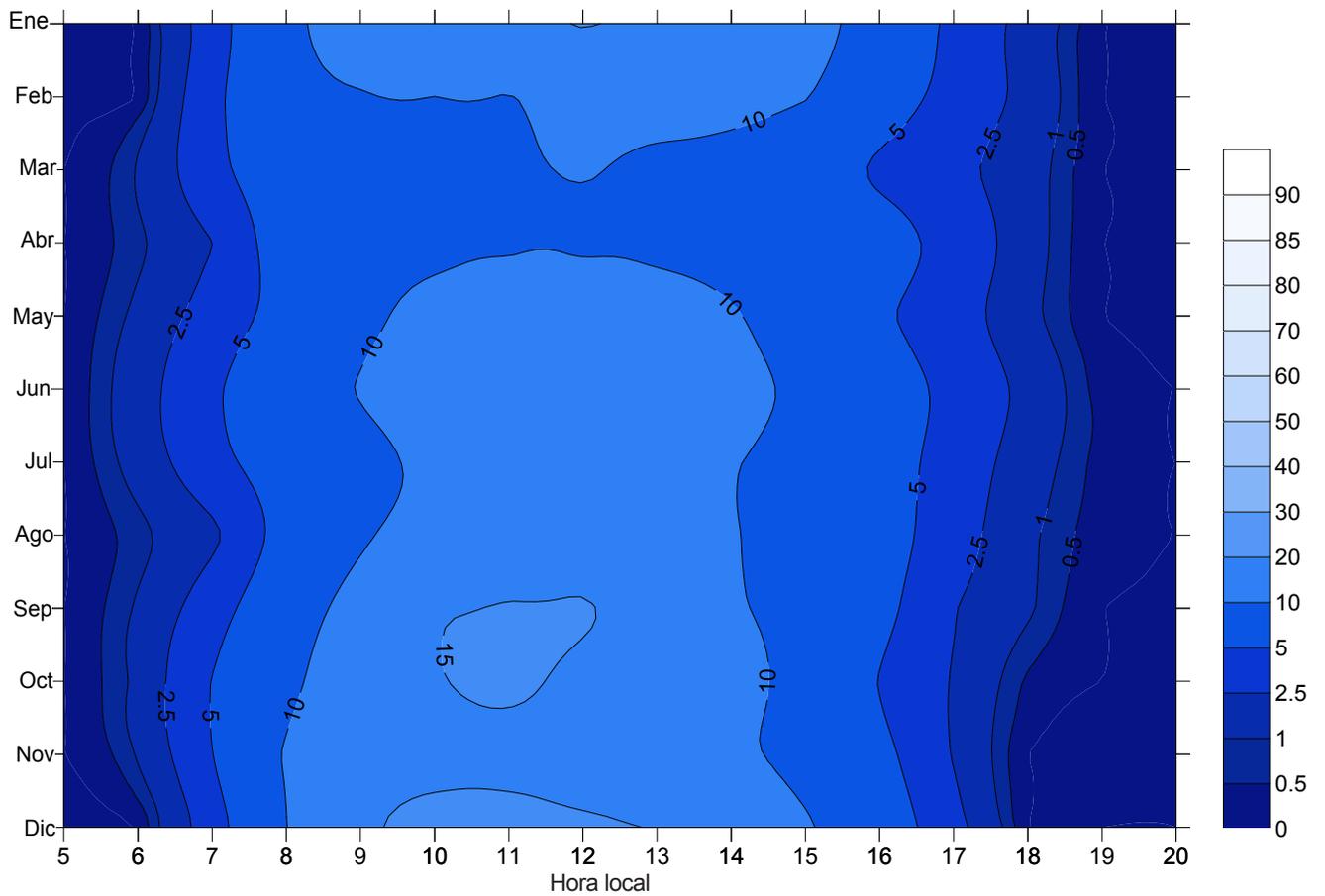


Figura 5.20: Iluminancia difusa vertical Sur, media horaria en klux

Tabla 5.9 Iluminancia difusa vertical Sur, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Prom	1	4	8	11	12	13	13	12	11	9	6	3	1	0.3
Máx	2	5	10	15	16	16	16	15	14	12	8	4	2	0.3
Mín	1	2	6	8	9	9	9	9	9	7	4	2	0	0.2
Prom							8							
Prom máx							10							
Prom mín							5							

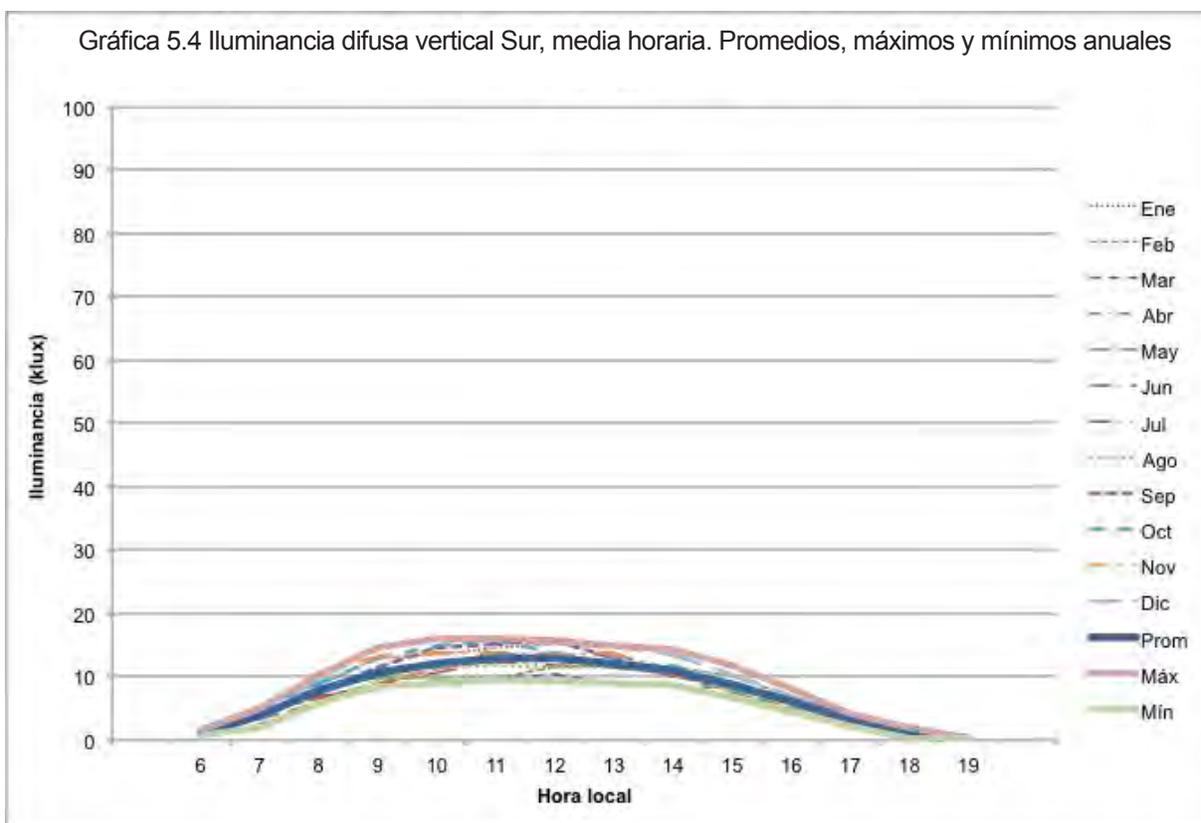


Tabla 5.10 Iluminancia difusa vertical Oeste, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene			2	3	5	6	8	11	14	17	17	14	8	3		
Feb			2	3	4	5	6	9	12	16	18	15	10	3		
Mar		1	2	3	4	5	7	8	10	14	15	13	10	5		
Abr		1	3	4	5	6	8	10	11	14	15	13	10	4		
May		2	4	6	7	9	11	13	12	13	12	12	8	4		
Jun		1	4	6	8	10	12	13	14	13	13	11	7	4	0.7	
Jul		1	3	5	6	8	10	11	10	11	11	11	6	2	0.3	
Ago		1	3	5	7	8	9	11	12	13	12	11	7	4	0.3	
Sep		1	3	5	7	9	11	12	13	12	12	9	4	1		
Oct		1	3	4	6	8	10	11	12	15	12	8	4	1		
Nov		1	2	4	5	6	8	11	14	14	13	10	4			
Dic			2	3	5	6	8	10	14	15	15	11	5			

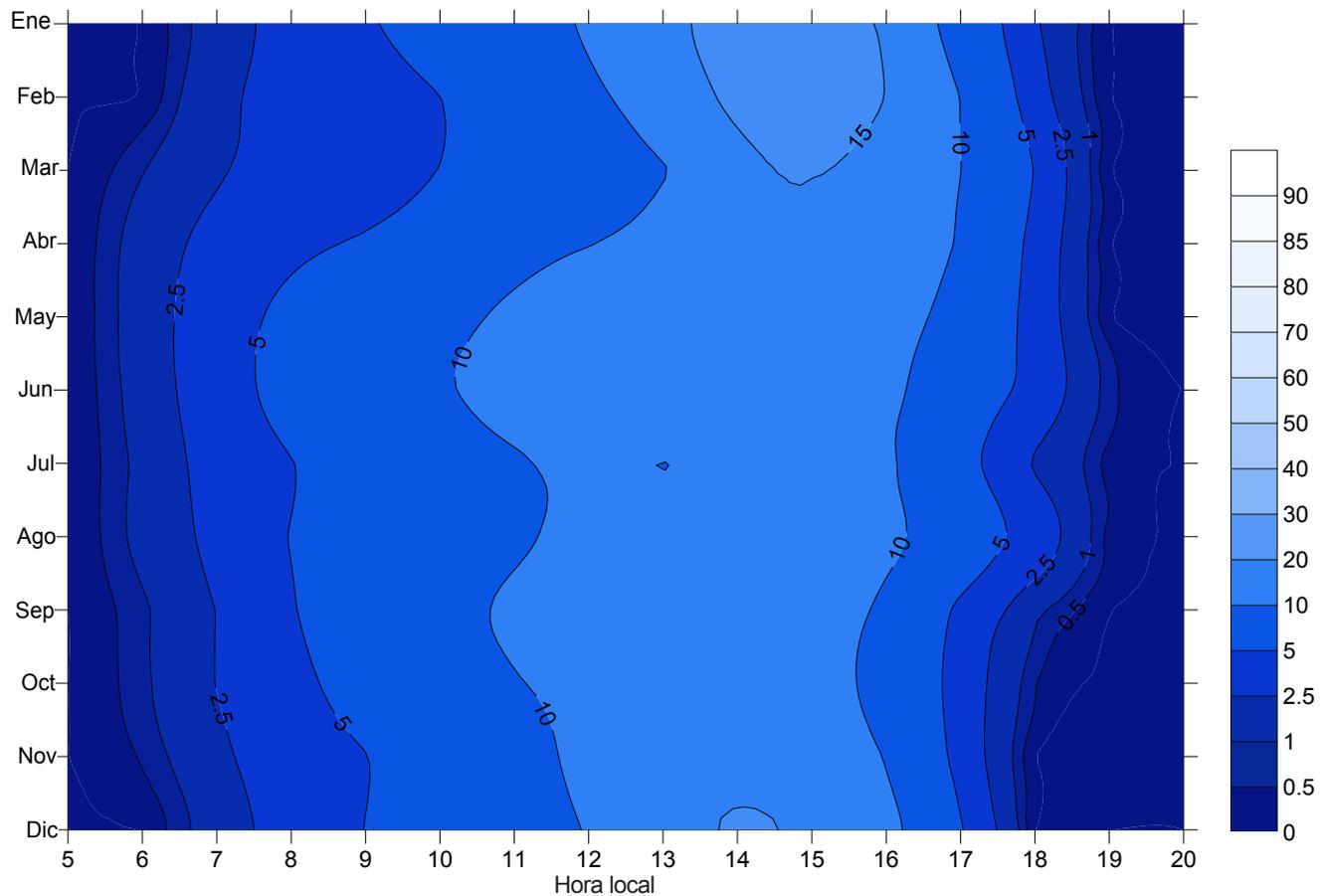


Figura 5.21: Iluminancia difusa vertical Oeste, media horaria en klux

Tabla 5.11 Iluminancia difusa vertical Oeste, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Prom	1	3	4	6	7	9	11	12	14	14	12	7	3	0.4
Máx	2	4	6	8	10	12	13	14	17	18	15	10	5	0.7
Mín	1	2	3	4	5	6	8	10	11	11	8	4	1	0.3
Prom					6					9				
Prom máx					8					11				
Prom mín					4					6				

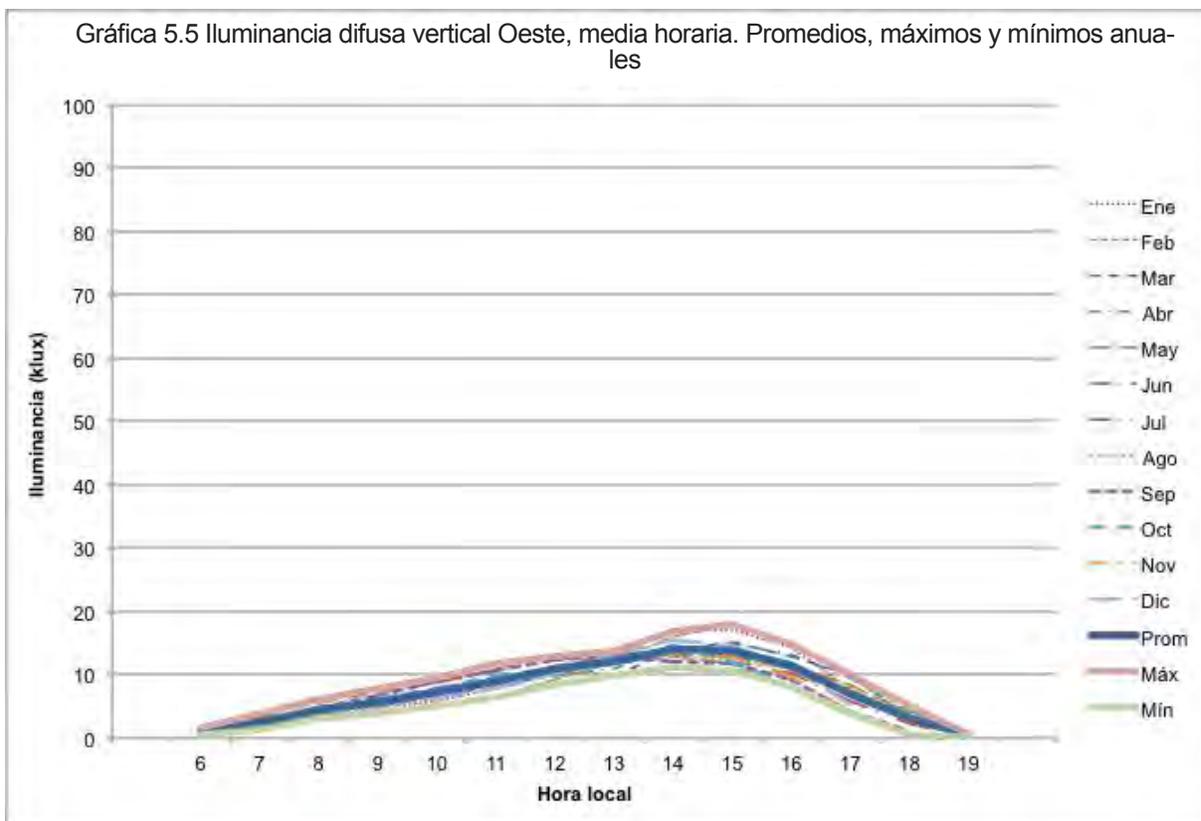


Tabla 5.12 Iluminancia difusa vertical Norte, media horaria en klux

Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Ene			2	4	5	5	6	6	7	7	6	5	3	1		5
Feb			2	4	5	5	5	6	7	7	7	6	4	2		5
Mar		1	3	5	5	6	6	7	8	8	8	6	4	2		5
Abr		3	6	7	8	8	9	9	10	10	9	8	6	3		7
May		3	8	10	10	11	12	13	12	11	9	9	6	3		9
Jun		2	6	8	10	11	12	12	12	11	10	8	5	3	0.5	8
Jul		2	5	7	7	8	10	10	10	10	8	8	5	2	0.2	7
Ago		3	7	9	10	10	10	11	11	10	9	8	6	3	0.3	8
Sep		1	3	6	8	9	10	10	9	8	7	5	3	1		6
Oct		1	3	5	6	7	7	7	7	7	5	4	2	0.4		5
Nov		1	2	4	5	6	7	7	7	7	5	4	2			5
Dic			2	4	5	6	6	6	7	6	6	4	2			5

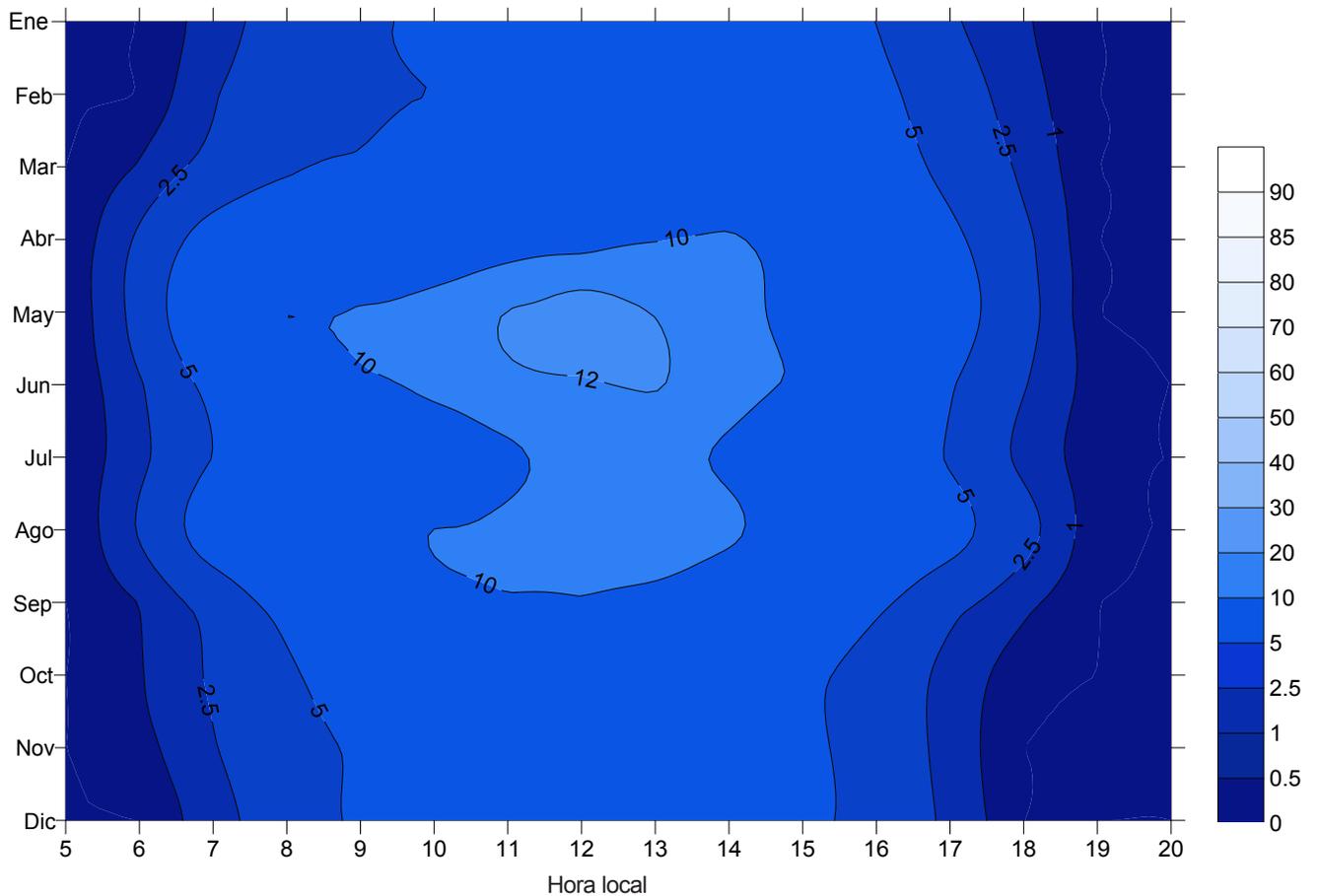
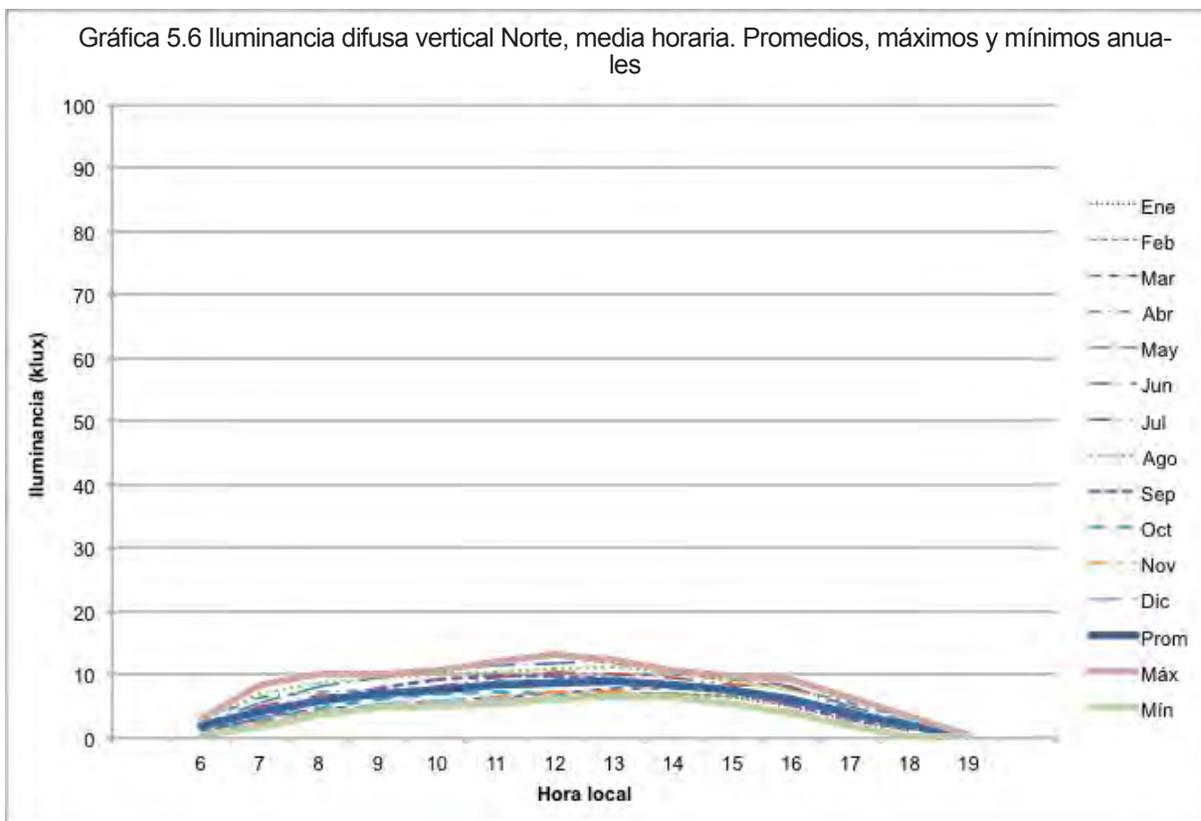


Figura 5.22: Iluminancia difusa vertical Norte, media horaria en klux

Tabla 5.13 Iluminancia difusa vertical Norte, media horaria en klux. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Prom	2	4	6	7	8	8	9	9	9	8	6	4	2	0.3
Máx	3	8	10	10	11	12	13	12	11	10	9	6	3	0.5
Mín	1	2	4	5	5	5	6	7	6	5	4	2	0	0.2
Prom							6							
Prom máx							9							
Prom mín							4							



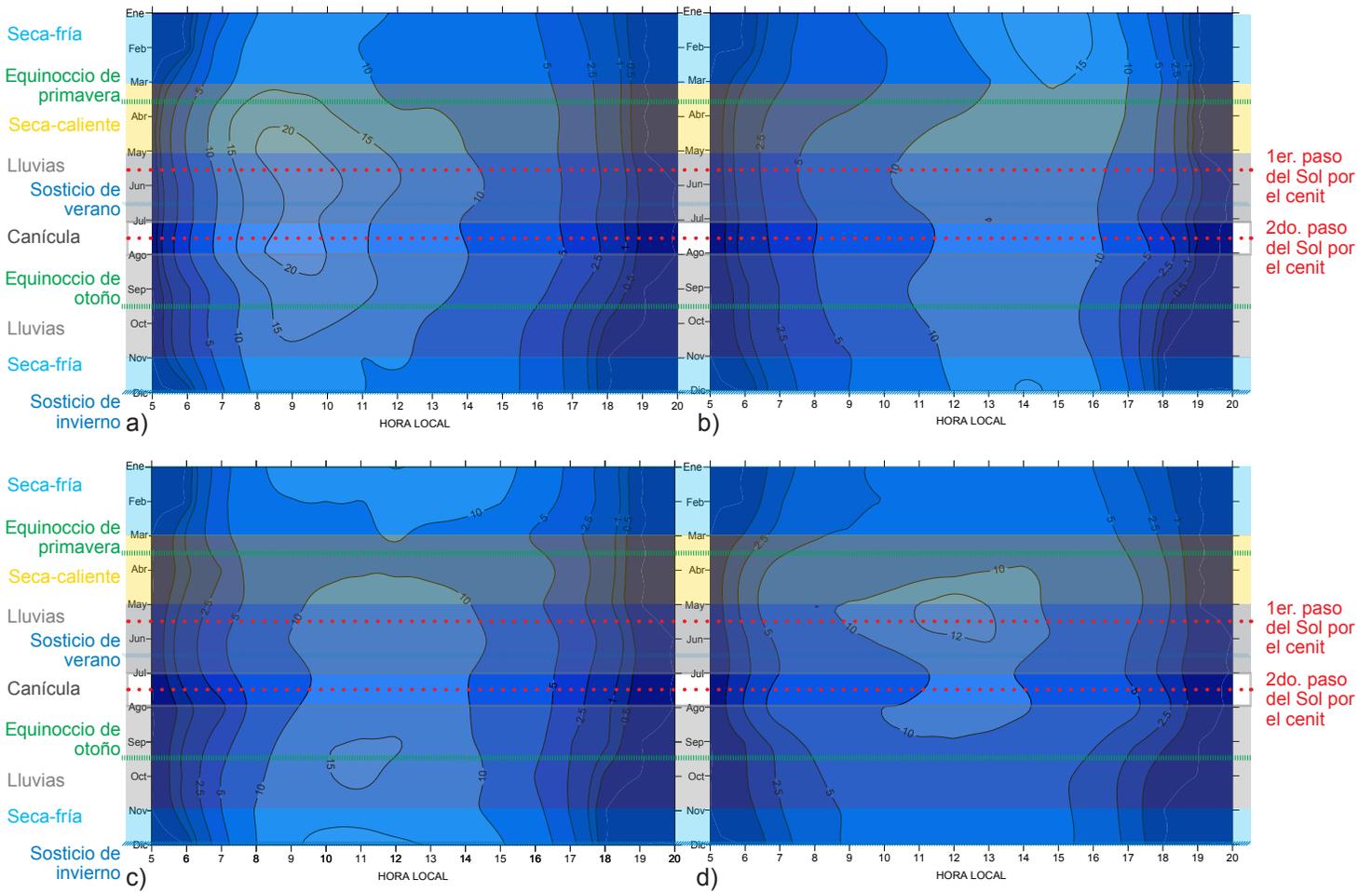


Figura 5.23: Iluminancia difusa vertical al a) Este, b) Oeste, c) Sur y d) Norte en relación a la climatología del sitio y las trayectorias solares

Tabla 5.14 Iluminancia horizontal difusa, media horaria. Promedios, máximos y mínimos anuales

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Prom
Prom	3	8	15	22	27	31	32	31	28	23	16	8	4	1	18
Máx	4	13	22	30	38	42	42	39	33	27	20	12	5	1	23
Mín	2	4	7	11	17	19	21	20	20	17	12	5	1	1	11

5.6 APROVECHAMIENTO DEL RECURSO LUMÍNICO DIFUSO EN LOS INTERIORES ARQUITECTÓNICOS

La luz natural entra a través de los vanos a los espacios intramuros. Esta nos permite desarrollar las tareas visuales a lo largo del día y nos brinda bienestar y salud. Si omitimos la luz natural en los interiores, alteramos el ciclo biológico de los humanos, el cual se rige por los periodos de exposición a la luz natural y la oscuridad. Los vanos en las superficies que conforman el objeto arquitectónico permiten la incidencia de la iluminancia directa —según su orientación y latitud— y la iluminancia difusa de la bóveda celeste y reflejada del contexto al interior de dicho objeto. El dejar incidir la luz natural difusa en el interior del espacio y controlar la luz directa de los rayos solares —según la orientación del vano— brinda la posibilidad de aprovechar el flujo difuso para iluminar de forma más uniforme el interior, sin los altos contrastes que pueden generar los rayos solares en el espacio intramuros. El aprovechamiento del recurso lumínico difuso, apunta a que este es más eficiente que el flujo global, y brinda más luz y menos calor por energía radiante. Esto beneficia al usuario, dependiendo del clima y de las temporadas del año, y evita ganancias térmicas indeseables. Sin embargo, es necesario mencionar que los elementos de control contemplan la posibilidad de dejar incidir por unas horas al día el Sol en los espacios interiores para el beneficio de los usuarios, dependiendo del uso del espacio.

Una vez que se determina y evalúa la disponibilidad del recurso lumínico difuso del sitio es posible utilizarlo en la arquitectura local. En este trabajo de investigación se evalúa la disponibilidad del recurso lumínico difuso durante un ciclo climatológico para la Cuenca de México, con lo cual se pueden desarrollar herramientas de diseño para aprovechar la iluminancia del exterior en los interiores arquitectónicos. Aprovechar el recurso lumínico difuso en la arquitectura de la Cuenca de México significa introducir al ambiente la luz difusa necesaria para que los usuarios realicen diferentes tareas visuales durante el día y controlar los rayos solares incidentes en el espacio para evitar los altos contrastes lumínicos y el exceso de calor.

5.6.1 Determinación del “Factor de luz de día”, FLD, para diversos niveles de iluminancia interior, a partir del recurso lumínico difuso disponible en la Cuenca de México

Existen varios métodos de cálculo para predecir la iluminancia en un ambiente interior, la mayoría simula los valores según la disponibilidad del flujo difuso exterior. Esto se debe a que el flujo difuso es relativamente más estable a lo largo del día. Dada esta variabilidad, la mayoría proporciona los resultados de los valores en el interior como una relación de los valores en el exterior.

El *Factor de luz de día* (FLD) es uno de los métodos más utilizados en el campo de la iluminación natural. Este se emplea para calcular el porcentaje de iluminación difusa en el interior, a partir del flujo difuso disponible en el exterior¹⁹:

$$FLD = E_i / E_{dh} * 100\% \quad (5.2)$$

Donde:

E_{dh} = iluminancia difusa horizontal de un cielo libre de obstrucciones, en klux

E_i = iluminancia difusa en el interior del espacio, en klux

Con los promedios de la iluminancia difusa horizontal de un cielo libre de obstrucciones obtenidos y analizados en el inciso anterior y la iluminancia requerida en el interior —según el uso del espacio— podemos determinar los valores del “Factor de luz de día” para la Cuenca de México.

La normativa de la Cuenca de México, a través del “Reglamento de construcciones del Distrito Federal”, ahora Ciudad de México, y de la “Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico” indica los niveles mínimos de iluminancia requerida para desarrollar adecuadamente diferentes tareas visuales según la función del espacio. El rango que contempla la normativa local varía de 50 a 500 lux.²⁰ El mínimo de 50 lux lo refiere a circulaciones en

19 Peter Tregenza y Michael Wilson, *Daylighting: Architecture and Lighting Design* (Oxon: Routledge, 2011), 133.

20 Gaceta Oficial del Distrito Federal, “Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico” (México, DF: Gobierno del Distrito Federal, 8 de febrero de 2011), 47.

vivienda y el máximo de 500 lux a oficinas privadas y públicas para la realización de detalles visuales muy finos.

Cabe aclarar que la norma solo menciona niveles mínimos de iluminancia artificial; con respecto a la iluminancia natural solo menciona el ventanaje —área de ventana en relación a el área del espacio— que deberán respetar los locales habitables y complementarios. El mínimo debe ser de 17.5% para locales habitables en todas las orientaciones. No hace énfasis en los niveles o porcentajes de la iluminancia natural que debe cumplir un espacio habitable, ni las horas de Sol que deberían incidir en ciertos ambientes. Aún con estas carencias, nos guiaremos con los valores mínimos de iluminancia que establece la norma para determinar el “Factor de luz de día” que requieren los espacios, a partir de la iluminancia difusa horizontal medida para este sitio.

Con los valores promedio del recurso difuso disponible en la cuenca y los valores de iluminancia requerida en el interior del espacio, se determina —por medio de la ecuación 5.2— el “Factor de luz de día” medio horario para la Cuenca de México y el FLD promedio por nivel lumínico y dentro de los horarios, donde el FLD no rebase 5%. (Tabla 5.15)

Los valores de la tabla 5.15 indican —según el recurso difuso disponible de la Cuenca de México— que, con un FLD, por ejemplo, de 1% el espacio interior presentaría un nivel lumínico difuso de 100 a 150 lux en un horario de 6 a 18 horas y con un FLD de 2% un nivel de 300 a 400 lux en un horario de 7 a 17 horas. También indican que con un FLD del 3% el espacio tendría de 600 a 800 lux en un horario de 8 a 16 horas. El nivel de 500 lux —el cual establecen las normas mexicanas como el mínimo nivel lumínico requerido para desarrollar tareas visuales en oficinas— se obtiene si se considera un FLD de 2%. De esta forma, el espacio obtendrá 500 lux en un horario de 8 a 16 horas. Para obtener el valor de 1,000 lux se debe considerar un FLD de 4% dentro del horario de 9 a 15 horas.

En la tabla se omiten los FLD que rebasan 5%, ya que según estudios realizados en clima templado —clima de la Cuenca de México— FLD mayores a 5% comprometen los efec-

Tabla 5.15 FLD medio horario y promedios para una iluminancia interior de 100 a 1,000 lux a partir de la iluminancia difusa horizontal promedio

Hora local	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Horario	FLD Prom
llu d h prom	3	8	15	22	27	31	32	31	28	23	16	8	4		
100 lux	3	1	1	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	1	1	3	6-18	1
150 lux	5	2	1	1	1	0.5	0.5	0.5	1	1	1	2	4	6-18	1
200 lux		2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2		7-17	1
250 lux		3	2	1	1	1	1	1	1	1	2	3		7-17	1
300 lux		4	2	1	1	1	1	1	1	1	2	4		7-17	2
350 lux		4	2	2	1	1	1	1	2	2	2	4		7-17	2
400 lux		5	3	2	1	1	1	1	2	2	2	5		7-17	2
450 lux			3	2	2	1	1	1	2	2	3	5		8-17	2
500 lux			3	2	2	2	2	2	2	2	3			8-16	2
600 lux			4	3	2	2	2	2	2	3	4			8-16	2
700 lux			5	3	3	2	2	2	2	3	4			8-16	3
800 lux			5	4	3	3	2	3	3	4	5			8-16	3
900 lux				4	3	3	3	3	3	4				9-15	3
1,000 lux				5	4	3	3	3	4	4				9-15	4

Nota: Se omiten los valores del FLN medio horario que rebasen el 5%.

tos térmicos en el interior del espacio.²¹ Según este mismo estudio, el ambiente lumínico del espacio con vanos laterales varía bajo diferentes FLD: i) FLD de 1% el lugar luce generalmente oscuro y las ventanas pueden generar brillos, dado el contraste con el ambiente oscuro; ii) FLD de 2 a 4% la luz natural puede proporcionar la iluminación general y en áreas lejanas a la ventana la iluminación natural puede ser escasa; iii) FLD de 5% la luz natural en el espacio es intensa y puede existir incomodidad visual y térmica si la superficie de la ventana es grande; y iv) FLD mayor a 5% es probable que se produzca una incomodidad térmica y la apariencia del espacio es similar a la de un espacio en el exterior, parecido a un invernadero.

Los valores de esta tabla también indican que la disponibilidad del recurso lumínico difuso en la Cuenca de México es idónea y apta para iluminar los interiores arquitectónicos. Dependerá del diseño de los vanos y de los interiores el poder aprovechar este recurso disponible.

21 Tregenza y Wilson, *Daylighting*, 138.

5.6.2 Dimensionamiento de ventanas en la Cuenca de México, según su orientación y la iluminancia interior requerida

Una vez que se establece el FLD requerido por el espacio interior para obtener ciertos niveles de iluminancia difusa interior es necesario calcular el área de ventana para alcanzar dichos valores. Para esto se considera la fórmula del “Factor de luz de día promedio” $FLDP$ que desarrolló el *Building Research Establishment*, BRE, de Inglaterra y se aísla la variable del área de ventana. De esta forma, se calcula el área de ventana a partir del $FLDP$ necesario y de algunos aspectos del ambiente interior. Esta fórmula ha sido probada ampliamente con resultados precisos cuando la obstrucción del contexto es regular y puede ser utilizada en las primeras etapas del diseño arquitectónico.

Para calcular el $FLDP$ se emplea la siguiente ecuación²²:

$$FLDP = \frac{A_g \theta_v * \tau}{A (1 - \rho^2)} \quad (5.3)$$

Donde:

$FLDP$ = “Factor de luz de día promedio” sobre una superficie horizontal a la altura del plano de trabajo, 0.7 centímetros, en porcentaje

A_g = área vidriada de ventanas, excluyendo los marcos de las ventanas y cualquier otra obstrucción, en metros cuadrados

A = total de las áreas que engloban el espacio interior: techo, piso, paredes, incluyendo ventanas, en metros cuadrados

θ_v = ángulo visible de cielo, medido en corte sobre un punto al centro de la ventana, en el plano interior de la pared de la ventana, en grados

τ = transmitancia de la ventana bajo luz difusa, incluyendo el factor de suciedad

ρ = reflectancia promedio de las superficies que engloban el espacio interior. En la primera etapa de diseño esto solo puede ser estimado y los valores comúnmente utilizados son 0.5 en

²² Peter Tregenza y David Loe, *The Design of Lighting* (Inglaterra: Spon Press, 2004), 136.

un espacio con techo blanco y con paredes en colores claros

Mientras que para calcular el área de ventana se utiliza la siguiente ecuación²³:

$$A_g = \frac{FLDP * A * (1 - \rho^2)}{\theta_v * \tau} \quad (5.4)$$

Total de las áreas del espacio interior

El total de las áreas que engloban el espacio interior es una de las variables de la fórmula para calcular el área de ventana. Esta considera la suma de todas las superficies que confinan el ambiente interior: techo, piso, paredes, incluyendo ventanas. Con el fin de aplicar la fórmula del BRE es necesario establecer las dimensiones del espacio con las cuales se trabajará en esta investigación. La “Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico”²⁴ establece que un espacio habitable, principalmente residencial, no deberá ser menor de 2.30 metros por lado y ni tener una altura menor a 2.30 metros. En este trabajo se consideran estas dimensiones mínimas con un incremento de 0.50 metros en cada uno de sus lados, hasta llegar a los 6 metros. Son cuatro las alturas de los espacios que considera esta investigación: 2.30, 2.50, 2.80 y 3.00 metros. La siguiente tabla muestra el total de las superficies que engloban el espacio a partir de las dimensiones mencionadas. (Tabla 5.16)

Tabla 5.16 Total de las áreas que engloban el espacio, en metros cúbicos

Altura, en metros	Largo y ancho del espacio, en metros							
	2.3x2.3	3x3	3.5x3.5	4x4	4.5x4.5	5x5	5.5x5.5	6x6
2.3	32	46	57	69	82	96	111	127
2.5	34	48	60	72	86	100	116	132
2.8	36	52	64	77	91	106	122	139
3.0	38	54	67	80	95	110	127	144

23 Tregenza y Loe, *The Design of Lighting*, 136.

24Gaceta Oficial del Distrito Federal, “Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico” (México, DF: Gobierno del Distrito Federal, 8 de febrero de 2011), Capítulo 2, 18.

Uniformidad lumínica

El FLDP no nos proporciona información sobre la distribución de la luz en el espacio. La uniformidad del flujo luminoso depende de las proporciones del espacio, de las reflectancias de los acabados en el interior, así como del tamaño y posición de la ventana. La uniformidad lumínica interior debe ser tomada en cuenta principalmente cuando la incidencia de luz natural es lateral, ya que el flujo luminoso que incide se reduce de forma proporcional al cuadrado de su distancia; esto quiere decir que disminuye drásticamente en la profundidad del espacio. De tal forma, investigadores en el campo de la iluminación natural, como J.A. Lynes, han desarrollado ecuaciones para delimitar la profundidad del espacio a fin de lograr una iluminancia relativamente uniforme en el ambiente interior.²⁵

$$L = \frac{2}{1-R_B} / \left(\frac{1}{w} + \frac{1}{h} \right) \quad (5.5)$$

Donde:

L = largo o profundidad máxima, en metros

R_B = reflectancia media de la mitad más alejada de la ventana

w = ancho del espacio, en metros

h = altura del espacio, en metros

Esta fórmula se utiliza con pocas obstrucciones del contexto; de otra forma, se debe considerar la “línea sin cielo” sobre el plano de trabajo. Esta línea delimita el área del espacio en la cual ya no es posible ver el cielo desde el plano de trabajo. (Figura 5.24)

25 J.A. Lynes, “A Sequence for Daylighting Design”, *Lighting Research and Technology* vol.11, n.º 2 (1979): 102-106, 103.

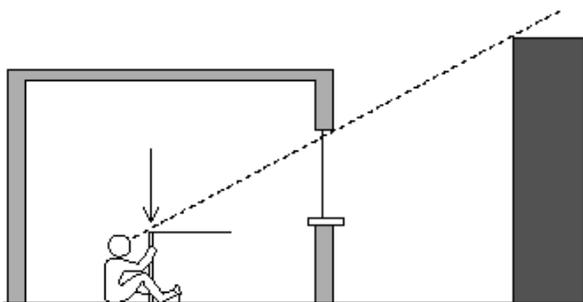


Figura 5.24: “Línea sin cielo”

Es así como las fórmulas del $FLDP$ y del área de ventanas pueden ser utilizadas mientras la profundidad del espacio no exceda los límites establecidos por la ecuación de Lynes o la “línea sin cielo”. A continuación se muestra una tabla con las profundidades máximas de los espacios, según las dimensiones establecidas anteriormente. (Tabla 5.17)

Esta tabla muestra que los largos de los espacios propuestos para este trabajo no exceden los límites de las profundidades. Esto quiere decir, que la uniformidad lumínica en estos ambientes será adecuada.

Tabla 5.17 Límites de la profundidad del espacio según el ancho y la altura del espacio, para una reflectancia promedio de las superficies del 0.5

Altura, en metros	Ancho del espacio, en metros							
	2.30	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
2.30	4.60	5.21	5.55	5.84	6.09	6.30	6.49	6.65
2.50	4.79	5.45	5.83	6.15	6.43	6.67	6.88	7.06
2.80	5.05	5.79	6.22	6.59	6.90	7.18	7.42	7.64
3.00	5.21	6.00	6.46	6.86	7.20	7.50	7.76	8.00

Determinación del área vidriada lateral de un espacio en la Cuenca de México

Con la ecuación 5.4 se calcula el área vidriada lateral de un espacio a partir de las dimensiones establecidas y el área que engloba el espacio interior con relación al $FLDP$ necesario —según el recurso lumínico difuso disponible— para obtener los niveles de iluminancia interior requerida según las actividades visuales a desarrollar dentro de un horario establecido. El cálculo considera una reflectancia promedio de 0.50 —lo cual representa un ambiente con te-

chos blancos y paredes claras—, así como, un ángulo visible de cielo de 75° grados —lo cual significa que goza de un cielo libre de obstrucciones. Solo el dintel de la ventana ocasiona una obstrucción de 15° grados generado por una altura de ventana de 1.20 metros con un ancho de muro de 20 centímetros. Si existen obstrucciones regulares del contexto es necesario sustituir este valor al momento de calcular el área vidriada, si las obstrucciones son irregulares es necesario optar por otro método, el cual considere el “Factor de luz de día vertical”. El cálculo también considera la transmitancia de un vidrio simple bajo luz difusa, 0.8, y se multiplica por el factor de suciedad, 0.8, considerando una atmósfera urbana y una posición vertical.²⁶ Para otras transmitancias bajo luz difusa revisar referencias. (Tabla 5.18)

Tabla 5.18 Área vidriada según el total del área que engloba el espacio con relación al FLNP necesario —a partir del recurso lumínico disponible— dentro de un horario establecido para obtener la iluminancia interior requerida, en metros cuadrados

Ei	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6			
			2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0
			32	34	36	38	46	48	52	54	57	60	64	67	69	72	77	80	82	86	91	95	96	100	106	110	111	116	122	127	127	132	139	144
100	6-18	1	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3
150	6-18																																	
200	7-17																																	
250	7-17																																	
300	7-17																																	
350	7-17	2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	3.0	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.8	4.0	4.0	4.1	4.4	4.5
400	7-17																																	
450	8-17																																	
500	8-16																																	
600	8-16																																	
700	8-16	3	1.5	1.6	1.7	1.8	2.1	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.1	3.2	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.3	4.4	4.5	4.7	5.0	5.2	5.2	5.4	5.7	5.9	6.0	6.2	6.5	6.8
800	8-16																																	
900	9-15																																	
1,000	9-15	4	2.0	2.1	2.3	2.4	2.9	3.0	3.2	3.4	3.5	3.7	4.0	4.2	4.3	4.5	4.8	5.0	5.1	5.3	5.7	5.9	6.0	6.3	6.6	6.9	6.9	7.2	7.6	7.9	8.0	8.3	8.7	9.0

Esta tabla sirve para establecer el área vidriada de un espacio para lograr cierta iluminancia interior difusa. Para corroborar la pertinencia de los resultados y ajustarlos, en caso que sea necesario, se calcula la iluminancia interior a partir del área vidriada propuesta y la iluminancia vertical difusa promedio en cada orientación —analizada en incisos anteriores— a través de la siguiente fórmula, basada en el Método de Lynes²⁷:

26 Tregenza y Loe, *The Design of Lighting*, 117 y 159.

27 Pilar Oteiza San José y Ana Pérez Burgos, “Iluminación sobre superficies horizontales y verticales en Madrid: guía para determinar la iluminación natural exterior e interior de un recinto” (Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Cuaderno 36901/2-84-03, 2012), 28.

$$E_i = \frac{E_{dvi} * A_g * \tau}{A(1-\rho)} \quad (5.6)$$

Donde:

E_i = iluminancia difusa interior promedio, en lux

E_{dvi} = iluminancia difusa vertical en cada orientación, Este, Sur, Oeste y Norte, en lux

A_g = área vidriada de ventanas, en metros cuadrados

τ = transmitancia de la ventana bajo luz difusa incluyendo el factor de suciedad

A = total de las áreas que engloban el espacio interior: techo, piso, paredes, incluyendo ventanas, en metros cuadrados

ρ = reflectancia promedio de las superficies que engloban el espacio interior

La tabla 5.19 muestra la iluminancia interior calculada según el área vidriada propuesta y la iluminancia vertical difusa promedio en cada orientación. La mayoría de los resultados en la tabla 5.19 se encuentra en el rango de los niveles de iluminancia requerida; los resultados en color rojo se encuentran por debajo de los límites requeridos. Por esta razón, se elevaba 20% el área vidriada propuesta hacia el Oeste y 50% el área vidriada propuesta hacia el Norte. Con esto, la iluminancia interior de un espacio con aberturas laterales hacia estas orientaciones estará dentro de los rangos requeridos. Es así como se propone y determina el área vidriada lateral de un espacio según su orientación —Este, Sur, Oeste y Norte— y la iluminancia interior requerida para la Cuenca de México. (Tabla 5.20, 5.21 y 5.22)

5.6.3 “Matriz de diseño con luz natural” para espacios con aberturas laterales en la Cuenca de México

A partir del área vidriada sugerida se propone una matriz para el diseño con luz natural para la cuenca. Esta matriz propone el ventanaje —área vidriada en relación al área del espacio— de los ambientes según sus dimensiones, el FLDP y la iluminancia interior difusa requerida según las actividades visuales a realizar. (Tabla 5.23, 5.24 y 5.25)

Tabla 5.19 Iluminancia interior a partir del área vidriada calculada y propuesta, según la iluminancia vertical difusa en 4 orientaciones Este, Sur, Oeste y Norte, en lux

Niveles de iluminancia lux	FLDP %	Hora local	Prom Edvi klux	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6							
				2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0				
				32	34	36	38	46	48	52	54	57	60	64	67	69	72	77	80	82	86	91	95	96	100	106	110	111	116	122	127	127	132	139	144				
Este																																							
100-300	1	6-18	9.4	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188			
		7-17	10.7	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214		
300-700	2	7-17	10.7	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427	427		
		8-17	10.9	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	
		8-16	11.7	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469
700-900	3	8-16	11.7	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703	703		
		9-15	12.1	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	728	
1000	4	9-15	12.1	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	
Sur																																							
100-300	1	6-18	8.1	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161		
		7-17	9.3	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186
300-700	2	7-17	9.3	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	
		8-17	9.8	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394
		8-16	10.6	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422	422
700-900	3	8-16	10.6	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	633	
		9-15	11.6	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693	693
1000	4	9-15	11.6	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Oeste																																							
100-300	1	6-18	9.0	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	
		7-17	8.9	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178
300-700	2	7-17	8.9	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357
		8-17	9.5	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382
		8-16	9.8	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393
700-900	3	8-16	9.8	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590	
		9-15	10.4	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622	622
1000	4	9-15	10.4	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829	829
Norte																																							
100-300	1	6-18	6.2	187	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125		
		7-17	7.0	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
300-700	2	7-17	7.0	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
		8-17	7.3	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292
		8-16	7.7	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306
700-900	3	8-16	7.7	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
		9-15	8.1	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486	486
1000	4	9-15	8.1	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648	648

Con esta matriz, los diseñadores de la construcción pueden establecer el área vidriada de las ventanas laterales dada su orientación, desde las primeras etapas del proyecto arquitectónico, para lograr la iluminancia interior difusa requerida, dentro de un horario establecido, según las actividades visuales a realizar dentro del espacio. Los promedios de los ventanajes dentro de un rango de niveles de iluminancia interior difusa pueden ser de utilidad para incidir en la reglamentación sobre la incidencia de luz natural en los espacios habitables de esta cuenca. En la legislación podría registrarse que se requiere de un ventanaje mínimo de 15% en las fachadas Este y Sur para obtener una iluminancia interior difusa entre 300 y 600 lux, considerando los límites del espacio, en las horas centrales del día. Mientras que, para obte-

Tabla 5.20 Área vidriada al **Este** y al **Sur** según el total del área que engloba el espacio con relación al FLNP necesario —a partir del recurso lumínico disponible— dentro de un horario establecido para obtener la iluminancia interior requerida, en metros cuadrados

Ei	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6				
			2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	
			32	34	36	38	46	48	52	54	57	60	64	67	69	72	77	80	82	86	91	95	96	100	106	110	111	116	122	127	127	132	139	144	
100	6-18	1	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3
150	6-18																																		
200	7-17																																		
250	7-17																																		
300	7-17																																		
350	7-17	2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	3.0	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.8	4.0	4.0	4.1	4.4	4.5	
400	7-17																																		
450	8-17																																		
500	8-16																																		
600	8-16																																		
700	8-16	3	1.5	1.6	1.7	1.8	2.1	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.1	3.2	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.3	4.4	4.5	4.7	5.0	5.2	5.2	5.4	5.7	5.9	6.0	6.2	6.5	6.8	
800	8-16																																		
900	9-15																																		
1,000	9-15	4	2.0	2.1	2.3	2.4	2.9	3.0	3.2	3.4	3.5	3.7	4.0	4.2	4.3	4.5	4.8	5.0	5.1	5.3	5.7	5.9	6.0	6.3	6.6	6.9	6.9	7.2	7.6	7.9	8.0	8.3	8.7	9.0	

Tabla 5.21 Área vidriada al **Oeste** según el total del área que engloba el espacio con relación al FLNP necesario —a partir del recurso lumínico disponible— dentro de un horario establecido para obtener la iluminancia interior requerida, en metros cuadrados

	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6			
			2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0
			32	34	36	38	46	48	52	54	57	60	64	67	69	72	77	80	82	86	91	95	96	100	106	110	111	116	122	127	127	132	139	144
100	6-18	1	0.6	0.6	0.7	0.7	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7
150	6-18																																	
200	7-17																																	
250	7-17																																	
300	7-17																																	
350	7-17	2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5	3.6	3.8	4.0	4.1	4.2	4.3	4.6	4.7	4.8	5.0	5.2	5.4
400	7-17																																	
450	8-17																																	
500	8-16																																	
600	8-16																																	
700	8-16	3	1.8	1.9	2.0	2.1	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2	3.3	3.6	3.7	3.9	4.1	4.3	4.5	4.6	4.8	5.1	5.3	5.4	5.6	6.0	6.2	6.2	6.5	6.9	7.1	7.2	7.4	7.8	8.1
800	8-16																																	
900	9-15																																	
1,000	9-15	4	2.4	2.5	2.7	2.9	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3	4.5	4.8	5.0	5.2	5.4	5.8	6.0	6.1	6.4	6.8	7.1	7.2	7.5	8.0	8.3	8.3	8.7	9.2	9.5	9.5	9.9	10.4	10.8

Tabla 5.22 Área vidriada al **Norte** según el total del área que engloba el espacio con relación al FLNP necesario —a partir del recurso lumínico disponible— dentro de un horario establecido para obtener la iluminancia interior requerida, en metros cuadrados

Ei	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6			
			2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0	2.3	2.5	2.8	3.0
			32	34	36	38	46	48	52	54	57	60	64	67	69	72	77	80	82	86	91	95	96	100	106	110	111	116	122	127	127	132	139	144
100	6-18	1	0.7	0.8	0.9	0.9	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.5	2.6	2.6	2.7	2.9	3.0	3.0	3.1	3.3	3.4
150	6-18																																	
200	7-17																																	
250	7-17																																	
300	7-17																																	
350	7-17	2	1.5	1.6	1.7	1.8	2.1	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.1	3.2	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.3	4.4	4.5	4.7	5.0	5.2	5.2	5.4	5.7	5.9	6.0	6.2	6.5	6.8
400	7-17																																	
450	8-17																																	
500	8-16																																	
600	8-16																																	
700	8-16	3	2.2	2.4	2.6	2.7	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.5	4.7	4.8	5.1	5.4	5.6	5.8	6.0	6.4	6.6	6.8	7.0	7.5	7.7	7.8	8.1	8.6	8.9	8.9	9.3	9.8	10.1
800	8-16																																	
900	9-15																																	
1,000	9-15	4	3.0	3.1	3.4	3.6	4.3	4.5	4.8	5.1	5.3	5.6	6.0	6.2	6.5	6.8	7.2	7.5	7.7	8.0	8.5	8.9	9.0	9.4	9.9	10.3	10.4	10.8	11.4	11.9	11.9	12.4	13.1	13.5

Tabla 5.23 Matriz de diseño con luz natural. Ventanaje en porcentaje para las fachadas **Este** y **Sur** a partir de la iluminancia interior requerida, dentro de un horario específico, el FLNP y de las dimensiones del espacio interior (Ixaxh)

Ei	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6				Prom
			2.3 32	2.5 34	2.8 36	3.0 38	2.3 46	2.5 48	2.8 52	3.0 54	2.3 57	2.5 60	2.8 64	3.0 67	2.3 69	2.5 72	2.8 77	3.0 80	2.3 82	2.5 86	2.8 91	3.0 95	2.3 96	2.5 100	2.8 106	3.0 110	2.3 111	2.5 116	2.8 122	3.0 127	2.3 127	2.5 132	2.8 139	3.0 144	
100	6-18	1	9	10	11	11	8	8	9	9	7	8	8	8	7	7	8	8	6	7	7	7	6	6	7	7	6	6	6	7	6	6	6	6	7
150	6-18																																		
200	7-17																																		
250	7-17																																		
300	7-17																																		
350	7-17	2	19	20	21	23	16	17	18	19	14	15	16	17	13	14	15	16	13	13	14	15	12	13	13	14	11	12	13	13	11	11	12	13	15
400	7-17																																		
450	8-17																																		
500	8-16																																		
600	8-16																																		
700	8-16	3	28	30	32	34	24	25	27	28	22	23	24	25	20	21	23	23	19	20	21	22	18	19	20	21	17	18	19	20	17	17	18	19	22
800	8-16																																		
900	9-15																																		
1,000	9-15																																		
1,000	9-15																																		

Tabla 5.24 Matriz de diseño lumínico natural. Ventanaje para la fachada **Oeste** a partir de la iluminancia interior requerida, dentro de un horario específico, el FLNP y de las dimensiones del espacio interior (Ixaxh)

Ei	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6				Prom
			2.3 32	2.5 34	2.8 36	3.0 38	2.3 46	2.5 48	2.8 52	3.0 54	2.3 57	2.5 60	2.8 64	3.0 67	2.3 69	2.5 72	2.8 77	3.0 80	2.3 82	2.5 86	2.8 91	3.0 95	2.3 96	2.5 100	2.8 106	3.0 110	2.3 111	2.5 116	2.8 122	3.0 127	2.3 127	2.5 132	2.8 139	3.0 144	
100	6-18	1	11	12	13	14	10	10	11	11	9	9	10	10	8	8	9	9	8	8	8	9	7	8	8	8	7	7	8	8	7	7	8	8	9
150	6-18																																		
200	7-17																																		
250	7-17																																		
300	7-17																																		
350	7-17	2	23	24	26	27	19	20	22	23	17	18	20	20	16	17	18	19	15	16	17	18	14	15	16	17	14	14	15	16	13	14	15	15	18
400	7-17																																		
450	8-17																																		
500	8-16																																		
600	8-16																																		
700	8-16	3	34	36	39	41	29	30	32	34	26	27	29	31	24	25	27	28	23	24	25	26	22	23	24	25	21	21	23	24	20	21	22	23	27
800	8-16																																		
900	9-15																																		
1,000	9-15																																		
1,000	9-15																																		

Tabla 5.25 Matriz de diseño lumínico natural. Ventanaje para la fachada **Norte** a partir de la iluminancia interior requerida, dentro de un horario específico, el FLNP y de las dimensiones del espacio interior (Ixaxh)

Ei	Hora local	FLDP	2.3x2.3				3x3				3.5x3.5				4x4				4.5x4.5				5x5				5.5x5.5				6x6				Prom
			2.3 32	2.5 34	2.8 36	3.0 38	2.3 46	2.5 48	2.8 52	3.0 54	2.3 57	2.5 60	2.8 64	3.0 67	2.3 69	2.5 72	2.8 77	3.0 80	2.3 82	2.5 86	2.8 91	3.0 95	2.3 96	2.5 100	2.8 106	3.0 110	2.3 111	2.5 116	2.8 122	3.0 127	2.3 127	2.5 132	2.8 139	3.0 144	
100	6-18	1	14	15	16	17	12	13	13	14	11	11	12	13	10	11	11	12	9	10	11	11	9	9	10	10	9	9	9	10	8	9	9	9	11
150	6-18																																		
200	7-17																																		
250	7-17																																		
300	7-17																																		
350	7-17	2	28	30	32	34	24	25	27	28	22	23	24	25	20	21	23	23	19	20	21	22	18	19	20	21	17	18	19	20	17	17	18	19	22
400	7-17																																		
450	8-17																																		
500	8-16																																		
600	8-16																																		
700	8-16	3	42	45	48	51	36	38	40	42	33	34	37	38	30	32	34	35	28	30	32	33	27	28	30	31	26	27	28	29	25	26	27	28	33
800	8-16																																		
900	9-15																																		
1,000	9-15																																		
1,000	9-15																																		

ner esos mismos niveles de iluminancia en la fachada Oeste, se requiere un ventanaje mínimo de 18% y en la fachada Norte un ventanaje de 22%. Los ventanajes propuestos —a partir del recurso lumínico difuso disponible en la cuenca— varían según la orientación, por lo que no se puede establecer un valor igualitario de ventanaje mínimo para todas las orientaciones como lo hacen las normas que rigen la construcción en la Cuenca de México.

Utilizar esta matriz como herramienta de diseño para la iluminación natural significaría aprovechar el recurso natural lumínico disponible de la cuenca, ahorrar energía —al prescindir de la luz artificial durante el día—, brindar a los usuarios bienestar y salud —al no privarlos del espectro completo de la luz natural— y enaltecer la belleza del espacio.

5.6.4 Aplicación y verificación de la “Matriz de diseño con luz natural”

A través de un programa de cálculo lumínico, Agi32, se calcula la iluminancia interior promedio, a nivel del plano de trabajo, de cuatro espacios con dimensiones de 3.50x3.50x2.30 —ancho, largo y alto— con diferentes áreas de ventana según la orientación. Se seleccionaron estas dimensiones del espacio, ya que los valores del ventanaje calculados coincidían en mayor medida con los promedios de los mismos, ver tabla 5.23, 5.24 y 5.25. Estos cuatro espacios presentan las mismas características, tienen una reflectancia promedio de 0.50 en todas las superficies interiores y una transmitancia de un vidrio simple lateral en una atmósfera urbana de 0.64. El área vidriada de las ventanas se determina con la “Matriz de diseño con luz natural” para la Cuenca de México propuesta en esta investigación, a partir de la orientación y de los niveles de iluminancia requeridos en el ambiente interior. Se plantea que la base de las ventanas coincida con el plano de trabajo y que la altura de estas sea en general de 1.20 metros, el ancho de las ventanas puede variar según el área vidriada (figura 5.25) y se obtiene a través de esta sencilla fórmula:

$$w = \frac{A_g}{h} \tag{5.7}$$

Donde:

w = ancho de la ventana, en metros

A_g = área vidriada de ventanas, en metros cuadrados

h = altura de la ventana, en metros

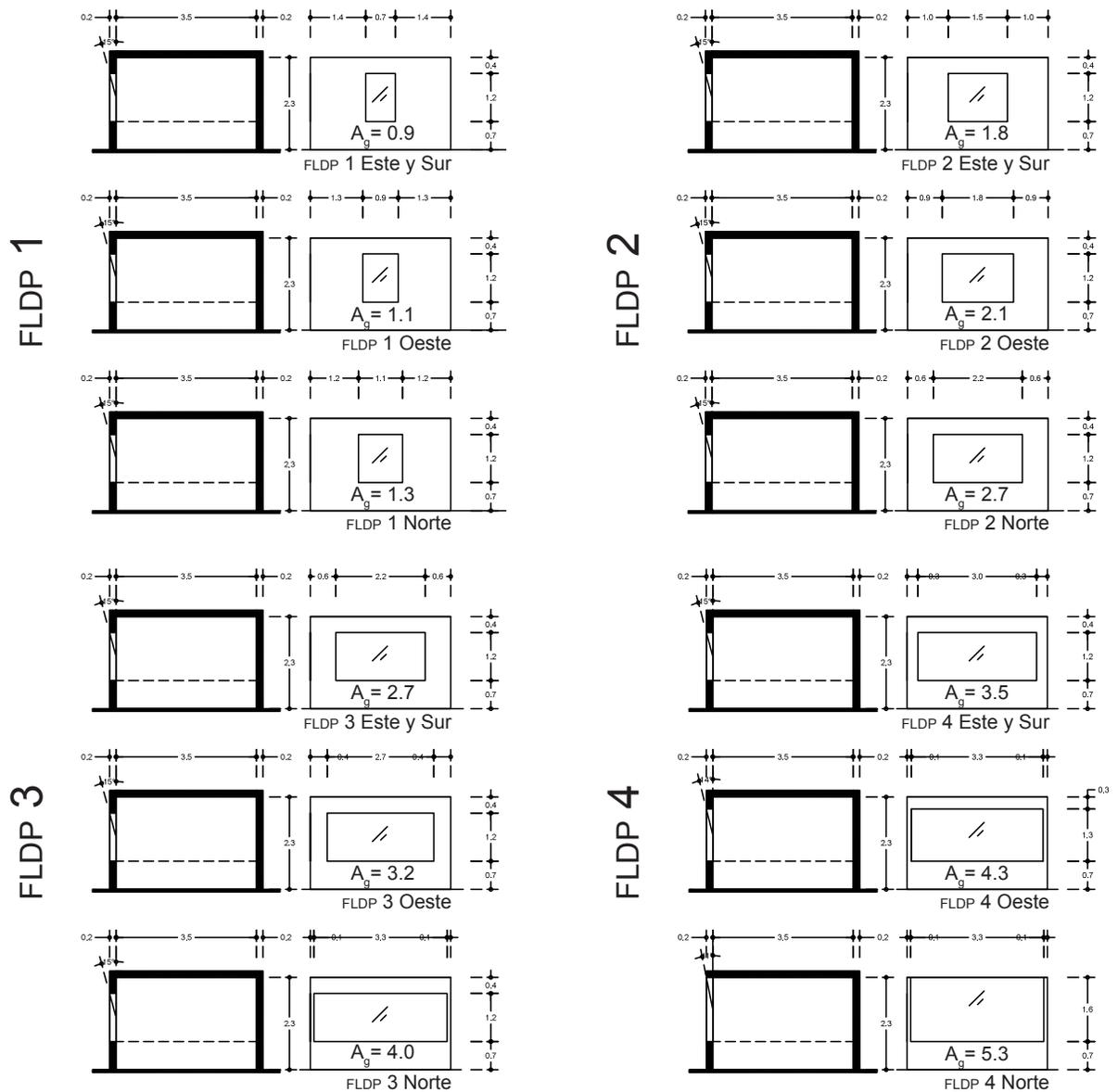


Figura 5.25: Dimensión y posicionamiento de ventanas para cálculo de verificación

5 capítulo

Las simulaciones lumínicas se realizan bajo las siguientes condiciones de cielo: 1) nublado, considerando que este tipo de cielo proporciona solo luz difusa de la bóveda celeste; 2) despejado, considerando una atmósfera contaminada; y 3) parcialmente nublado. Bajo cielo nublado se simula la iluminancia cada día 21 del mes cada 2 horas. Bajo cielo despejado y parcialmente nublado se consideran las simulaciones que representen solo la luz de la bóveda celeste, sin los rayos solares. De tal forma, se toman en cuenta las siguientes simulaciones: i) Este: el día 21 de cada mes, cada 2 horas en un horario de 13 a 18 horas; ii) Oeste: el día 21 de cada mes, cada 2 horas en un horario de 6 a 11 horas; iii) Sur: cada 2 horas, el día 21 de mayo, junio y julio; y iv) Norte: cada 2 horas, el día 21 de enero, febrero, marzo, abril, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Esto de acuerdo con el análisis de las trayectorias solares del sitio.

En la tabla 5.26, 5.27, 5.28 y 5.29 la iluminancia interior promedio simulada con diversas dimensiones de ventana al Este, Sur, Oeste o Norte muestran alta concordancia con los rangos lumínicos requeridos en horarios determinados. Si bien pocos valores salen del rango lumínico —valores subrayados—, la diferencia es relativamente baja y aun así, ya sea

Tabla 5.26 Iluminancia simulada en un espacio de 3.5x3.5x2.3 metros al **Este** y su comparación con los rangos lumínicos requeridos

Ei	Hora local	FLDP	Ventana			Iluminancia interior simulada			
			Área	Alto	Ancho	Nublado	Despejado tardes	Parcialmente nublado tardes	Promedio
lux	horas	%	m ²	m		lux			
100	6-18	1	0.9	1.20	0.74	155	194	<u>300</u>	216
150									
200									
250									
300	7-17	2	1.8	1.20	1.48	427	464	531	474
350									
400									
450									
500	8-16	3	2.7	1.20	2.21	<u>580</u>	<u>644</u>	<u>1045</u>	756
600									
700									
800									
900	9-15	4	3.5	1.20	2.95	<u>713</u>	<u>814</u>	1304	<u>944</u>
1,000									

Tabla 5.27 Iluminancia simulada en un espacio de 3.5x3.5x2.3 metros al **Sur** y su comparación con los rangos lumínicos requeridos

Ei	Hora local	FLDP	Ventana			Iluminancia interior simulada			
			Área	Alto	Ancho	Nublado	Despejado mayo, junio y julio	Parcialmente nublado mayo, junio y julio	Promedio
lux	horas	%	m2	m		lux			
100	6-18	1	0.9	1.20	0.74	155	185	<u>322</u>	221
150									
200									
250									
300	7-17	2	1.8	1.20	1.48	427	561	637	542
350									
400									
450									
500									
600									
700	8-16	3	2.7	1.20	2.21	<u>581</u>	782	<u>1566</u>	976
800									
900									
1,000	9-15	4	3.5	1.20	2.95	<u>713</u>	<u>990</u>	1949	1217

Tabla 5.28 Iluminancia simulada en un espacio de 3.5x3.5x2.3 metros al **Oeste** y su comparación con los rangos lumínicos requeridos

Ei	Hora local	FLDP	Ventana			Iluminancia interior simulada			
			Área	Alto	Ancho	Nublado	Despejado mañanas	Parcialmente nublado mañanas	Promedio
lux	horas	%	m2	m		lux			
100	6-18	1	1.1	1.20	0.89	196	237	<u>361</u>	265
150									
200									
250									
300	7-17	2	2.1	1.20	1.77	475	556	637	556
350									
400									
450									
500									
600									
700	8-16	3	3.2	1.20	2.66	<u>650</u>	793	<u>1403</u>	949
800									
900									
1,000	9-15	4	4.3	1.30	3.27	<u>850</u>	1019	1819	1229

Tabla 5.29 Iluminancia simulada en un espacio de 3.5x3.5x2.3 metros al **Norte** y su comparación con los rangos lumínicos requeridos

Ei	Hora local	FLDP	Ventana			Iluminancia interior simulada			
			Área	Alto	Ancho	Nublado	Despejado menos: mayo, junio y julio	Parcialmente nublado menos: mayo, junio y julio	Promedio
lux	horas	%	m ²	m		lux			
100	6-18	1	1.3	1.20	1.11	155	<u>311</u>	<u>498</u>	<u>322</u>
150									
200									
250									
300	7-17	2	2.7	1.20	2.21	578	671	<u>757</u>	669
350									
400									
450									
500	8-16	3	4.0	1.20	3.32	752	910	<u>1511</u>	<u>1058</u>
600									
700	8-16								
800									
900	9-15	4	5.3	1.60	3.32	1138	1184	2105	1475
1,000	9-15								

el promedio o algún valor bajo una condición de cielo diferente se encuentra dentro del rango requerido. Esto último sugiere necesaria una investigación de la ocurrencia de tipos de cielo en la Cuenca de México, ya que es indispensable conocer la predominancia de tipos de cielo para conocer los flujos lumínicos que generan cada uno y predecir los valores lumínicos en un ambiente interior con más exactitud.

Dada la alta concordancia de los resultados simulados y los niveles lumínicos requeridos se afirma que la “Matriz de diseño con luz natural” propuesta en este trabajo de investigación brinda la posibilidad de dimensionar las ventanas de la Cuenca de México, según su orientación, para un rango de iluminancia difusa interior requerida, considerando los límites de la profundidad; desde las primeras etapas conceptuales del objeto arquitectónico. Utilizar esta herramienta de diseño lumínico significa aprovechar el recurso difuso natural disponible en la arquitectura local para ahorrar energía, conservar el medioambiente y brindar bienestar y salud a las personas.

CONCLUSIONES

6

Este trabajo de investigación alcanzó varios logros científicos, tecnológicos y de diseño. Son dos los primeros logros de este trabajo: la implementación de parámetros lumínicos en el ORS y la creación de una base de datos continua, permanente y confiable de mediciones de iluminancia en conjunto con la irradiancia, la nubosidad y parámetros meteorológicos y atmosféricos, lo cual conforma la “Plataforma de observación de luz natural”. La estructuración de esta plataforma se convierte en un logro importante y significativo, ya que ningún sitio de la República Mexicana cuenta con un registro lumínico continuo y permanente. Por lo tanto, la “Plataforma de observación de luz natural” se convierte en la primera y única estación de monitoreo del recurso fotométrico, en conjunto con el recurso radiométrico en todo el territorio mexicano. La información generada en la plataforma brinda la oportunidad de conocer el comportamiento del recurso lumínico del sitio y la interacción del flujo fotométrico y radiométrico con los objetos arquitectónicos. En este entendido, el trabajo de investigación aquí presentado toma esta información para caracterizar la iluminancia y la irradiancia en sus tres componentes básicos —global, directa y difusa—, la iluminancia vertical en sus cuatro planos principales —Este, Sur, Oeste y Norte—, y la relación de la iluminancia y la irradiancia global durante un ciclo climatológico. La información lumínica recabada también se emplea para desarrollar herramientas de diseño y con esto aprovechar el recurso en la arquitectura local. El registro continuo y confiable de la plataforma es la base para continuar investigando la disponibilidad del recurso lumínico del sitio, así como la interacción de este con los objetos arquitectónicos.

Es necesario contemplar que las mediciones minuto a minuto de los parámetros medidos en la plataforma generan un gran volumen de datos y conforme avanzan los años, estos datos se multiplican por millones. De tal forma, es necesario recurrir a las tecnologías de la información para ordenar sistemáticamente el volumen de datos generados y permitir las consultas, el procesamiento de la información y las pruebas de validación.

Otro logro de esta tesis es el desarrollo tecnológico de bases para la medición radiométrica y fotométrica. Estas se diseñaron y fabricaron, ya que las empresas especializadas en la distribución de equipo de medición no contaban con soportes para medir diferentes parámetros radiométricos y lumínicos. Después de diseñarlas y fabricarlas conforme a los lineamientos establecidos por organismos reguladores, fueron probadas para garantizar su correcto funcionamiento. Estas bases fueron fundamentales en la estructuración de la “Plataforma de observación de luz natural”. Otro importante logro de este trabajo, fue estructurar la plataforma de observación con equipo especializado, montado sobre bases diseñadas especialmente para medir los diferentes parámetros. A la par, otro logro significativo, es realizar un estricto control de calidad en la adquisición, recopilación y almacenamiento de la información. Estos logros tienen como resultado, que más del 97% de las mediciones fueron válidas para ser consideradas en la evaluación del comportamiento temporal del recurso lumínico del sitio; dejando solo el 3% de las mediciones fuera de la evaluación del recurso. Este 3% de mediciones, fuera de los rangos de aceptación de la validación, coincide con una altura solar entre 0 y 20 grados, lo cual es consecuencia de la orografía de la cuenca y de la obstrucción del horizonte del sitio.

En la investigación se mide y caracteriza el recurso lumínico por primera vez en la cuenca. Los resultados de este análisis son de interés regional y nacional para desarrollar medidas de ahorro energético al aprovechar el recurso disponible en la arquitectura; y ya que ninguna de las estaciones de la red fotométrica mundial reúne las particulares de la Cuenca de México, los resultados de este análisis también son de interés mundial. Dadas las particularidades de la cuenca —clima templado, latitud intertropical, altitud de más de 2,000 msnm, orografía y atmósfera contaminada— y dada la variabilidad intrínseca de la luz natural de cada

región —por la presencia de factores climáticos que influyen en los elementos climáticos—, la caracterización del recurso lumínico en la cuenca es un logro importante, tanto para dar respuestas a las necesidades locales como para contribuir al registro fotométrico mundial. Al compartir información con otras estaciones de medición es posible desarrollar modelos universales para predecir de forma precisa este recurso, así como la interacción del flujo fotométrico y radiométrico con los objetos arquitectónicos. Representar con certeza este recurso y conocer su comportamiento en la localidad de estudio incurre en el ahorro energético al planear ambientes lumínicamente eficientes y contribuye al uso eficiente de los recursos naturales. La caracterización del recurso lumínico y el registro continuo, permanente y confiable de datos de iluminancia en conjunto con irradiancia, nubosidad, parámetros atmosféricos y meteorológicos en la Cuenca de México les permite a los especialistas en el campo realizar un sinnúmero de investigaciones referentes al aprovechamiento de los recursos naturales en el urbanismo y la arquitectura del sitio.

Con el registro del recurso lumínico del sitio, este trabajo de investigación caracteriza la disponibilidad de la luz natural en la Cuenca de México durante un ciclo climatológico, correspondiente al 2014. Se presenta a continuación, a modo de resumen, la disponibilidad máxima del recurso lumínico en la cuenca. Estos máximos se relacionan con el momento del día en el que ocurren, las temporadas y características climáticas, las trayectorias solares y las particularidades climáticas de 2014. (Tabla 6.1)

El año 2014 fue un año anómalo en comparación con los promedios climatológicos del sitio, aun así la mayoría de los valores de temperatura y precipitación se encuentran dentro de los máximos y mínimos registrados durante 49 años; 2014 fue un año cálido —a excepción de enero y mayo— y lluvioso —a excepción de enero, febrero, marzo y julio—. La canícula, que generalmente ocurre en agosto, en este año se presentó en julio. En julio de 2014 los cielos fueron despejados por las mañanas con nubes ligeras por la tarde, pasando a parcialmente nublados, tanto por la mañana como por la tarde, hasta nublados densos con lluvia.

El año 2014 presenta las siguientes anomalías en comparación con la climatología del sitio:

- Primera temporada seca-fría del año (enero a febrero): presenta una temporada más seca y más calurosa en comparación con la climatología del sitio. Los cielos en esta temporada son despejados, principalmente en febrero.
- Temporada seca-caliente (marzo a mayo): presenta una temporada más cálida y más lluviosa en abril en comparación con la climatología del sitio. En esta temporada los cielos son despejados por las mañanas y ligeramente nublados por la tarde, las lluvias se presentan por la tarde-noche y en raras ocasiones durante todo el día.
- Temporada de lluvias: la climatología del sitio muestra que ocurre de junio a octubre. Sin embargo, en el 2014 la temporada de lluvias se anticipa y comienza en mayo. Por anticiparse es extensa e intensa; los cielos en esta temporada son parcialmente nublados en las horas centrales del día, las lluvias se presentan por la tarde y también se muestran días completamente nublados y lluviosos.
- Segunda temporada seca-fría (noviembre a diciembre): presenta una temporada más lluviosa y más calurosa en comparación con la climatología del sitio.

De la tabla 6.1 y del análisis del clima del 2014 podemos concluir que existe una alta concordancia entre los aspectos climáticos analizados y el comportamiento temporal del recurso lumínico, lo cual permite un entendimiento global de la disponibilidad de este recurso natural en la cuenca. Conocer y aportar estos valores —así como la evaluación detallada, en el inciso correspondiente— de la disponibilidad de la iluminancia en la Cuenca de México permite analizar su aprovechamiento en la arquitectura local. Es indispensable continuar midiendo parámetros meteorológicos y su relación con la irradiancia y la iluminancia del sitio para analizar las variaciones diarias, mensuales y anuales del flujo radiativo y lumínico, con el fin de proponer estrategias de diseño lumínico pertinentes para la cuenca.

Con la información generada en la plataforma también se analizó la correlación de la

Tabla 6.1 Máxima disponibilidad del recurso lumínico en la Cuenca de México

Parámetro	Momento del día	Temporada, característica climática o trayectoria solar	Iluminancia máxima en klx	Particularidades del 2014
Global	medio día	primera seca fría seca caliente canícula	90	+ seca y calurosa + lluviosa y calurosa julio
Difusa	medio día	lluvias	40	intensa y extensa
Directa	mañanas y medio día	primera seca fría seca caliente canícula segunda seca fría	80	+ seca y calurosa + lluviosa y calurosa julio + lluviosa y calurosa
Este	mañana	primera seca fría seca caliente canícula segunda seca fría	70	+ seca y calurosa + lluviosa y calurosa julio + lluviosa y calurosa
Sur	medio día	solsticio de invierno al equinoccio de primavera equinoccio de otoño al solsticio de invierno	45	+ caluroso
Oeste	tarde	primera seca fría segunda seca fría	40	+ seca y calurosa + lluviosa y calurosa
Norte	medio día	entre los dos pasos del Sol por el cenit	14	+ lluvioso y caluroso

irradiancia y la iluminancia global. En este análisis se observó que ambos parámetros presentan el mismo comportamiento y están íntimamente relacionados. En este caso, no se evidenció la posible diferencia que pueden presentar el flujo radiométrico y fotométrico, a consecuencia de la nubosidad, el vapor de agua y la concentración de aerosoles y gases atmosféricos. Sin embargo, gracias a que la relación entre los flujos globales es lineal y fuerte, se determinaron los rangos de la eficacia luminosa en la Cuenca de México. Esto significa otro logro de este trabajo, ya que con la determinación de los valores de la eficacia luminosa en esta región es posible conocer el comportamiento de la iluminancia a partir de la irradiancia en sitios que reúnan las mismas particularidades de la cuenca. Los rangos establecidos para la eficacia luminosa global presentan un mínimo de 94, un promedio de 103 y un máximo de 110 lm/W,

mientras que los rangos promedios reportados en la literatura varían de 105 a 128 lm/W.¹ La eficacia luminosa difusa presenta un mínimo de 99, un promedio de 116 y un máximo de 131 lm/W, mientras que la constante reportada en la literatura es de 125 lm/W.² Estas diferencias indican la importancia de generar los valores de eficacia luminosa global y difusa en la Cuenca de México. Es necesario continuar este análisis con datos de más de un año para precisar los valores de la eficacia luminosa en este sitio y con esto poder predecir los valores de iluminancia cuando solo existan valores de irradiancia.

Los valores de la eficacia luminosa en la Cuenca e México obtenidos en esta tesis muestran que el flujo difuso es más eficiente que el flujo global, al proporcionar mayor flujo luminoso por unidad de flujo radiante. Esto indica que es necesario analizar y aprovechar el flujo difuso disponible en la cuenca para iluminar naturalmente el interior de las edificaciones a favor del uso eficiente de las energías. Por lo tanto, se propone iluminar con la luz difusa de la bóveda celeste los ambientes interiores, controlando la incidencia directa de los rayos solares en el desarrollo de las actividades visuales del espacio y propiciar el ahorro energético en dichos ambientes.

Como se comenta en el documento, el flujo radiométrico difuso es altamente absorbido por gases como el dióxido de carbono y por algunos aerosoles, mientras que el flujo fotométrico difuso no se ve afectado por estos. Por este hecho, la Cuenca de México —con su atmósfera contaminada por gases y aerosoles—, tendría la ventaja de aprovechar aún más este flujo luminoso difuso que otros sitios, sin la ganancia térmica que podría ocasionar el flujo radiométrico. Aun así, el promedio anual de la eficacia luminosa presenta valores ligeramente por debajo de los registros mundiales. Por esta diferencia es fundamental continuar evaluando la relación entre la radiometría y la fotometría, y continuar determinando valores para la eficacia luminosa en el lugar.

1 A.H. Fakra, H. Boyer, F. Miranville y D. Bigot, “A Simple Evaluation of Global and Diffuse Luminous Efficacy for All Sky Conditions in Tropical and Humid Climate”, *Renewable Energy* 36, n.º1 (2011): 298–306, 1; Tariq Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 2.ª ed. (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004), 107; Ralph G. Hopkinson, P. Petherbridge y James Longmore, *Daylighting* (Londres: Heinemann, 1966), 50.

2 Muneer, *Solar Radiation and Daylighting Models*, 107.

A partir de las mediciones de la iluminancia vertical global en cada una de las orientaciones y la iluminancia directa normal registrada en la plataforma de observación, esta investigación calcula los valores del flujo lumínico difuso vertical al Este, Sur, Oeste y Norte, contemplando el ángulo incidente en cada orientación. Estos valores y sus variaciones son los que aprovechará el diseño arquitectónico para iluminar naturalmente sus ambientes, prescindiendo o disminuyendo el uso de la luz artificial durante el día. Una vez que se conoce y evalúa el recurso lumínico difuso disponible se determina el “Factor de luz de día”, FLD —para diversos niveles de iluminancia interior, a partir del recuso lumínico en la Cuenca de México— y se desarrolla una herramienta de diseño para aprovechar la luz difusa en la arquitectura local: la “Matriz de diseño con luz natural”.

La determinación del “Factor de luz de día” medio horario para la Cuenca de México y el “Factor de luz de día promedio” $FLDP$ —dentro de un horario determinado— indican que la disponibilidad del recurso lumínico difuso en la cuenca es idónea y apta para iluminar los ambientes interiores. Es idónea y apta porque para obtener una iluminancia en promedio de 300 a 500 lux al interior del espacio —iluminancia necesaria para desarrollar tareas visuales detalladas— se requiere de un FLD de 2% de 7 a 17 horas. Considerar iluminar naturalmente un ambiente con un vano que permita incidir el 2% de la iluminancia difusa horizontal del exterior, en un clima templado, significa que la luz natural puede proporcionar la iluminación general del espacio y que no compromete los efectos térmicos en el interior de este.³ Un ambiente interior en la Cuenca de México con un FLD de 2% presentaría los siguientes niveles lumínicos difusos sobre el plano de trabajo. (Tabla 6.2)

Tabla 6.2 Iluminancia interior del espacio con un FLD del 2%

Hora local	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Iluminancia exterior en klux	8	15	22	27	31	32	31	28	23	16	8
Iluminancia interior en lux	162	307	439	547	619	648	621	562	452	321	169

3 Peter Tregenza y Michael Wilson, *Daylighting: Architecture and Lighting Design* (Oxon: Routledge, 2011), 138.

Estos valores promedio muestran que el recurso difuso disponible en la cuenca es apto para iluminar naturalmente los ambientes interiores (tabla 6.2). Dependerá del diseño de los vanos y de los interiores arquitectónicos aprovechar este recurso natural.

La determinación del FLD y del $FLDP$ en la Cuenca de México, a partir del recurso disponible, le permite a esta investigación establecer las dimensiones de los vanos —según su orientación— y con esto crear la matriz de diseño. La “Matriz de diseño con luz natural” propuesta en esta tesis fue desarrollada a partir del análisis de la disponibilidad del recurso lumínico difuso medido en el sitio y los requerimientos de iluminancia según las diferentes actividades visuales a realizar al interior de los espacios. Esta matriz sugiere el porcentaje de vanos laterales de un ambiente según su orientación, el nivel de iluminancia requerido y sus dimensiones, respetando el límite luminoso de la profundidad del espacio. Utilizar esta matriz desde la conceptualización del objeto arquitectónico, en las primeras etapas del diseño, permite aprovechar este recurso natural inagotable.

Aprovechar la luz difusa en los ambientes interiores significa proporcionar los niveles lumínicos adecuados para realizar las tareas visuales propias del espacio. Si la luz incidente en los interiores es deficiente, los usuarios recurrirán a la luz artificial para subsanar la luz faltante. Por el contrario, si la luz natural es excedente los usuarios recurrirán a elementos de control para disminuir este flujo lumínico. Recurrir a elementos de control sin el debido conocimiento de la causa puede resultar erróneo. Tal es el caso, de las conclusiones realizadas por diferentes estudios, las cuales afirman que los usuarios ante el exceso de luz natural bloquean completamente con obstrucciones opacas —tipo cortinas— el flujo luminoso, recurriendo a la luz artificial para poder realizar sus actividades en los interiores.⁴ Este hecho representa un gasto innecesario de energía eléctrica.

La uniformidad lumínica del espacio es un aspecto a tomar en cuenta para considerar el aprovechamiento del recurso lumínico. Dado que el flujo luminoso incidente de forma lateral disminuye drásticamente en la profundidad del espacio, los sitios más alejados de los vanos

4 Peter Boyce, Claudia Hunter y Owen Howlett, “The Benefits of Daylight Through Windows” (Estados Unidos de Norteamérica: Departamento de Energía, 2003).

generalmente carecen de los niveles lumínicos apropiados y recurren a iluminación artificial. Por lo tanto, es oportuno recurrir a propuestas para delimitar la profundidad del espacio para lograr una iluminancia relativamente uniforme en el ambiente interior con ventanas laterales y aprovechar el recurso disponible.

A través de la “Matriz de diseño con luz natural”, propuesta en esta tesis doctoral, es posible conocer el dimensionamiento de los vanos libres de obstrucciones, según su orientación, el total del área que engloba el espacio interior, el FLDP y los niveles de iluminancia requeridos al interior dentro de un horario en específico, considerando el límite de la profundidad del espacio. La verificación de la matriz corrobora la adecuada iluminación difusa interior, según los niveles lumínicos requeridos, siempre y cuando se consideren ciertas características generales del espacio: reflectancia promedio de 0.50, lo cual representa un ambiente con techos blancos y paredes claras; un ángulo visible de cielo de 75° grados, lo cual significa que goza de un cielo libre de obstrucciones, solo el dintel de la ventana ocasiona una obstrucción de 15° grados, generado por una altura de ventana de 1.20 metros con un ancho de muro de 20 centímetros; transmitancia de un vidrio simple bajo luz difusa: 0.8, multiplicado por el factor de suciedad: 0.8, considerando una atmósfera urbana y una posición vertical.

Los porcentajes promedio propuestos en la “Matriz de diseño con luz natural” para la Cuenca de México muestran que las ventanas orientadas al Este y Sur 15%, pueden ser de menor dimensión que las ventanas orientadas al Oeste 18% y al Norte 22%. Estas últimas requieren mayor superficie para captar el flujo difuso de la bóveda celeste para iluminar los interiores, a partir del recurso lumínico analizado y disponible en cada orientación. La diferencia de los valores hacia el Este y Oeste radica en la nubosidad presente por las tardes en la cuenca, lo cual atenúa el flujo difuso hacia el Oeste, requiriendo de un vano más grande en esta orientación. Estos valores promedio reflejan una estrategia para aprovechar el recurso lumínico en la cuenca y podrían formar parte de la normativa que rige las edificaciones de esta urbe. La normativa actual considera un porcentaje igualitario para las ventanas en todas las orientaciones igual a 17.5% para todos los ambientes habitables y 15% para espacios com-

plementarios. A través de esta investigación se concluye que este porcentaje no se basa en estudios sobre la disponibilidad del recurso lumínico en el sitio y no representa una estrategia para el aprovechamiento de la luz natural. De tal forma, los valores obtenidos en esta tesis deben integrarse a la normativa de la cuenca, tomando en cuenta continuar con evaluaciones del recurso lumínico disponible por más de un ciclo climatológico. La normativa podría incluir que se requiere un ventanaje mínimo de 15% en las fachadas al Este y Sur, 18% en las fachadas al Oeste, y 22% en las fachadas al Norte (tabla 6.3) para obtener una iluminancia interior difusa promedio entre 300 y 600 lux, en las horas centrales del día, considerando los límites de la profundidad del espacio, un cielo libre de obstrucciones del contexto, un clima templado, interiores claros, vidrios verticales y simples con transmitancia de 0.8. Los diseñadores de la construcción deberían usar una matriz como la propuesta en este trabajo para el dimensionamiento de ventanas de acuerdo con los requerimientos lumínicos del espacio.

Tabla 6.3 Ventanaje mínimo para la Cuenca de México

Orientación	Propuesta	Normativa actual
Este	15%	17.5%
Sur	15%	
Oeste	18%	
Norte	22%	

Curiosamente, el “Reglamento de construcciones para el Distrito Federal” de 1993 —normativa anterior a la que rige actualmente en el sitio—, proponía porcentajes mínimos de ventanaje diferentes para cada orientación. Esta norma proponía vanos al Este de 17.5%, al Sur de 20%, al Oeste de 17.5% y al Norte de 15%.⁵ Al proponer diferentes porcentajes se reconoce que el flujo luminoso de cada orientación varía; sin embargo, estos no reflejan la disponibilidad del recurso de las diferentes orientaciones en la cuenca. Los porcentajes de ventanas que esta tesis propone pueden ser contemplados en la reglamentación del sitio para aprovechar el recurso lumínico disponible de la cuenca. Con esta aportación se da continuidad

5 IPN, *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal* (México, DF: Alfaomega, 2002), 249.

a las interrogantes planteadas en las conclusiones de la tesis de maestría. Ahí se menciona lo siguiente: “Las normas de iluminación natural deberían establecer la iluminancia dentro de un espacio interior, durante un tiempo determinado a lo largo del día según la temporada, el clima, la actividad a realizar, las características geométricas y los materiales del espacio.”⁶ La matriz planteada en esta investigación responde a los requerimientos lumínicos dentro de un espacio, según las actividades a realizar dentro de este, en un horario determinado, las dimensiones del espacio y los acabados de las superficies.

Sin embargo, es necesario seguir evaluando las mediciones fotométricas con el fin de tener certeza del comportamiento lumínico. Para esto, es necesario realizar mediciones en el sitio por más de 15 o 30 años. Los organismos reguladores establecen este periodo de tiempo con el fin de conocer el comportamiento y la variabilidad de los elementos climáticos en un periodo más amplio. Con este registro prolongado las evaluaciones del recurso lumínico estarán más acorde con la realidad y serán más asertivas. También es importante continuar las mediciones lumínicas en el campo arquitectónico. Es fundamental analizar profundamente los resultados de la matriz de diseño, por medio de trabajos experimentales, en los cuales se evalúen los niveles lumínicos dentro de los espacios bajo diversas condiciones reales de esta magna urbe. Posteriormente, sería importante desarrollar una matriz de diseño, la cual contemple las obstrucciones del contexto construido en la cuenca.

La “Matriz de diseño con luz natural” propuesta en esta tesis, brinda la posibilidad de dimensionar las ventanas de las edificaciones en la Cuenca de México, según su orientación para un rango de iluminancia requerida. Utilizar esta herramienta de diseño desde la conceptualización del objeto arquitectónico significa aprovechar el recurso lumínico disponible en la arquitectura local. Aprovechar el recurso natural en la cuenca propicia el ahorro energético, al no recurrir a la luz artificial durante el día, con lo cual conservamos el medioambiente. También propicia salud, bienestar y mejoría en el desempeño laboral y educativo de las personas, al no privarlos del ciclo natural luz-oscuridad y al recibir los beneficios del espectro completo y

6 Cecilia Guadarrama Gándara, “Luz natural: Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México” (tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011), 218.

único del flujo luminoso natural. Asimismo, se puede aprovechar este flujo para iluminar los ambientes interiores y enaltecer la belleza del objeto arquitectónico a través del equilibrio de luz y sombra.

Fueron dos las hipótesis que guiaron este trabajo. La primera indica que la caracterización del recurso lumínico en la Cuenca de México permitirá conocer la disponibilidad de este recurso a fin de desarrollar herramientas de diseño con luz natural para su aprovechamiento en los ambientes arquitectónicos. La segunda, que el conocimiento de la relación entre la iluminancia e irradiancia en la cuenca permite modelar la relación entre ambos parámetros, con lo cual se determinan y evalúan los valores de eficacia luminosa de la región. Efectivamente, con la caracterización del recurso lumínico conocimos la disponibilidad de este recurso en la cuenca. Asimismo, al modelar la relación entre la iluminancia e irradiancia en la cuenca se determinaron y evaluaron los valores de la eficacia luminosa global y difusa. Con los resultados se estableció la importancia de aprovechar el flujo difuso en los interiores arquitectónicos. De tal forma, con la disponibilidad del recurso lumínico difuso de la cuenca se desarrolla la “Matriz de diseño con luz natural” con el fin de utilizarla como herramienta de diseño para aprovechar este flujo difuso en la arquitectura local.

Se concluye satisfactoriamente este trabajo de investigación, el cual continúa y abre líneas de investigación referentes a la interacción de la luz natural y la arquitectura. Se plantea adquirir más equipo de medición especializado para continuar evaluando el recurso lumínico disponible, su relación con el flujo radiativo y su interacción con los objetos arquitectónicos en la Cuenca de México y en otros sitios de la República Mexicana. Esto, con el fin de plantear diferentes medidas de ahorro energético al aprovechar la luz natural en la arquitectura e incidir en la reglamentación local.

Cierro este documento mencionando las aportaciones de esta investigación y agradeciendo a mi *alma mater*, la UNAM, a todas las entidades involucradas en este trabajo, a mi director de tesis por todo el apoyo brindado a lo largo de estos años y a mi comité tutor. Las aportaciones científicas de esta investigación van ligadas a conocer el fenómeno natural que en este

caso es la iluminancia y su relación con la irradiancia:

1. La implementación de parámetros lumínicos a través de la “Plataforma de Observación de Luz Natural”, la cual se integra al ORS.
2. La creación de una base de datos confiable, continua y permanente de parámetros lumínicos.
3. La caracterización de la irradiancia e iluminancia global, directa, difusa y vertical al Este, Sur, Oeste y Norte con información medida de un ciclo climatológico.
4. La determinación de los rangos de la eficacia luminosa global y difusa en la Cuenca de México.
5. La evaluación del flujo lumínico difuso vertical al Este, Sur, Oeste y Norte, a partir de la iluminancia vertical y la iluminancia directa medidas durante un ciclo climatológico.

Las aportaciones tecnológicas de este trabajo están enfocadas en conjuntar teorías y técnicas para diseñar y fabricar elementos para medir el fenómeno natural:

6. El desarrollo tecnológico de bases para la medición radiométrica y fotométrica.

Mientras que las aportaciones de diseño están enfocadas en desarrollar estrategias y herramientas de diseño con luz natural para aprovechar este recurso en la arquitectura de la Cuenca de México:

7. La determinación del “Factor de luz de día” FLD medio horario y del “Factor de luz de día promedio” $FLDP$ para diversos niveles de iluminancia interior, a partir del recuso lumínico en la Cuenca de México.
8. Una “Matriz de diseño con luz natural” para determinar el dimensionamiento de las ventanas según su orientación, los requerimientos de iluminancia interior, considerando los límites de la profundidad del espacio para el uso de arquitectos, ingenieros y diseñadores de la construcción.

Libros

- Ayllón, Teresa. *Elementos de meteorología y climatología*. 3.^a ed. México, DF: Trillas, 2013.
- Barry, Roger G. y Richard J. Chorley. *Atmósfera, tiempo y clima*. Trad. de Ana María Guilló. Barcelona: Ediciones Omega, S.A., 1985.
- Barry, Roger G. y Richard J. Chorley. *Atmosphere, Weather and Climate*. 9^a. ed. Oxon: Routledge, 2010.
- Boubekri, Mohamed. *Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies*. Oxford: Architectural Press, 2008.
- Cetto, Ana María. *La luz: en la naturaleza y en el laboratorio*. 2^a. ed. México, DF: Fondo de Cultura Económica, 2012.
- Chaiwiwatworakul, Pipat. *Daylighting in the Tropics: Daylight Availability, Sky Luminance Distribution, Daylight Application with Automated Blind*. Sarrebruck: Lambert Academic, 2011.
- Cotler Ávalos, Helena, ed. *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. México, DF: Pluralia Ediciones e Impresiones SA de CV, 2010.
- Fundación UNAM. *Ciudad Universitaria: Crisol del México Moderno*. México: Fundación UNAM, 2010.
- García, Enriqueta. *Apuntes de climatología*. 1.^a ed. 1967. México, DF: UNAM, 2014.
- García, Enriqueta. *Los climas del Valle de México*. Chapingo: Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, 1968.
- Garza, Gustavo, coord. *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. México: El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano: Gobierno del Distrito Federal, 2000.
- Hopkinson, Ralph G., P. Petherbridge y James Longmore. *Daylighting*. Londres: Heinemann, 1966.

⑦ recursos bibliográficos

Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). *Lighting Metrics*. Nueva York: IESNA, 2001.

Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). *The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application*. 9ª ed. Nueva York: IESNA, 2000.

IPN. *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. México, DF: Alfaomega, 2002.

Iqbal, Muhammad. *An Introduction to Solar Radiation*. Ontario: Academic Press, 1983.

Jáuregui Ostos, Ernesto. *El clima de la Ciudad de México*. México, DF: UNAM, Instituto de Geografía, 2000.

Kittler, Richard, Miroslav Kocifaj y Stanislav Darula. *Daylight Science and Daylighting Technology*. Nueva York: Springer, 2011.

Magaña Rueda, Víctor O. *Los impactos de El Niño en México*. México, DF: unam, [en línea]. Disponible en: http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/, consulta: 03/12/2013.

Moore, David S. *Estadística aplicada básica*. Traducción y adaptación por Jordi Comas. Barcelona: Antoni Bosch, 1995.

Muneer, Tariq. *Solar Radiation and Daylighting Models*. 2.ª ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

Oliver, Margaret A. y Richard Webster. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Suiza, Cham: Springer, 2015.

Pani, Mario, y Enrique del Moral. *La construcción de la Ciudad Universitaria del Pedregal: Concepto, programa y planeación arquitectónica*. Vol. XII. México: UNAM, 1979.

Riveros Rosas, David, Mauro Valdés Barrón, Camilo Alberto Arancibia Bulnes y Roberto Bonifaz Alfonzo. *La radiación solar*. México, DF: UNAM y Editorial Terracota, 2012.

Riveros Rotgé, Héctor G., Adriana Julián Sánchez y Héctor Riveros Rosas. *Método científico experimental*. México, DF: Trillas, 2009.

Robinson N., ed. *Solar Radiation*. Amsterdam: Elsevier, 1966.

Szokolay, Steven V. *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. 2ª. ed. Oxford: Architectural Press, 2008.

Tregenza Peter y Michael Wilson. *Daylighting: Architecture and Lighting Design*. Oxon: Routledge, 2011.

Tregenza, Peter y David Loe. *The Design of Lighting*. Londres: Spon Press, 2004.

Artículos

Bartzokas, A, H D Kambezidis, S Darula y R Kittler. "Comparison Between Winter and Summer Sky-Luminance Distribution in Central Europe and in the Eastern Mediterranean". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, n.º 7 (2005): 709–18.

- Cecilia Guadarrama y Daniel Bronfman. "Sobre luz natural en la arquitectura". *Bitácora* 29 (2014): 076-083.
- Chirarattananon, Surapong, Pipat Chaiwiwatworakul, y Singthong Pattanasethanon. "Daylight Availability and Models for Global and Diffuse Horizontal Illuminance and Irradiance for Bangkok". *Renewable Energy* 26, n.º 1 (2002): 69–89.
- Darula, Stanislav y Richard Kittler. "CIE general sky standard defining luminance distributions". *Bi-annual International Building Performance Simulation Association Conference Montreal, IBPSA* (2002): 1-8.
- De Rosa, A., V. Ferraro, D. Kaliakatsos, y V. Marinelli. "Simplified Correlations of Global, Direct and Diffuse Luminous Efficacy on Horizontal and Vertical Surfaces". *Energy & Buildings* vol. 40, n.º 11 (2008): 1991–2001.
- Dumortier, D. "Evaluation of Luminous Efficacy Models According to Sky Types and Atmospheric Conditions". *Proceedings Lux Europa Conference* (1997): 1068–1080.
- Fakra, A.H., H. Boyer, F. Miranville y D. Bigot. "A Simple Evaluation of Global and Diffuse Luminous Efficacy for All Sky Conditions in Tropical and Humid Climate". *Renewable Energy* 36, n.º 1 (2011): 298–306.
- Hay, John E., D.C. McKay y la Agencia Internacional de Energía (IEA). "Calculation of Solar Irradiances for Inclined Surfaces: Verification of Models Which Use Hourly and Daily Data". *A Report of Task 9: Solar Radiation and Pyranometry Studies*, vol. 1 (1988).
- Igawa, Norio, Yasuko Koga, Tomoko Matsuzawa, y Hiroshi Nakamura. "Models of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution". *Solar Energy* 77, n.º 2 (2004): 137–57.
- Kasten, Fritz y Andrew T. Young. "Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula". *Applied Optics* 28, n.º 22 (1989): 4735–4738.
- Kong, Hyo Joo y Jeong Tai Kim. "Modeling Luminous Efficacy of Daylight for Yongin, South Korea". *Energy & Buildings* 62 (2013): 550–58.
- Kong, Hyo Joo, y Jeong Tai Kim. "Modeling Luminous Efficacy of Daylight for Yongin, South Korea". *Energy & Buildings* 62 (2013): 550–58.
- Lam, Joseph C. y Danny H.W. Li. "Luminous Efficacy of Daylight Under Different Sky Conditions". *Energy Conversion and Management* 37, n.º 12 (1996): 1703–11.
- Lynes, J.A. "A Sequence for Daylighting Design". *Lighting Research and Technology*, vol. 11, n.º 2 (1979): 102-106.
- Montero-Martínez, Guillermo, Víctor Zarraluqui-Such, E.S. Caetano Neto y Fernando García-García. "Hydrometeor Vertical Characterization of Precipitating Clouds Over the Mexico Basin". *International Journal of Remote Sensing* 32, n.º 21 (2011): 6367–6378.
- Oteiza, Pilar y Ana Pérez-Burgos. "Diffuse Illuminance Availability on Horizontal and Vertical Surfaces at Madrid, Spain". *Energy Conversion and Management* 64, n.º C (2012): 313–19.

⑦ recursos bibliográficos

- Pérez-Burgos, Ana, Argimiro de Miguel, y Julia Bilbao. "Daylight Illuminance on Horizontal and Vertical Surfaces for Clear Skies: Case Study of Shaded Surfaces." *Solar Energy* 84, n.º 1 (2010): 137–43.
- Perez, R., R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart y D. Menicucci. "A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces". *Solar Energy* vol. 39, n.º 3 (1987): 221-231.
- Perez, Richard, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky y Ronald Stewart. "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance". *Solar Energy* vol. 44, n.º 5 (1990): 271–289.
- Souza, Roberta Vieira Gonçalves y Fernando Oscar Ruttkay Pereira. "Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento". *Ambiente Construído* 4, n.º 3 (2008): 79–94.
- Yang, Chin-Shung, Szu-Pyng Kao, Fen-Bin Lee y Pen-Shan Hung. "Twelve Different Interpolation Methods: A case Study of Surfer 8.0". *Proceedings of the XXth ISPRS Congress* (2004): 1–8.

Tesis

- Guadarrama Gándara, Cecilia. "Luz natural: Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México". Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- Ruíz Hernández, José Antonio. "Cambios climáticos en la Ciudad de México". Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 1994.
- Valeriano Flores, Arturo. "Iluminación natural en la arquitectura: Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México". Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.

Manuales

- Kipp & Zonen, ed., *CMP serie, Manual de Usuario*. Delf: Kipp and Zonen B.V., 2010 versión del manual: 1007.
- Yankee Environmental Systems, Inc., ed. *YESDAQ Data Visualization Engine*. Massachusetts: Yankee Environmental Systems, Inc., 2002 Rev.A 9/25/2002.

Reportes técnicos, informes, notas, guías, atlas, impresos, cursos, cuadernos y ponencias

Berg, Robbie. "2014 Eastern Pacific Hurricane Season", National Hurricane Center. NOAA, [en línea]. Disponible en: http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/summary_epac_2014.pdf, (consulta: 05/05/2017), 2015.

Boyce, Peter, Claudia Hunter y Owen Howlett. "The Benefits of Daylight Through Windows". Estados Unidos de Norteamérica: Departamento de Energía, 2003.

CIE 108-1994. *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*. Viena: CIE Central Bureau, 1994.

CIE S 011/E. *Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky*. Viena: CIE Central Bureau, 2003.

CONAGUA. "Reporte del clima en México". México, DF: Comisión Nacional del Agua y Servicio Meteorológico Nacional, 2014. [en línea]. Disponible en: <http://smn1.conagua.gob.mx/climatologia/analisis/reporte/Anual2014.pdf>, (consulta: 13/09/2017)

Gaceta Oficial del Distrito Federal. "Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico". México, DF: Gobierno del Distrito Federal, 8 de febrero de 2011.

Gómez Mendoza, Leticia. "Curso de meteorología". Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 2014-1.

Igawa, Norio. "Improved All Sky Model". Ponencia presentada en el seminario internacional *Radiación solar y luz natural*, Universidad Nacional Autónoma de México: Posgrado de Arquitectura, 3-4 de junio de 2013.

Instituto de Astronomía. "Anuario del Observatorio Astronómico Nacional, AOAN". México, DF: UNAM, 2010.

Martín A. Díaz. "Geoestadística aplicada". Instituto de Geofísica: UNAM, Curso de Geoestadística, 2002, [en línea]. Disponible en: <http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf>, (consulta: 13/09/2017)

Muhllia V., Agustín. "Notas para el curso de solarimetría". Oaxaca: Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2004.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). *Atlas Internacional de Nubes*. Volumen I. Ginebra: OMM-No.407, 1993, [en línea]. Disponible en: http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_407_es-v1.pdf, consulta: 2/11/2013.

Oteiza San José, Pilar y Ana Pérez Burgos. "Iluminación sobre superficies horizontales y verticales en Madrid: guía para determinar la iluminación natural exterior e interior de un recinto". Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Cuaderno 36901/2-84-03, 2012.

Pasch, Richard J. "2014 Atlantic Hurricane Season", National Hurricane Center. NOAA, [en línea]. Disponible en: http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/summary_atlc_2014.pdf, (consulta: 05/05/2017), 2015.

- Riveros Rosas, David. "Notas de solarimetría". Chihuahua: Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2011.
- Secretaría del Medio Ambiente. *Informe 2010: Calidad del aire en la Ciudad de México*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2010.
- Secretaría del Medio Ambiente. *Informe 2011: Calidad del aire en la Ciudad de México: 25 años de monitoreo atmosférico*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012.
- Secretaría del Medio Ambiente. *Informe 2013: Capítulo 1: Calidad del aire y cambio climático*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013.
- Secretaría del Medio Ambiente. *Informe climatológico ambiental 2001: Cuenca del Valle de México*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2001.
- Steward, Stacy R. "Hurricane Amanda", National Hurricane Center. NOAA, [en línea]. Disponible en: http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/summary_epac_2014.pdf, (consulta: 05/05/2017), 2014.

Recursos electrónicos

- Agenda Estadística 2013, en Planeación UNAM, <<http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2013/pdf/Agenda2013.pdf>> (consulta: 12/11/2013).
- CIE, <www.cie.co.at> (consulta: 21/05/2013).
- Gaceta oficial del Distrito Federal: Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico, 3.4 Iluminación y ventilación, publicada el 8 de febrero de 2011, <<http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vidente/r406001.pdf>>(consulta:22/09/2016)
- Historia y objetivos, en Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. UNAM, <<http://www.observatoriometeorologicounam.com/historia.htm>> (consulta: 12/11/2013).
- Mapas de Programas Delegacionales, en SEDUVI,<<http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/docs/programas/programasdelegacionales/>> (consulta: 7/11/2013).
- The IDMP Network, <www.idmp.entpe.fr> el servidor es operado por ENTPE ubicado en Vaulx-en-Velin, Francia, fue diseñado por D. Dumortier y J.M. Duport, está disponible desde marzo de 1997. Última modificación de la página fue el 28 de marzo de 1998. (Consulta: 13/05/2013).

Nota general: Las traducciones de citas y paráfrasis han sido realizadas por la autora a menos que se indique lo contrario.

DESARROLLO TECNOLÓGICO DE BASES PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS RADIOMÉTRICOS Y FOTOMÉTRICOS

A1

Bases para los fotómetros

Para la colocación y nivelación de los fotómetros se diseñaron y fabricaron bases cilíndricas, en las cuales se toma como referencia las medidas y los elementos de la base niveladora original para fotómetros de la marca LI-COR. Estas bases se adecuan de tal forma que el detector de los fotómetros se encuentre al mismo nivel del área de aceptación de los piranómetros CMP11 y CMP21 de la marca Kipp & Zonen. El material de fabricación es aluminio, color natural. (Figura A1.1 y A1.2)

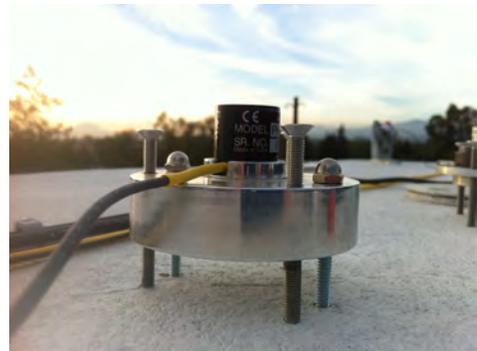
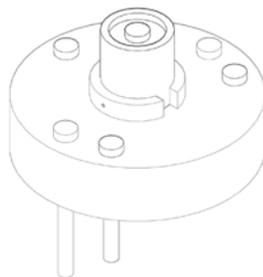
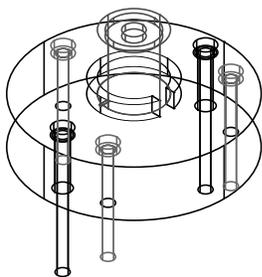


Figura A1.1: Isométricos y fotografía de la base para fotómetros.

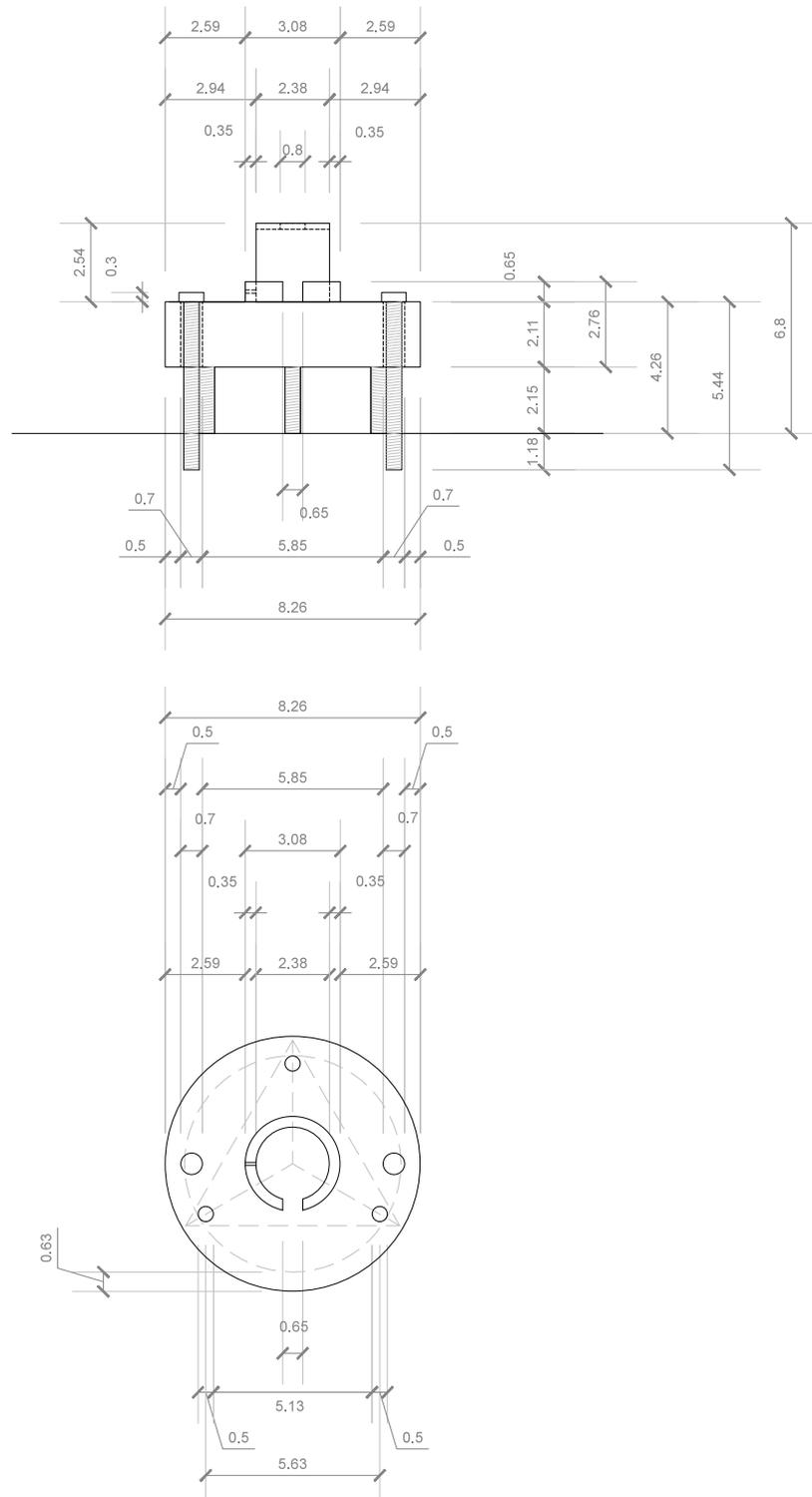


Figura A.1.2: Alzado y planta de la base para fotómetros, medidas en centímetros.

Base para la medición de iluminancia normal directa

Esta base debe alojar un fotómetro de la marca Li-Cor y debe colocarse en el seguidor solar, para esto último la marca Kipp & Zonen provee los accesorios necesarios para su fijación: plato de montaje lateral, número de artículo: 0367708 y paquete de montaje, número de artículo: 0267710.

El diseño de esta base lo sugiere la “Guía de Recomendaciones para Mediciones de Luz Natural” de la CIE, en la cual se menciona que el campo de visión se define por el ángulo de apertura medio, igual a 2.5° grados con un ángulo inclinado de 1° grado, la guía menciona que los instrumentos para medir iluminancia e irradiancia normal directa deben tener los mismos valores para el campo de visión¹, lo cual coincide ya que el campo de visión del pirheliómetro CHP1 es de 5° grados. Como resultado, la base diseñada tiene un ángulo de apertura medio de 2.5° grados con un ángulo inclinado de 1° grado y a consecuencia un ángulo límite medio de 4° grados, debido al diámetro del detector del sensor de 0.8 cm. La posición del fotómetro, así como el cruce del ángulo de apertura y el inclinado indican el largo del tubo colimador de 17.15 cm y por ende el diámetro de apertura del tubo de 1.33 cm. (Figura A1.3)

El tubo colimador se fabrica a partir de un tubo de aluminio comercial; donde el espesor de las paredes es de 0.015 cm, el diámetro interior de 3.55 y el exterior de 3.85 cm; el diámetro exterior es similar al del pirheliómetro CHP1, por lo tanto es posible colocar el tubo dentro de los accesorios de montaje de la marca Kipp & Zonen. (Figura A1.6 y A1.7)

El aro concéntrico al interior del tubo, diafragma, se ubicó de acuerdo con un estudio de reflexión de rayos a cada grado a partir del ángulo de apertura de 2.5° grados. Se tomó en cuenta que la tercera reflexión no influye en las medidas que detecta el sensor, debido a la estabilidad de $\pm 5\%$ que tiene el instrumento. (Figura A1.4)

El tubo cuenta con cuatro drenes de agua de 0.3 cm de diámetro antes del diafragma y dos drenes lineales en la base redonda, para evitar la acumulación de agua al interior del tubo. Al tubo lo abraza un círculo con una mirilla, cuyo orificio coincide con una marca en la

1 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice Measurement* (Viena: CIE Central Bureau, 1994), 4.

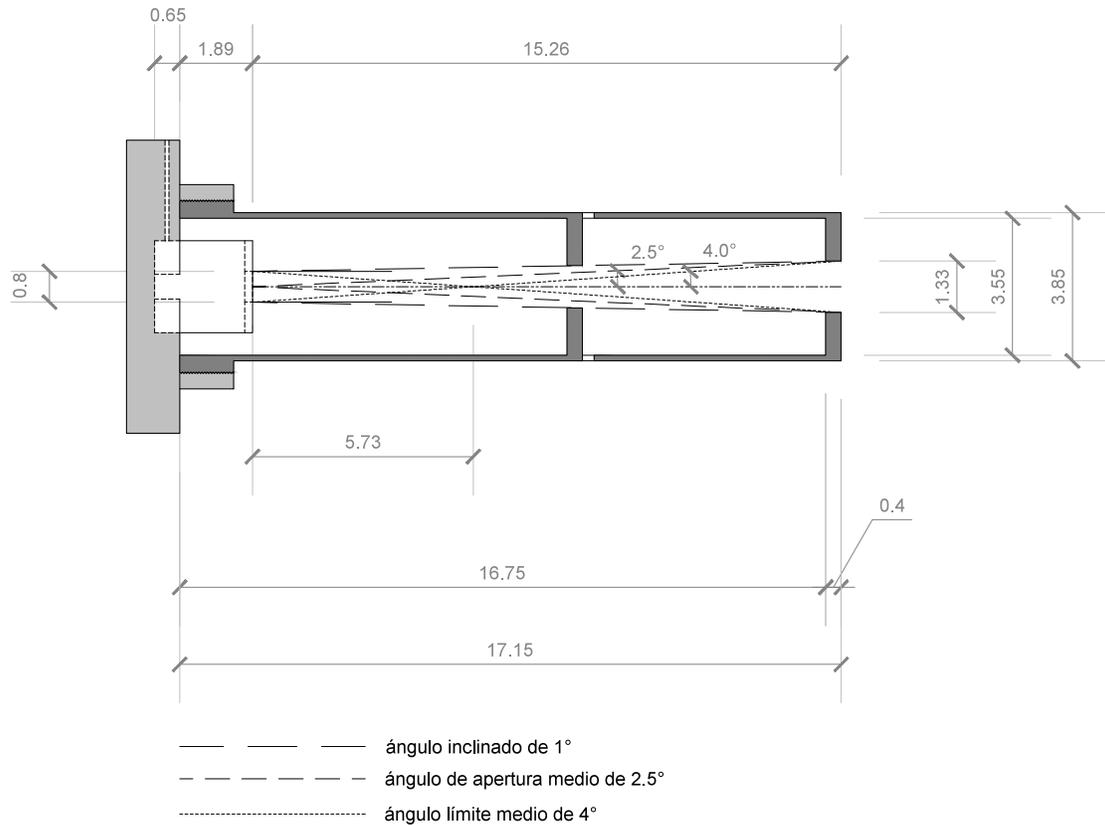


Figura A1.3: Ángulos de la base para la medición de iluminancia normal directa, medidas en centímetros.

base redonda, para alinear el tubo colimador con el Sol. (Figura A1.5)

La base consta de dos piezas: la base redonda y el tubo colimador. Para el ensamblaje de las piezas, primero se inserta el fotómetro a la base redonda y se ajusta con un “prisionero”, para evitar su movimiento. Posteriormente, se enrosca el tubo colimador a la base redonda —hasta hacer coincidir la marca del tubo con la marca de la base redonda— de tal forma que permanece perpendicular a esta. El material de fabricación es aluminio, al exterior queda el color del aluminio natural y al interior está pintado de negro mate. (Figura A1.6)

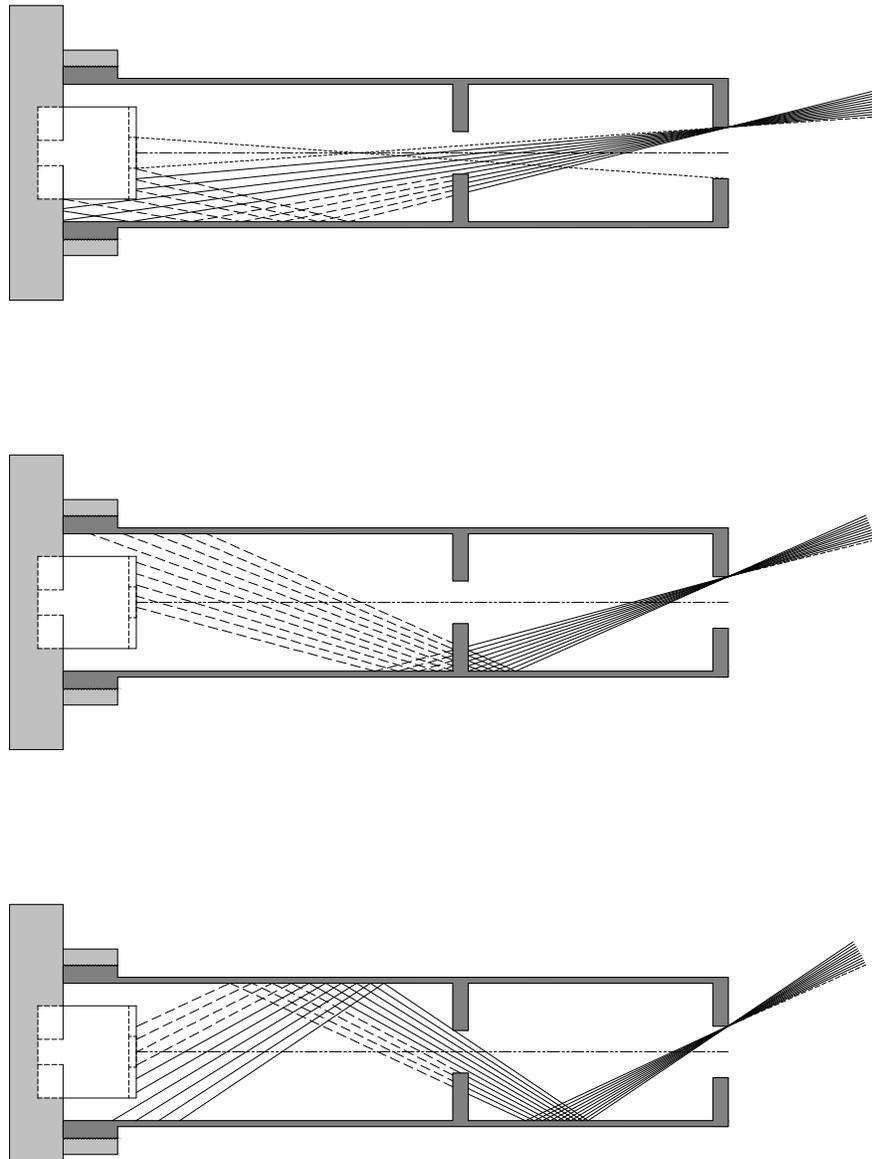


Figura A1.4: Estudio de reflexión de rayos, base para la medición de iluminancia normal directa.

① anexo

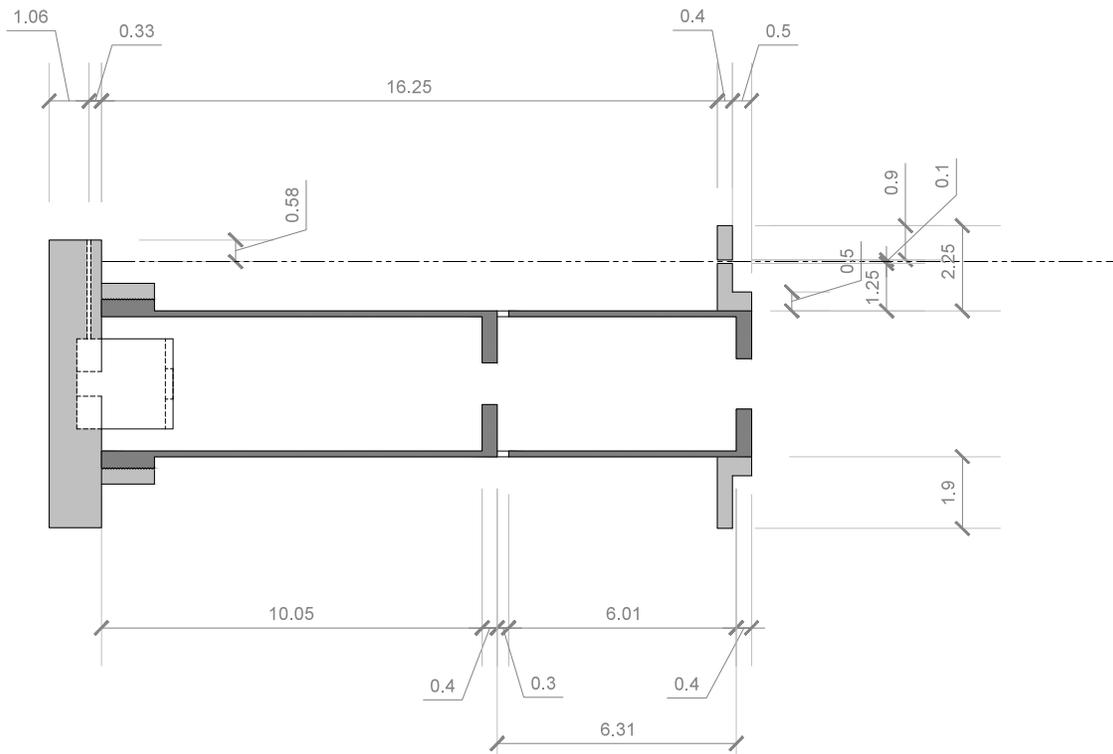


Figura A1.5: Drenes y mirilla de la base para la medición de iluminancia normal directa, medidas en centímetros.

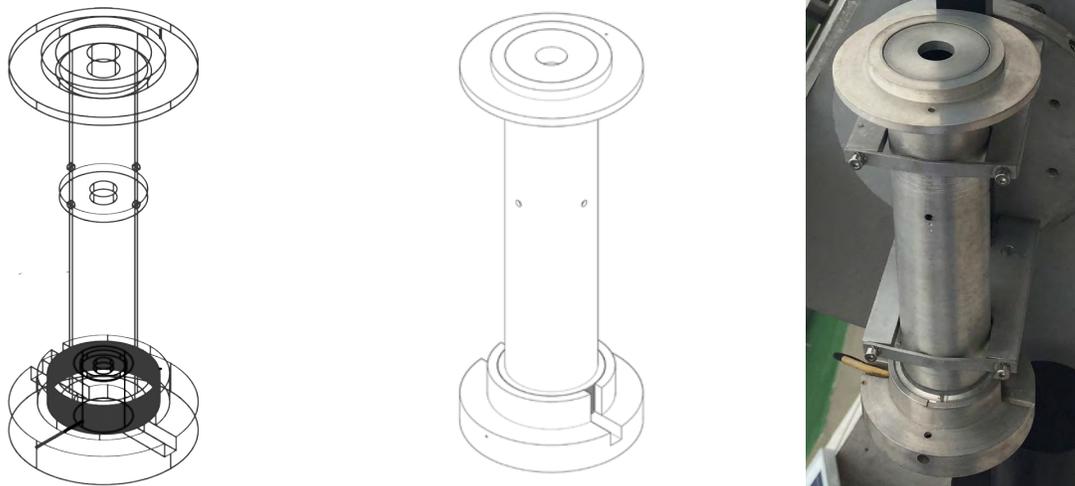


Figura A1.6: Isométricos y fotografía de la base para la medición de iluminancia normal directa.

Base para la medición de luminancia del cenit.

El diseño de esta base es similar al de la base para la medición de iluminancia normal directa. Consta de una base redonda a la cual se le enrosca un tubo colimador. Al interior debe alojar un fotómetro de la marca Li-Cor. La posición de la base en este caso es vertical, apuntando al cenit. (Figura A1.8)

El diseño de esta base también lo sugiere la “Guía de Recomendaciones para Mediciones de Luz Natural” del CIE, en la cual se menciona que el campo de visión se define por el ángulo de apertura medio, igual a 5.5° grados, a consecuencia el ángulo límite medio es de 7° grados, debido al diámetro del detector de 0.8 cm. En este caso, la posición del fotómetro, así como el cruce del ángulo de apertura y ángulo límite, indican el largo del tubo colimador de 17.47 cm y por ende el diámetro de apertura del tubo de 3.0 cm. (Figura A1.9)

La ubicación y el espesor del diafragma al interior del tubo se determinó por un estudio de reflexión de rayos, a cada grado a partir del ángulo de apertura de 5.5° grados. Se tomó en

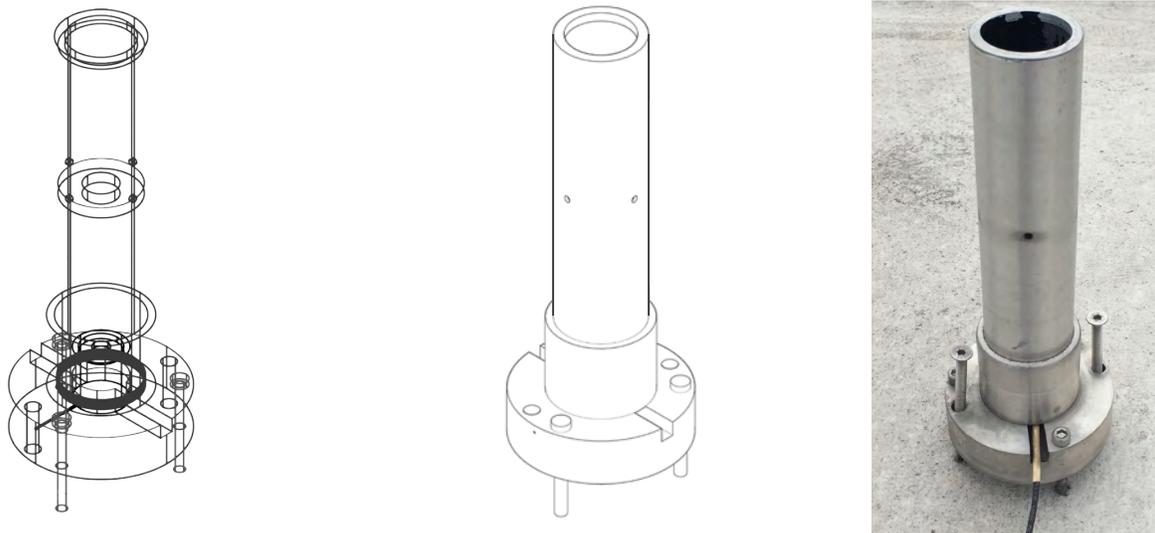


Figura A1.8: Isométricos y fotografía de la base para la medición de luminancia del cenit.

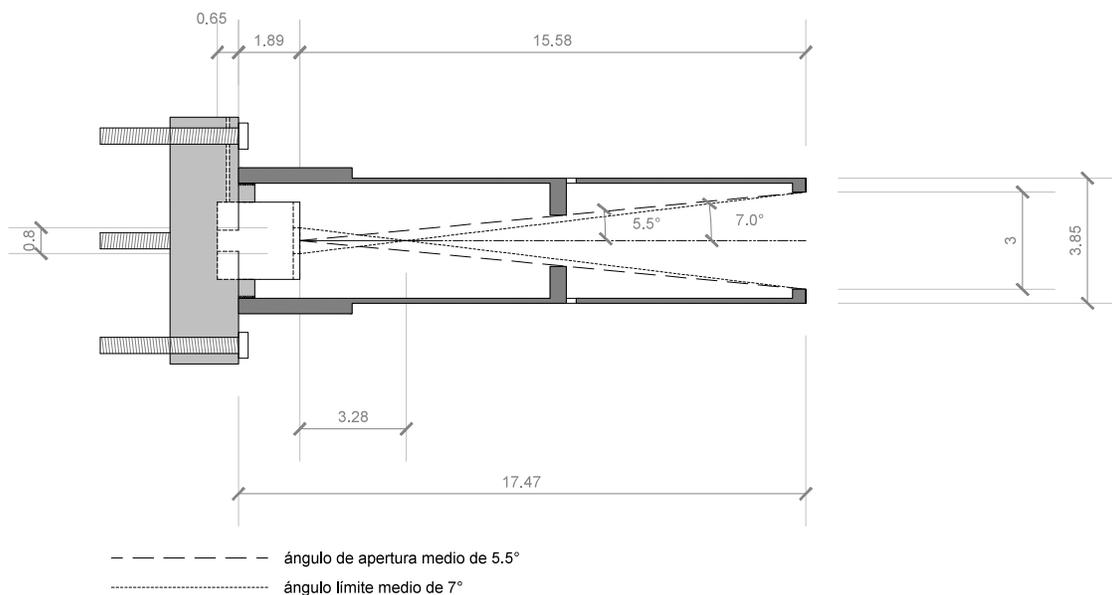


Figura A1.9: Ángulos de la base para la medición de luminancia del cenit, medidas en centímetros.

cuenta que la tercera reflexión no influye en las medidas que detecta el sensor. (Figura A1.10)

Este tubo cuenta con cuatro drenes de agua de 0.3 cm de diámetro antes del diafragma y dos drenes lineales en la base redonda, para evitar la acumulación de agua al interior del tubo.

Para que el tubo se encuentre completamente perpendicular enfrente del cenit es necesario nivelar la base redonda, por lo tanto se colocaron tres tornillos con cuerda en esta base y junto con un nivel de gota es posible nivelarla; esta base se fija a través de dos orificios y tornillos de acero inoxidable a la mesa de mediciones. El material de fabricación es aluminio, al exterior queda el color del aluminio natural y al interior esta pintado de negro mate. (Figura A1.8 y A1.11)

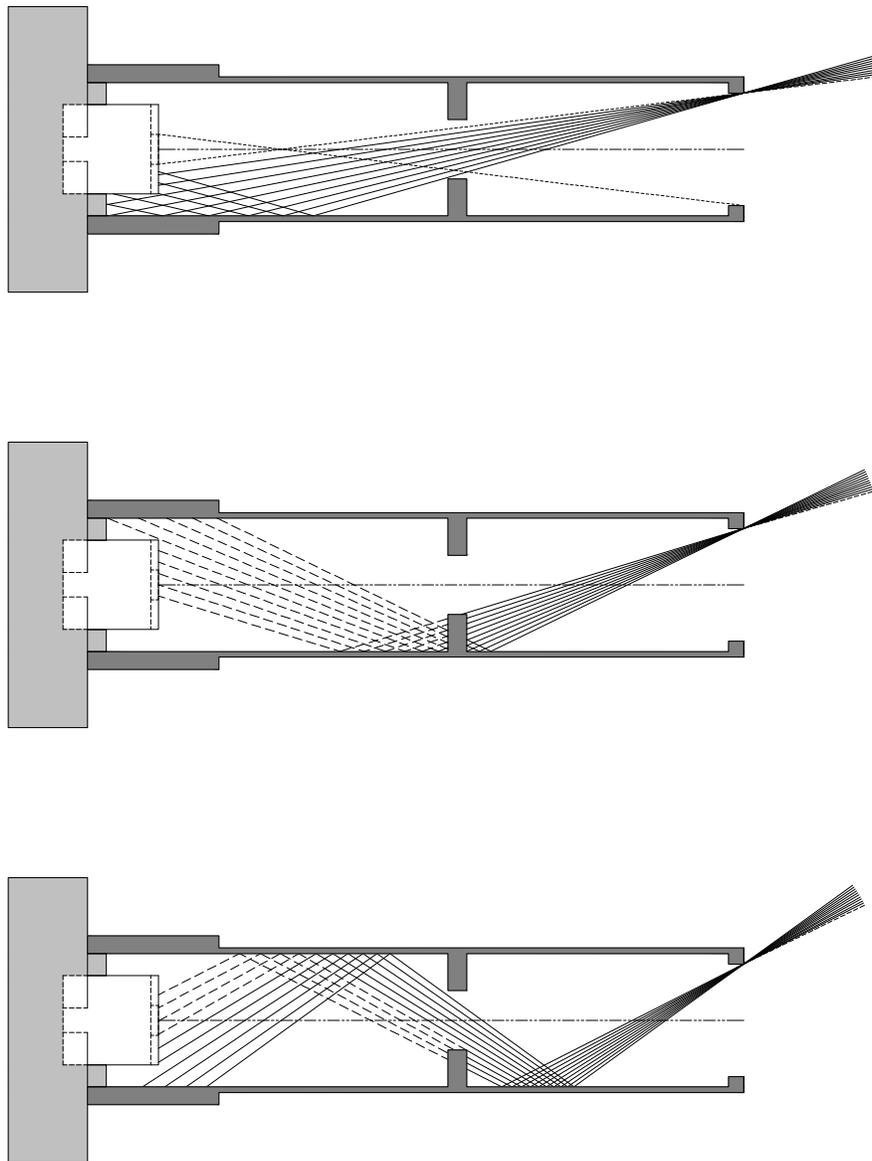


Figura A1.10: Estudio de reflexión de rayos, base para la medición de luminancia del cenit.

Bases verticales para piranómetros y fotómetros

Las bases verticales fueron diseñadas para fijar los piranómetros y los fotómetros de forma vertical, de tal manera que los instrumentos enfrentan una parte del cielo a los cuatro puntos cardinales. Para que estos capten solo la radiación de la bóveda celeste, libre de obstrucciones y sin la reflexión del suelo, para que las mediciones puedan ser representativas del cielo de la cuenca y no solo del punto de observación, ya que el albedo del suelo de cada punto puede variar significativamente los flujos de energía incidentes sobre los planos verticales. Se diseñó para la base un horizonte artificial a la altura del centro del detector, a una distancia, de por lo menos 10 veces el diámetro del área del mismo detector.² El horizonte artificial se consideró con una inclinación de 14° grados para evitar reflexiones secundarias al sensor. A consecuencia, la planta del horizonte artificial esta conformada por dos medios octágonos (el largo de cada lado es de: 14 y 16.5 cm para el piranómetro y 12 y 14.5 cm para el fotómetro) cuyo centro, en ambos casos, es el detector o área de aceptación de los piranómetros. Dos de los lados se extienden o acortan para sujetarse a la superficie vertical, a la cual esta fijada el instrumento. (Figura A1.12 hasta A1.17)

En la parte inferior, entre la superficie vertical y el horizonte artificial, se colocaron elementos inclinados a 45° grados para evitar que la reflexión del suelo llegue al sensor. Estos elementos se colocaron a una distancia, en la vertical, considerable (19 cm en ambos casos) del sensor, para evitar el sobrecalentamiento de este. En la parte del fondo se colocó una malla para asegurar la obstrucción de la radiación del suelo. (Figura A1.14 y A1.17)

En la base vertical que aloja el piranómetro, la superficie horizontal —con la cual se fijan las bases a las mesas de la plataforma— se extiende y cubre parte del instrumento, para evitar que este reciba radiación directa y se sobrecaliente. (Figura A1.14)

El material de las bases es lámina de acero, lleva primer y pintura blanca automotriz en los exteriores y pintura negra mate en los interiores. (Figura A1.12 y A1.13)

2 CIE 108-1994, *Guide to Recommended Practice*, 4.

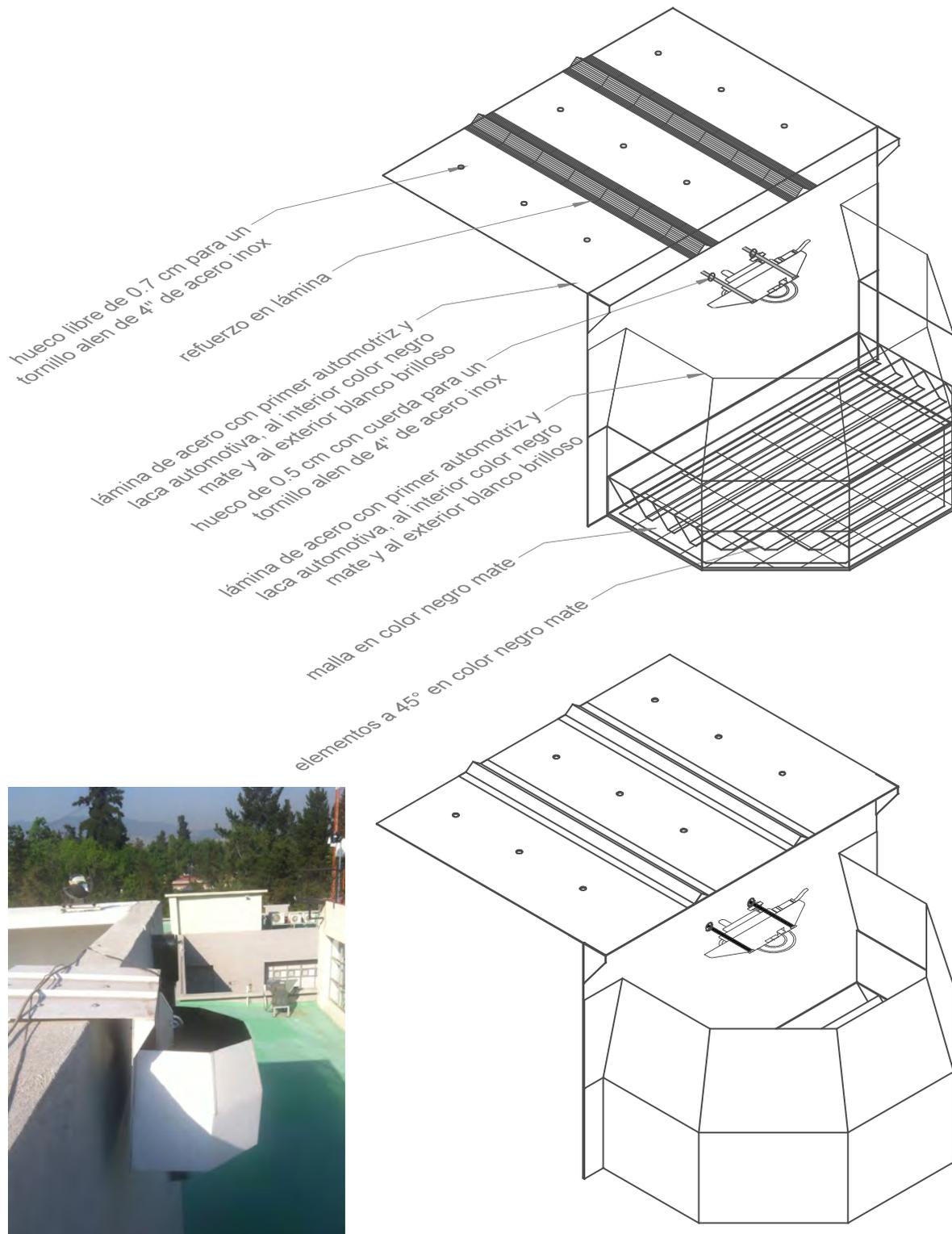


Figura A1.12: Isométrico y fotografía de las bases verticales para piranómetros.

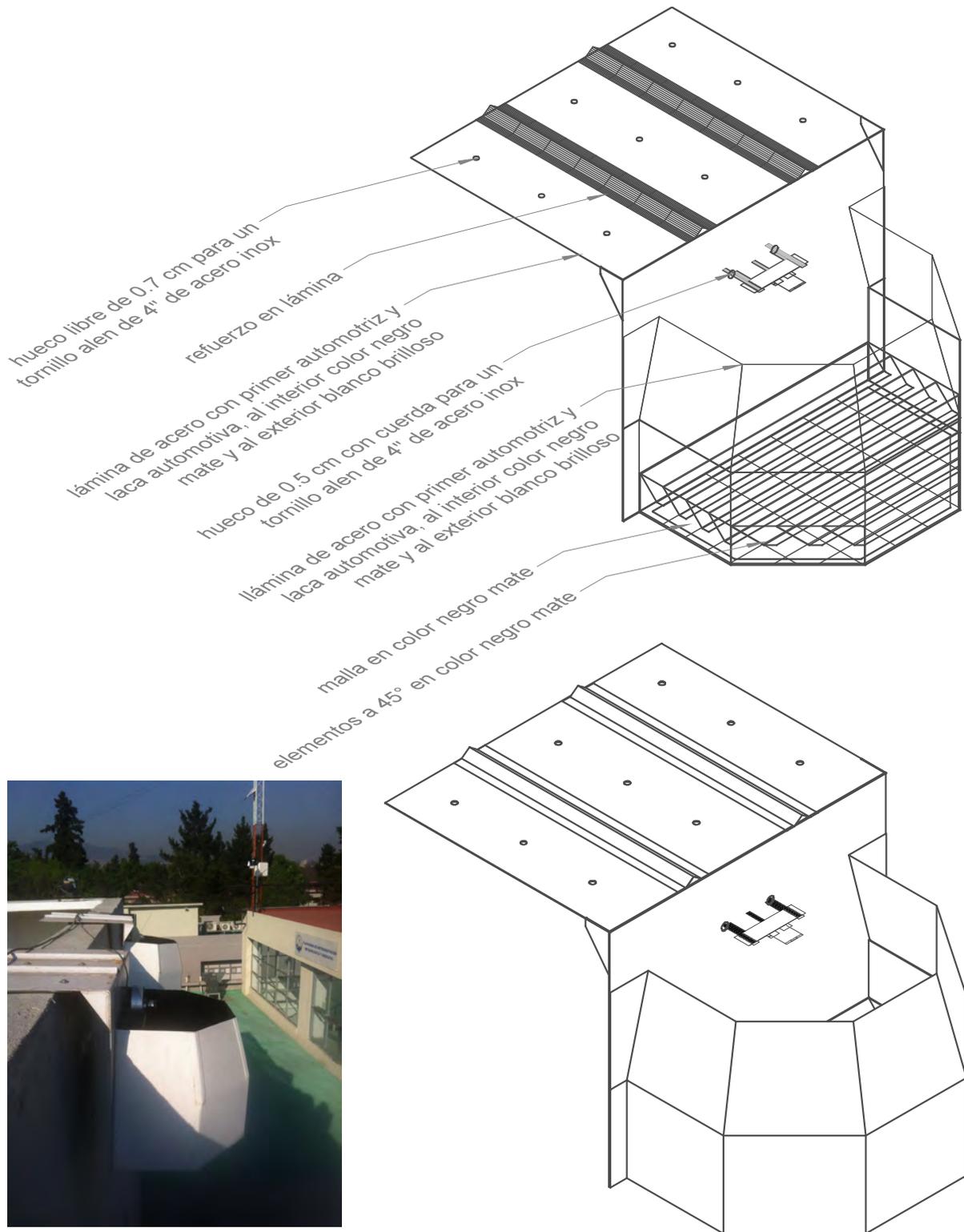


Figura A1.13: Isométricos y fotografía de las bases verticales para fotómetros.

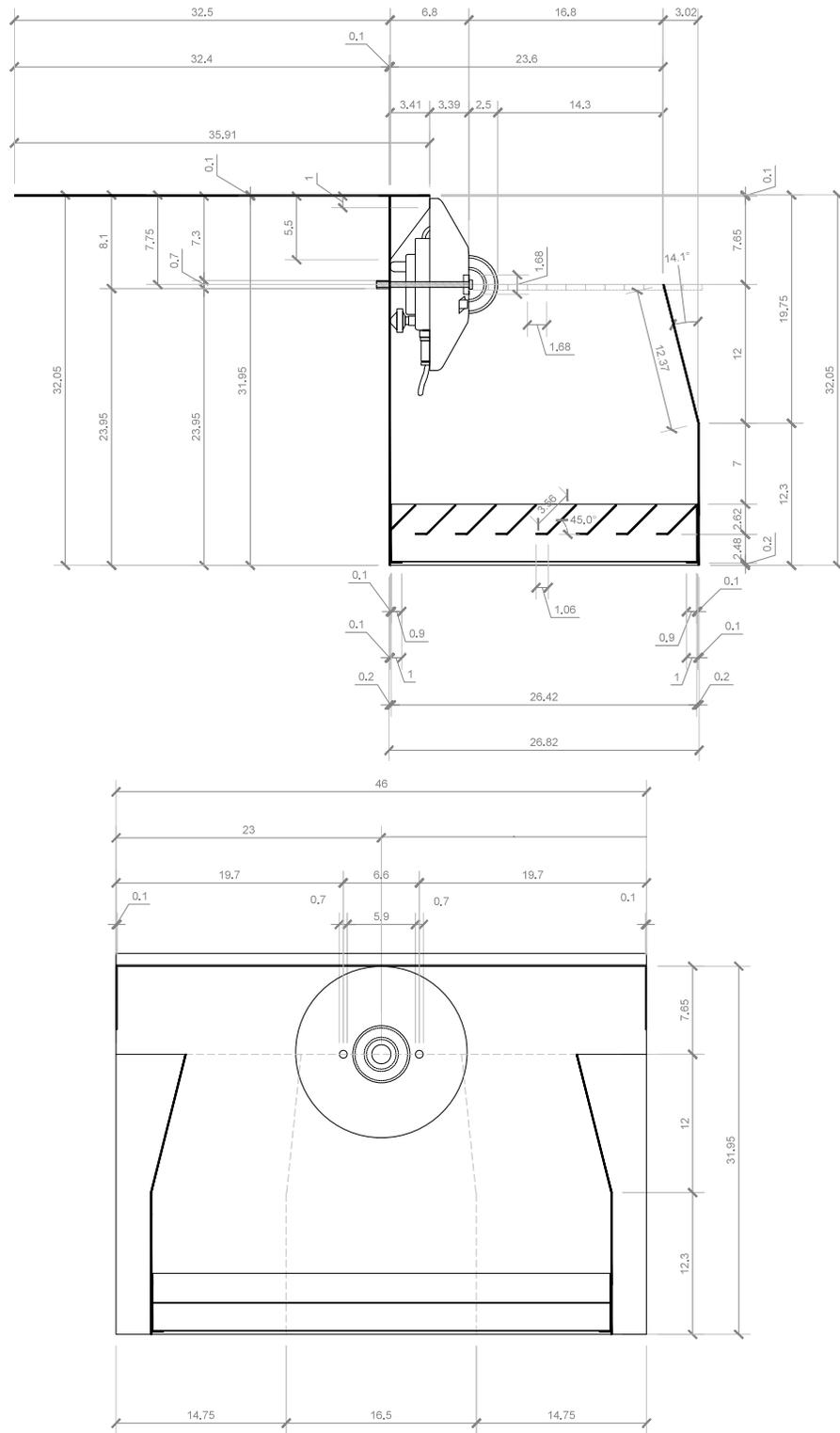


Figura A1.14: Cortes de la base vertical para piranómetros, medidas en centímetros.

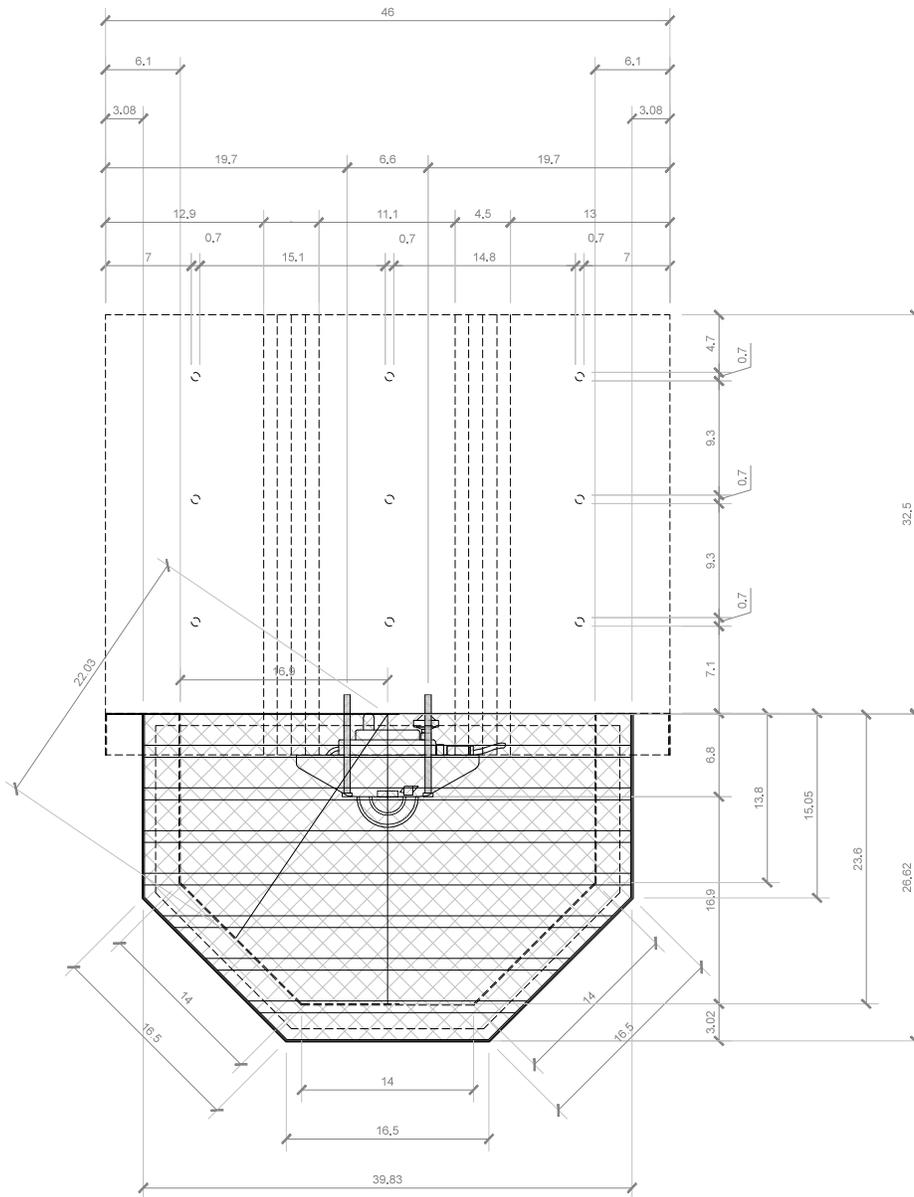


Figura A1.15: Planta de la base vertical para piranómetros, medidas en centímetros.

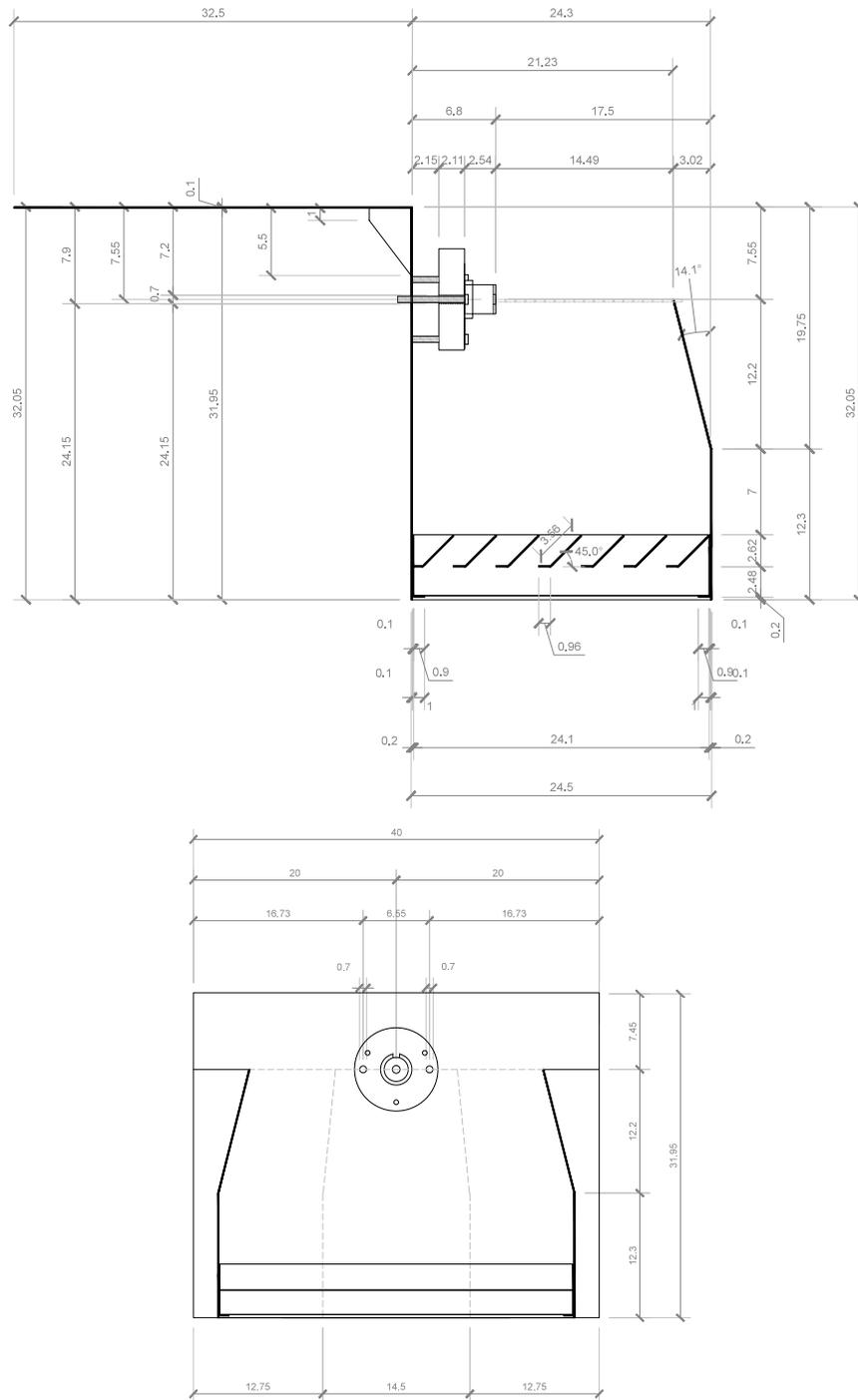


Figura A1.16: Cortes de la base vertical para fotómetros, medidas en centímetros.

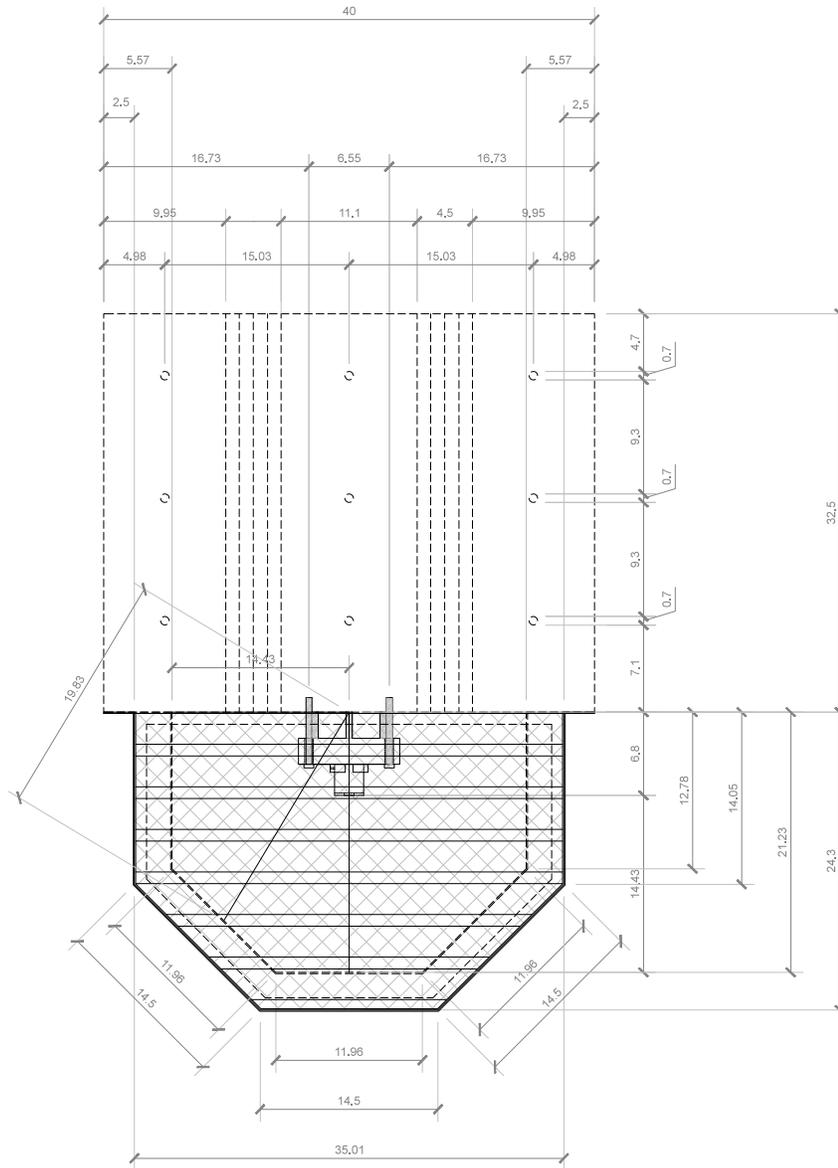


Figura A1.17: Planta de la base vertical para fotómetros, medidas en centímetros.