

***“ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN PAR EN LA MESA
DEL NORTE DE MÉXICO, DESARROLLO Y
VALIDACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

***DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA***

PRESENTA:

M.C. MOISÉS MIGUEL ANGEL NORIEGA GARDEA

**DIRECTOR DE LA TESIS:
*DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ***

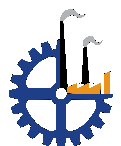
CHIHUAHUA, CHIH., SEPTIEMBRE 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO





Chihuahua, Chih., 28 de agosto de 2023

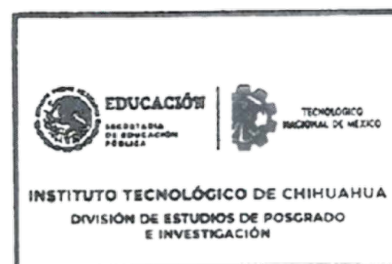
**MOISÉS MIGUEL ÁNGEL NORIEGA GARDEA
PRESENTE**

En cumplimiento con los requerimientos para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica y a propuesta de su Comité Tutorial, la División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede la autorización para imprimir la tesis titulada **"Estimación de la radiación PAR en la Mesa del Norte de México, desarrollo y validación de modelos empíricos"**, dirigida por el Dr. Luis Francisco Corral Martínez con el siguiente contenido de capítulos:

- I Antecedentes
- II Marco teórico
- III Modelos elegidos para estimar la radiación PAR en la Mesa del Norte
- IV Análisis trimestral de las estimaciones de radiación PAR
- V Desarrollo de los modelos de estimación de radiación PAR propuestos
- VI Desarrollo de modelos físicos y validación de los modelos propuestos
- VII Simplificación de los modelos propuestos
- VIII Conclusiones
- Referencias
- Anexo

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"La técnica por el Engrandecimiento de México"

ROGELIO ENRIQUEZ BARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Chihuahua, Chih., 23 de agosto de 2023

ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

En cumplimiento con los requerimientos para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le notificamos que el documento de tesis del alumno **MOISÉS MIGUEL ÁNGEL NORIEGA GARDEA** titulado **"Estimación de la radiación PAR en la Mesa del Norte de México, desarrollo y validación de modelos empíricos"**, dirigido por el Dr. Luis Francisco Corral Martínez, ha sido aprobado y aceptado para su impresión.

Por lo anterior, proponemos le sea concedida la autorización de impresión correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, quedamos de usted:

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"La técnica por el Engrandecimiento de México"



DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ
DIRECTOR DE TESIS



DR. ALEJANDRO TÉLLEZ QUIÑONES
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL



DR. GERARDO TRUJILLO SCHIAFFINO
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL

Juan Ramírez
DR. JUAN ALBERTO RAMÍREZ QUINTANA
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL



DR. MARCELINO ANGUIANO MORALES
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL





CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Chihuahua el día 28 de agosto de 2023, la que suscribe, MOISÉS MIGUEL ÁNGEL NORIEGA GARDEA con número de control D19060652, del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de el Dr. Luis Francisco Corral Martínez y cede los derechos del trabajo titulado **"Estimación de la radiación PAR en la Mesa del Norte de México, desarrollo y validación de modelos empíricos"**, al Tecnológico Nacional de México y/o Instituto Tecnológico de Chihuahua para su difusión, divulgación, transmisión, reproducción, así como su digitalización con fines académicos y de investigación.

Moisés Noriega

MOISÉS MIGUEL ÁNGEL NORIEGA GARDEA





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

En la ciudad de Chihuahua el día 28 de agosto de 2023, la que suscribe, MOISÉS MIGUEL ÁNGEL NORIEGA GARDEA con número de control D19060652, del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta ser autor intelectual del presente trabajo de Tesis titulado **"Estimación de la radiación PAR en la Mesa del Norte de México, desarrollo y validación de modelos empíricos"**, bajo la dirección de el Dr. Luis Francisco Corral Martínez; y manifiesta que el contenido es original y que las fuentes de información consultadas para su fundamentación están debidamente citadas y referenciadas.

Moisés Noriega

MOISÉS MIGUEL ÁNGEL NORIEGA GARDEA



Chihuahua, Chihuahua, a 01 de septiembre de 2023

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces
Directora de CONAHCYT.

Sirva la presente para saludarla e informarle que a la fecha he obtenido el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, motivo por el cual agradezco todo el apoyo brindado por este Consejo que usted representa, con el otorgamiento de una beca que permitió dedicarme de manera exclusiva a la realización de mis estudios de posgrado y de esta manera lograr el objetivo establecido.

Sin otro particular quedo a sus órdenes, no sin antes reiterar mi agradecimiento.

A t e n t a m e n t e

A handwritten signature in blue ink that reads "Moisés Noriega". The signature is written in a cursive, slightly slanted style. Below the signature is a horizontal line.

Moisés Miguel Angel Noriega Gardea

*"El paso más importante que puede dar alguien. No es el primero,
¿verdad? Es el próximo. Siempre el próximo paso"*

Dalinar Kholin, Juramentada

Brandon Sanderson

AGRADECIMIENTOS

Primero, a mis papás Bertha y Francisco por guiarme con su amor y apoyo. Sus consejos y sabiduría invaluable han sido fundamentales en mi crecimiento personal y académico. Mi éxito es su éxito, y cada logro que obtenga en el futuro estará marcado con el amor y los valores que me han inculcado.

A mis hermanos Jesús y Margarita, aunque no platicamos mucho sé que siempre tengo su apoyo incondicional.

Al Dr. Luis Francisco Corral Martínez, gracias por la confianza que depositó en mí desde el inicio de este proyecto, por su guía, apoyo y consejos en cada asesoría. Además de ser un excelente director, ha sido un mentor ejemplar. Sus consejos me han motivado a esforzarme por lograr un trabajo de calidad y relevancia.

A los miembros del comité tutorial: Dr. Alejandro Téllez Quiñones, Dr. Juan Alberto Ramírez Quintana, Gerardo Trujillo Schiaffino y Dr. Marcelino Anguiano Morales, que dedicaron su tiempo y experiencia para guiar y enriquecer esta tesis.

A la Mtra. Alma Delia Corral Sáenz, por su amabilidad y por siempre estar dispuesta a resolver cualquier duda referente a lo administrativo desde que ingresé a la maestría.

A mis compañeros: Edgar y Erick, gracias por su amistad y por todas las pláticas académicas y extra académicas, hicieron que estos años fueran muy llevaderos, sobre todo después de la pandemia. Salvador, gracias por esa amistad forjada en tan poco tiempo. Gracias también a mis demás compañeros: Misael, Nadia, Daniel Vargas, Daniel Morales, Francisco (Kikín), Luis, Carlos, Santiago, Gerardo, José (Macias), Eduardo y Miguel Ángel.

Finalmente, al Dr. Abimael Guzmán Pando, gracias por tu apoyo, y sobre todo por tu amistad a lo largo de todos los años que llevamos de conocernos.

RESUMEN

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN PAR EN LA MESA DEL NORTE DE MÉXICO, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS

M. C. Moisés Miguel Angel Noriega Gardea
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación del
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2023
Director de Tesis: Dr. Luis Francisco Corral Martínez

La radiación fotosintéticamente activa (*Photosynthetically Active Radiation*, PAR), es la radiación comprendida entre los 400 y 700 nanómetros del espectro electromagnético capaz de producir actividad fotosintética en ciertos organismos como plantas y algas, por lo que su estudio es de vital importancia en diferentes áreas como la agricultura e hidrología.

A pesar de su importancia, aún no existe una red mundial para su medición, pero se cuenta con diferentes técnicas para su estimación, siendo la más utilizada aquella donde se desarrollan modelos empíricos basados en información obtenida de estaciones meteorológicas locales.

El presente trabajo tiene como objetivo validar los modelos empíricos de la literatura más aptos para estimar y estudiar el comportamiento de la radiación PAR dentro de la Mesa del Norte de México, región con clima árido y semiárido con gran actividad agrícola, además del desarrollo de modelos de estimación propios basados en la información recopilada de diferentes estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la zona de estudio.

Se muestra la selección de modelos que se utilizaron para observar el comportamiento de la radiación PAR del 1 de abril del 2020 al 30 de junio del 2021 dentro de la Mesa del Norte. Se muestra también el desarrollo de los modelos basados en la información recolectada en cada estación meteorológica resultando en ecuaciones de tercer grado, así como su posterior validación.

A partir de los modelos particulares para cada estación se desarrolló también un modelo general de estimación para utilizarse de manera indistinta dentro de la Mesa del Norte. Los

modelos desarrollados fueron reducidos de ecuaciones de tercer grado a ecuaciones de primer grado. También se describe el desarrollo de dos modelos basados en mediciones de radiación PAR realizadas con sensores cuánticos en las estaciones denominadas Chihuahua ob. y Durango.

Los resultados del comportamiento anual de la radiación PAR muestran que los valores más altos se tienen en los meses de verano y los más bajos en los meses de invierno, alrededor de mediodía, como lo demuestran los datos de la estación Zacatecas 2, donde el valor máximo de radiación PAR (Q_p) a mediodía tuvo un valor de $2719.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y en invierno de $1131.82 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

Los resultados de la validación de los modelos de tercer grado indicaron ser confiables al estimar la radiación PAR, al tener un error cuadrático medio (RMSE) promedio de $7.87 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, mientras que el modelo general tuvo un RMSE promedio de $10.85 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Los resultados de los modelos de primer grado mostraron que el uso de modelos más simples para estimar la radiación PAR dentro de la Mesa del Norte también es viable, al tener un RMSE promedio de $8.34 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y el modelo general un RMSE promedio de $6.97 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Los modelos basados en mediciones del sensor cuántico mostraron un RMSE de $23.91 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ en la estación Chihuahua Ob. y $26.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ para la estación Durango.

Lo anterior muestra que a pesar de tener un RMSE mayor al de los modelos teóricos, los modelos prácticos también son confiables para estimar la radiación PAR al tener un RMSE menor a $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

ABSTRACT

Photosynthetically Active Radiation (PAR) is the radiation between 400 and 700 nanometers of the electromagnetic spectrum capable of producing photosynthetic activity in certain organisms such as plants and algae, so its study is of vital importance in different areas such as agriculture and hydrology.

Despite its importance, there is still no worldwide network for its measurement, so there are different techniques for its estimation, being the most used the one where empirical models are developed based on information obtained from local meteorological stations.

The objective of this work is to validate the empirical models in the literature most suitable for estimating and studying the behavior of PAR within the Mexican Northern Plateau, a region with arid and semi-arid climate and high agricultural activity, in addition to the development of different own estimation models based on the information collected from different meteorological stations distributed within the study area.

The selection of models used to observe the behavior of PAR between April 1, 2020 and June 30, 2021 within the Mexican Northern Plateau is shown. The development of the models based on the information collected at each meteorological station resulting in third-degree equations is also shown, as well as their subsequent validation.

A general estimation model was also developed from the particular models for each station to be used indistinctly within the Mexican Northern Plateau. The developed models were simplified to reduce them from third-degree equations to first-degree equations. The development of two models based on PAR measurements made with quantum sensors at the stations called Chihuahua ob. and Durango is also described.

The results of the annual behavior of PAR show that the highest values are found in the summer months and the lowest in the winter months around noon as shown by the results of the Zacatecas 2 station where the maximum value of PAR (Q_p) at noon had a value of 2719.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ and in winter of 1131.82 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

The results of the validation of the third-degree models showed that they are reliable for estimating PAR by having an average root mean square error (RMSE) of $7.87 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, while the general model had an average RMSE of $10.85 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. The results of the first-degree models showed that the use of simpler models to estimate PAR within the Mexican Northern Plateau is also reliable by having an average RMSE of $8.34 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ and the general model an average RMSE of $6.97 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. The results of the models based on quantum sensor measurements showed an RMSE of $23.91 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ at the Chihuahua Ob. station and $26.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ for the Durango station.

The above shows that despite of having a higher RMSE than the theoretical models, the practical models are also reliable for estimating PAR, since they have an RMSE less than $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABLAS.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	xix
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Radiación Fotosintéticamente Activa.....	1
1.2 Historia de medición de la radiación PAR.....	1
1.3 Instrumentos utilizados para la medición de la radiación PAR.....	4
1.4 Técnicas para la estimación de la radiación PAR.....	4
1.4.1 Estimación mediante satélites orbitales.....	4
1.4.2 Estimación mediante el uso de redes neuronales.....	5
1.4.3 Estimación mediante el desarrollo de modelos empíricos.....	5
1.5 Trabajos destacados en la literatura.....	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Radiometría.....	11
2.1.1 Energía radiante Q_e	12
2.1.2 Flujo radiante Φ_e	12
2.1.3 Intensidad radiante I_e	13
2.1.4 Irradiancia E_e	13
2.1.5 Radiancia L_e	13
2.2 Fotometría.....	13
2.3 Función luminosa espectral o curva de respuesta espectral del ojo humano.....	14
2.4 Parámetros utilizados para el desarrollo de los modelos empíricos.....	15
2.5 Instrumentos utilizados para medir la radiación emitida por una fuente de radiación.....	16
2.6 Sensores cuánticos.....	18
2.6.1 Sensor cuántico LI-190R.....	20
2.6.2 Sensor cuántico Apogee SQ-500.....	21
2.7 Arduino.....	22
2.8 Mesa del Norte de México.....	24
2.8.1 Superficie de los estados que conforman la Mesa del Norte de México.....	25
2.8.2 Clima de la Mesa del Norte de México.....	26
2.8.3 Flora de la Mesa del Norte de México.....	27
2.9 Estaciones meteorológicas automáticas y sinápticas.....	28
CAPÍTULO III. MODELOS ELEGIDOS PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN PAR EN LA MESA DEL NORTE.....	31
3.1 Búsqueda de información meteorológica en México.....	31
3.2 Búsqueda y selección de los modelos empíricos existentes en la literatura.....	33

3.3 Cálculo de los parámetros utilizados para la estimación de Q_p	34
3.3.1 Ángulo de elevación solar (θ) y ángulo cenital solar (θ).....	34
3.3.2 Temperatura de punto de rocío.....	37
3.3.3 Índice de claridad del cielo.....	38
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS TRIMESTRAL DE LAS ESTIMACIONES DE RADIACIÓN PAR.....	39
4.1 Selección de estaciones meteorológicas para trimestre de prueba.....	39
4.2 Procesamiento de la información meteorológica para estimar la radiación PAR.....	40
4.3 Obtención de los valores máximos de radiación y de Q_p/R_s diarios.....	42
4.4 Mediciones físicas de radiación PAR para el trimestre de prueba.....	44
4.5 Selección de estaciones meteorológicas para el periodo completo de mediciones.....	45
4.6 Análisis de la radiación durante el trimestre abril – junio del 2020.....	48
4.7 Análisis de la radiación durante el trimestre julio – septiembre del 2020.....	49
4.8 Análisis de la radiación durante el trimestre octubre – diciembre del 2020.....	50
4.9 Análisis de la radiación durante el trimestre enero – marzo del 2021.....	52
4.10 Análisis de la radiación durante el trimestre abril – junio del 2021.....	53
4.11 Análisis general de los parámetros estudiados durante el periodo de mediciones.....	55
4.11.1 Análisis de R_s a mediodía.....	55
4.11.2 Análisis de Q_p a mediodía.....	58
4.11.3 Análisis de Q_p/R_s a mediodía.....	60
4.11.4 Análisis de Q_p diaria mensual.....	61
CAPÍTULO V. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN PAR PROPUESTOS.....	64
5.1 Clasificación de los modelos de la literatura según su rendimiento.....	64
5.2 Desarrollo de los modelos particulares de estimación.....	65
5.3 Desarrollo del modelo general de estimación.....	71
CAPÍTULO VI. DESARROLLO DE MODELOS FÍSICOS Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS.....	76
6.1 Mediciones físicas de radiación PAR en la estación Durango.....	76
6.2 Análisis de la información obtenida y desarrollo de un modelo para la estación Durango.....	78
6.3 Mediciones físicas de radiación PAR en la estación Chihuahua ob.....	81
6.4 Análisis de la información obtenida y desarrollo de un modelo para la estación Chihuahua ob.....	82
6.5 Validación de los modelos desarrollados en la Mesa del Norte de México.....	84
CAPÍTULO VII. SIMPLIFICACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS.....	89
7.1 Desarrollo de los modelos utilizando ecuaciones de primer grado.....	89
7.2 Desarrollo del modelo general de estimación de primer grado.....	92
7.3 Validación de los modelos desarrollados de primer grado.....	94
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES.....	101
REFERENCIAS.....	104
ANEXOS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Espectro electromagnético y sus diferentes secciones en frecuencia y longitud de onda.....	11
Figura 2.2	Parámetros radiométricos/fotométricos, a) Flujo radiante/luminoso, b) Intensidad radiante/luminosa, c) Irradiancia/iluminancia, d) Luminancia/radiancia.....	14
Figura 2.3	Función luminosa espectral para el estándar de 1924 de la CIE [11].....	15
Figura 2.4	Diferentes formas de medir un mismo espectro de radiación.....	17
Figura 2.5	Curva de respuesta cuántica espectral.....	20
Figura 2.6	Sensor cuántico LI-190R.....	21
Figura 2.7	Sensor cuántico SQ-500.....	22
Figura 2.8	Tablilla Arduino MEGA 2560.....	23
Figura 2.9	Mesa del Norte de México.....	25
Figura 2.10	Estación Meteorológica Automática (EMA).....	29
Figura 2.11	Estación Sinóptica Meteorológica Automática (ESMA).....	30
Figura 3.1	Estaciones meteorológicas pertenecientes a la CONAGUA.....	32
Figura 3.2	Información de una estación meteorológica previa a descarga de datos.....	32
Figura 3.3	Ángulos en la trayectoria del Sol.....	35
Figura 3.4	Ejemplo de coordenadas geográficas de una estación meteorológica.....	35
Figura 3.5	Interfaz del sitio web SunEarthTools para la medición del ángulo de elevación solar.....	36
Figura 3.6	Ejemplo de cálculo de la temperatura de punto de rocío.....	37
Figura 4.1	Ubicación de las estaciones seleccionadas para el periodo de prueba.....	40
Figura 4.2	Distribución de las estaciones seleccionadas en la Mesa del Norte de México.....	47
Figura 4.3	Comportamiento de la radiación solar en la estación Zacatecas 2.....	56
Figura 4.4	Comportamiento de la radiación solar en la estación Gogorrón.....	56
Figura 4.5	Visualización del comportamiento cíclico de la radiación solar en la estación Chihuahua ob.....	57
Figura 4.6	Promedio anual de la radiación solar en cada estación, se muestra también el promedio general de todas las estaciones.....	58
Figura 4.7	Q_p anual a mediodía para la estación Zacatecas 2.....	59
Figura 4.8	Q_p anual a mediodía para la estación Gogorrón.....	59
Figura 4.9	Comportamiento anual de Q_p/R_s para la estación Zacatecas 2 con el Modelo 2.....	60
Figura 4.10	Comportamiento anual de Q_p/R_s para la estación Ocampo con el Modelo 5.....	61

Figura 4.11	Comportamiento anual de Q_p diaria mensual para la estación Nueva Rosita con el Modelo 6.....	62
Figura 4.12	Comportamiento anual de Q_p diaria mensual para la estación El Diente con el Modelo 3..	63
Figura 5.1	Q_p como función del coseno del ángulo cenital solar de acuerdo con los cálculos comprendidos entre abril del 2020 y marzo del 2021 en la estación Chihuahua ob.....	66
Figura 5.2	Q_p como función del coseno del ángulo cenital solar de acuerdo con los resultados obtenidos por Hu & Wang [23].....	66
Figura 5.3	Q_p máxima (Q'_p) como función del índice de claridad (k_t) en la estación Chihuahua ob.....	67
Figura 6.1	Sensor LI-190R.....	76
Figura 6.2	Esquema de la conexión realizada para el registrador de datos.....	77
Figura 6.3	Distancia aproximada entre la estación meteorológica y el sitio de mediciones de radiación PAR.....	77
Figura 6.4	Comparación de los diferentes modelos en la estación Durango en diciembre del 2021....	78
Figura 6.5	Rendimiento del modelo desarrollado para la estación Durango en diciembre del 2021....	79
Figura 6.6	Ecuación de ajuste entre Q_p y R_s en la estación Durango el 28 de diciembre del 2021.....	80
Figura 6.7	Comparación de los diferentes modelos en la estación Durango en diciembre del 2021....	80
Figura 6.8	Distancia aproximada entre la estación Chihuahua ob. y el sitio de mediciones de radiación PAR.....	81
Figura 6.9	Sensor cuántico y datalogger marca Apogee.....	82
Figura 6.10	Comparación de los diferentes modelos en la estación Chihuahua ob. entre el 09 de junio y el 08 de agosto del 2022.....	82
Figura 6.11	Rendimiento del modelo desarrollado en la estación Chihuahua ob. entre el 09 de junio y el 08 de agosto del 2022.....	83
Figura 7.1	Q'_p como función de k_t en la estación Cuauhtémoc utilizando una ecuación de ajuste de tercer grado.....	89
Figura 7.2	Q'_p como función de k_t en la estación Cuauhtémoc utilizando una ecuación de ajuste de primer grado.....	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Regiones del espectro electromagnético de acuerdo con la CIE [11].....	12
Tabla 2.2	Comparación de parámetros de radiación.....	18
Tabla 2.3	Características técnicas del Arduino MEGA 2560.....	24
Tabla 2.4	Superficies de los estados pertenecientes a la Mesa del Norte de México.....	26
Tabla 2.5	Climas de cada estado de la Mesa del Norte de México (en porcentajes).....	26
Tabla 2.6	Temperatura promedio en cada estado de la Mesa del Norte de México.....	27
Tabla 4.1	Información de las estaciones seleccionadas para el periodo de prueba.....	40
Tabla 4.2	Ejemplo de registro de datos con la información originalmente obtenida. a) Parte uno del encabezado del registro, b) Parte dos del encabezado del registro.....	41
Tabla 4.3	Registro de datos después de eliminar los parámetros no utilizados.....	41
Tabla 4.4	Registro de datos con los parámetros utilizados para estimar la radiación PAR.....	42
Tabla 4.5	Registro de datos con las estimaciones de la radiación PAR calculadas con los seis modelos seleccionados.....	42
Tabla 4.6	Ejemplo con los valores máximos diarios de radiación PAR extraídos del registro de datos.....	43
Tabla 4.7	Ejemplo del cálculo de la relación Q_p/R_s máxima a mediodía.....	43
Tabla 4.8	Comportamiento trimestral de Q_p máxima diaria	44
Tabla 4.9	Comportamiento trimestral de Q_p/R_s máxima diaria.....	44
Tabla 4.10	Comparación entre estimaciones y mediciones físicas de radiación PAR el 29 de junio del 2020 (los resultados están dados en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	45
Tabla 4.11	Información geográfica de las estaciones seleccionadas en la Mesa del Norte de México..	46
Tabla 5.1	Comparación del rendimiento de los modelos contra las mediciones del sensor cuántico en la estación Chihuahua ob.....	64
Tabla 5.2	Modelos de estimación de radiación PAR desarrollados en las 25 estaciones de la Mesa del Norte.....	68
Tabla 5.3	RMSE y error relativo de las estimaciones de radiación PAR con cada modelo desarrollado.....	70
Tabla 5.4	Términos de las ecuaciones de cada modelo particular.....	71
Tabla 5.5	Términos de las ecuaciones los 22 modelos particulares restantes.....	72
Tabla 5.6	Promedio y desviación estándar de cada columna de términos.....	73
Tabla 5.7	Comparación del RMSE entre el modelo general y los modelos particulares.....	74
Tabla 6.1	Comparación del RMSE obtenido con los diferentes modelos entre el 09 de junio y el 08 de agosto del 2022.....	84
Tabla 6.2	RMSE obtenido con los modelos desarrollados en el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	85
Tabla 6.3	RMSE obtenido con el modelo general y comparación con los modelos particulares (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	87

Tabla 7.1	Modelos de estimación de radiación PAR desarrollados en las 25 estaciones de la Mesa del Norte utilizando ecuaciones de primer grado.....	90
Tabla 7.2	Comparación del RMSE (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) obtenido con los modelos de 3er y 1er grado durante el año completo de mediciones.....	92
Tabla 7.3	Comparación del RMSE entre el modelo general y los modelos particulares durante el año completo de mediciones (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	93
Tabla 7.4	RMSE obtenido en el trimestre de validación con los modelos desarrollados (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	95
Tabla 7.5	Comparación del RMSE (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) obtenido con los modelos de 3er y 1er grado durante el trimestre de validación.....	96
Tabla 7.6	RMSE obtenido con el modelo general y comparación con los modelos particulares en el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	97
Tabla 7.7	Comparación del RMSE obtenido con el modelo general de 3er y 1er grado durante el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).....	98

INTRODUCCIÓN

Existen varios modelos para estimar la radiación fotosintéticamente activa en distintas regiones del mundo bajo diferentes condiciones meteorológicas. Pese a depender de las condiciones meteorológicas locales, los modelos desarrollados pueden ser trasladados a otras regiones con características similares.

Aunque hay un gran número de modelos para estimar la radiación PAR en diferentes partes del mundo, ninguno de ellos es desarrollado dentro del territorio mexicano, específicamente en el área de la Mesa del Norte. Por ello, si se quiere estudiar el comportamiento de la radiación PAR, se deben utilizar modelos desarrollados en áreas con condiciones meteorológicas similares a la Mesa del Norte.

Esta investigación tiene como fin el análisis de los modelos existentes más destacados y su implementación dentro de la zona mencionada, además de desarrollar modelos de estimación propios basados en información recopilada en estaciones meteorológicas locales.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de 25 modelos de estimación de radiación PAR basado en el estudio de su comportamiento con seis modelos de la literatura en el periodo de un año. La tesis se divide en ocho capítulos, que son descritos brevemente a continuación:

El capítulo I define la radiación fotosintéticamente activa (PAR), su historia y las técnicas destacadas en la literatura utilizadas para estimarla. También se mencionan algunos trabajos relevantes referentes al desarrollo de modelos empíricos para estimar la radiación PAR.

El capítulo II muestra el marco teórico necesario para comprender el desarrollo del trabajo descrito en el presente documento.

El capítulo III muestra la descripción de la base de datos de estaciones meteorológicas utilizadas para el desarrollo de este trabajo y la selección de modelos previamente existentes capaces de ser utilizados dentro de la Mesa del Norte para estimar la radiación PAR.

El capítulo IV muestra el análisis del comportamiento de la radiación PAR a lo largo de todo un año de mediciones, utilizando la información obtenida de las 25 estaciones seleccionadas dentro de la Mesa del Norte de México.

El capítulo V muestra el desarrollo de modelos de estimación de radiación PAR propuestos basándose en la información meteorológica obtenida a lo largo del año.

El capítulo VI muestra la validación de los modelos propuestos utilizando información meteorológica independiente a la utilizada para su desarrollo.

El capítulo VII muestra la simplificación de los modelos de tercer grado a primer grado, así como su validación.

En el capítulo VIII se exponen las conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo del trabajo, además de una breve propuesta del trabajo a futuro que se puede realizar.

I. ANTECEDENTES

En este capítulo se define la radiación fotosintéticamente activa (PAR), se indican los primeros autores que la estudiaron, los sensores y diferentes técnicas para medirla, así como algunas publicaciones destacadas en la literatura relativas a su estudio y medición.

1.1 Radiación Fotosintéticamente Activa

La mayor parte de la energía que es aprovechada en la Tierra se deriva de manera directa o indirecta de la radiación proveniente del Sol. La fracción de la radiación solar aprovechada por organismos como plantas y algas para llevar a cabo la fotosíntesis es conocida como radiación fotosintéticamente activa o PAR por sus siglas en inglés (*Photosynthetically Active Radiation*).

La radiación PAR se ubica dentro del rango visible del espectro electromagnético (400 – 700 nanómetros) [1] y puede ser definida en términos de densidad de flujo de energía (W/m^2) o en términos de densidad de flujo de fotones fotosintéticos, que es el número de fotones incidentes por unidad de tiempo por unidad de área ($\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$). Este término es ampliamente utilizado en la literatura y es abreviado como Q_p [2 – 4].

La radiación PAR juega un papel importante en diversos fenómenos de la naturaleza, ya que constituye la fuente de energía principal para la biomasa al controlar la tasa fotosintética de los organismos en la tierra, afectando así el crecimiento de las plantas. Es indispensable en una gran cantidad de estudios agrícolas e hidrológicos y en la evaluación de modelos ecofisiológicos y el ciclo de carbono en los ecosistemas terrestres, así como en la investigación del sistema climático de la Tierra y el cambio climático.

A pesar de su importancia, aún no se ha establecido una red mundial para la medición de la radiación PAR y solo unos pocos sitios de observación alrededor del mundo lo hacen, por lo que la información de la radiación PAR medida no está disponible para diversas aplicaciones [4 – 7].

1.2 Historia de medición de la radiación PAR

En las décadas de 1940 y 1950 diferentes autores dedicaron trabajos al estudio de la eficiencia de la conversión de energía radiante a química durante la fotosíntesis; sin embargo, en dichos trabajos no se hablaba explícitamente del término “radiación fotosintéticamente

activa” [8, 9], sino hasta la segunda mitad de la década de 1960 cuando el término comenzó a ser utilizado con mayor formalidad.

K. J. McCree fue uno de los primeros autores en estudiar la radiación PAR de una manera más formal. Este autor terminó de acentuar las bases para la definición estándar de la radiación PAR que se sigue utilizando hasta el presente. Por ello, en un gran número de estudios publicados hasta el día de hoy es común que los autores citen a McCree como una de las principales fuentes de información.

Uno de los primeros trabajos donde se ve involucrado McCree data del año 1966 [10] y consistió en la modificación de un solarímetro (piranómetro) común para poder utilizarlo como medidor de radiación PAR. Dicho estudio se llevó a cabo debido a que, en aquella época, a pesar de la existencia de instrumentos de medición de radiación, los mismos estaban diseñados con propósitos diferentes a la medición de la radiación PAR, como el luxómetro, utilizado para conocer las condiciones de iluminación de un lugar determinado.

Estos instrumentos tenían también diferentes respuestas espectrales y estaban calibrados en una variedad de unidades diferentes, por lo que las estimaciones de la radiación PAR obtenidas con dichos instrumentos no resultaban precisas. Debido a esto, en aquella época era necesaria una racionalización de los instrumentos de medición y de sus unidades para ser utilizada en los trabajos dedicados al estudio y medición de la radiación PAR.

El objetivo principal del trabajo de McCree en 1966 fue obtener una curva de respuesta estándar para las plantas verdes, similar a la curva de respuesta estándar del observador humano promedio, estandarizada en 1924 por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) [11]. Para determinar el rango de longitudes de onda de respuesta del solarímetro, McCree se basó principalmente en los estudios publicados por Gaastra en 1959 [8] y por Nichiporovich en 1960 [9], en los cuales se estudió la fotosíntesis en plantas de cultivo. En los estudios mencionados se encontró que la respuesta energética de las plantas se limita a un rango de longitudes de onda con un límite bajo de 380 – 400 nanómetros y un límite alto de 700 – 710 nanómetros.

En el trabajo de McCree se habla también sobre la necesidad de adoptar una unidad estándar de medición de la radiación PAR. Gaastra y Nichiporovich utilizaron las unidades del CGS de

energía “erg/cm²/s 0.4-0.7 μ” y “gcal/cm²/min 0.38-0.71 μ” respectivamente, las cuales son unidades para medir energía radiante. Dado que el sistema MKS es más utilizado por la CIE, McCree utilizó el término “watt 0.4-0.7 μ”, que fue abreviado a “plantwatt” y los términos de irradiancia fueron llamados “plantwatt/m²”.

En cuanto al instrumento, se trata de un solarímetro común fabricado por Eppley Laboratory Inc., al que se le agregó un filtro fabricado en un hemisferio de vidrio para absorber el calor y eliminar el componente infrarrojo. Dicho hemisferio se fabricó utilizando un vidrio Chance ON20. Para registrar las lecturas, el instrumento utiliza un registrador potenciométrico de 5 mV. Este instrumento está diseñado para funcionar en fitotrón, mas no debajo o dentro de cultivos debido a su tamaño y a que es muy delicado para un instrumento de campo.

En 1971, McCree [2] llevó a cabo una serie de mediciones sobre 22 hojas de diferentes especies de plantas de cultivo con el objetivo de sentar una base para la definición de la radiación PAR. En las pruebas se consideró la especie, variedad, edad de la hoja, condiciones de crecimiento (campo o cámara de crecimiento), condiciones de prueba tales como temperatura, concentración de CO, flujo de radiación monocromática, u orientación de la hoja. En el estudio se encontró la misma forma básica en las curvas de respuesta de todas las plantas para las pruebas realizadas. Los resultados obtenidos estuvieron en concordancia con estudios realizados con anterioridad por Bjorkman, Bulley et al. y Baleigh y Biddulph [12 – 14].

El mismo McCree, en 1972 [1], llevó a cabo un estudio para probar las definiciones de radiación PAR usadas hasta ese momento, calculando las tasas fotosintéticas de una “hoja promedio” a partir del espectro de acción de la fotosíntesis con dos fuentes de iluminación naturales y siete artificiales. Los resultados indicaron que, para fuentes de iluminación blancas, la relación entre el flujo energético (W/m² = J/m²·s) y el flujo cuántico (μmol fotones/m²·s) mantiene un comportamiento constante (4.6±0.1 μmol/J), esto significa que los instrumentos calibrados en cualquiera de estas unidades pueden ser verificados entre sí. Por lo tanto, esta constante es utilizada de manera regular en la literatura para convertir las mediciones de radiación PAR que son realizadas por instrumentos radiométricos. Sin embargo, en este mismo

estudio se advierte que se pueden presentar errores fácilmente debido a las fuentes de iluminación, por lo que los resultados reportados deben ser utilizados con precaución.

1.3 Instrumentos utilizados para la medición de la radiación PAR

La única técnica existente para medir de manera directa la radiación PAR es mediante el uso de los instrumentos llamados sensores cuánticos. A pesar de que la radiación PAR puede ser estimada con el uso de otros instrumentos como los piranómetros y luxómetros, las estimaciones pueden conllevar errores debido a las constantes utilizadas para pasar de un tipo de unidades a otras, por lo que su uso debe hacerse con discreción.

Los sensores cuánticos son dispositivos electrónicos que basan su funcionamiento en un fotodiodo adecuado para tener una respuesta lineal en el rango de los 400 a 700 nanómetros con el fin de medir la radiación PAR. Regularmente, este tipo de sensores son de tamaño reducido para poder colocarse debajo del dosel arbóreo de las plantas. Como lo menciona McCree [10], estos instrumentos deben tener poca sensibilidad a los cambios de temperatura y deben tener corrección cosenoidal adecuada. En el capítulo dos de este trabajo se explica de manera detallada el funcionamiento y diseño de los sensores cuánticos.

1.4 Técnicas para la estimación de la radiación PAR

La única manera directa de medir la radiación PAR es utilizando sensores cuánticos. Debido a esto, se han desarrollado diferentes técnicas para su estimación prescindiendo del uso de dichos sensores; al ser métodos indirectos, se tiene una estimación, no una medición exacta.

En la literatura existen diversas técnicas para estimar la radiación PAR, dentro de las que se destacan tres: estimación a partir de la información derivada de satélites estacionarios u orbitales, desarrollo de modelos de estimación utilizando redes neuronales artificiales y la estimación a partir del desarrollo de modelos empíricos utilizando información de estaciones meteorológicas locales, siendo esta última la técnica más desarrollada en la literatura.

1.4.1 Estimación mediante satélites orbitales o estacionarios

Esta técnica utiliza la información meteorológica de productos derivados de satélites orbitales o estacionarios tales como el MODIS o el OMI/Aura para estimar la radiación PAR. A partir de los productos de dichos satélites se obtienen parámetros meteorológicos como la

columna total de ozono (O_z), la profundidad óptica del aerosol (AOD) o el índice de nubes (n), que se utilizan para desarrollar modelos semiempíricos en conjunto con la información recolectada de las estaciones meteorológicas dentro de las zonas de estudio [15].

Para validar los modelos se utiliza un conjunto de datos independiente al empleado para su desarrollo. Dichos datos se obtienen de la información arrojada por sensores cuánticos colocados en las estaciones meteorológicas dentro de la zona de estudio; también se compara el rendimiento de los modelos contra otros modelos existentes para observar su precisión [16].

1.4.2 Estimación mediante el uso de redes neuronales

Otra de las técnicas para estimar la radiación PAR consiste en desarrollar modelos de estimación utilizando redes neuronales artificiales (ANN). Para el desarrollo de los modelos regularmente se emplean redes neuronales artificiales de perceptrón de capas múltiples (MLP), ya que es el modelo más comúnmente utilizado para predicción de radiación, al no requerir de un algoritmo de resolución de problemas especificado por el usuario.

En la capa de entrada se utiliza la información meteorológica recopilada de las estaciones localizadas dentro del área de estudio, además de modelos previamente existentes. Entre los parámetros meteorológicos utilizados en la capa de entrada se emplea el ángulo de elevación solar, el índice de claridad del cielo y el brillo del tragaluz. Al igual que la técnica anterior, para validar los resultados obtenidos se utiliza las mediciones de radiación PAR tomadas con sensores cuánticos [17, 18].

1.4.3 Estimación mediante el desarrollo de modelos empíricos

La radiación PAR incidente en la superficie terrestre es una fracción del espectro de radiación emitido por el Sol, por lo que puede estimarse si se utiliza la relación Q_p/R_s , donde R_s es la radiación solar y Q_p es la densidad de flujo de fotones fotosintéticos. Debido a que no existe una red global para la medición de la radiación PAR, diversos investigadores han propuesto diferentes modelos de estimación.

Para el desarrollo de los modelos, se utiliza la información obtenida de la radiación solar y de diversos parámetros meteorológicos comúnmente observables y medibles durante un periodo de tiempo dado, que puede abarcar desde algunos meses hasta varias décadas. Entre

los parámetros utilizados para el desarrollo de los modelos se encuentra el índice de claridad del cielo (k_t) o el ángulo cenital solar (θ).

El objetivo de los modelos empíricos propuestos es estudiar y analizar el comportamiento de la radiación PAR en una base diaria, por hora o mensual bajo diferentes condiciones de cielo en lugares donde no es monitoreada con regularidad [19, 20], además de observar su comportamiento histórico para analizar las variaciones en sus características a lo largo de los años. Para validarlos, se utilizan sensores cuánticos que son colocados en las estaciones meteorológicas localizadas en los sitios de estudio, donde se recopila la información que se utiliza para el desarrollo de los modelos.

Luego de reunir y analizar la información de los parámetros observados en las estaciones meteorológicas, ésta es procesada y utilizada para el desarrollo de los modelos, que son regularmente de la forma $Q_p/R_s = P_1 + P_2 + \dots + P_n$, donde los términos P corresponden a los parámetros meteorológicos. Al comparar los resultados obtenidos en los diferentes trabajos en la literatura, se puede observar que la radiación PAR ocupa entre el 44% [20] y el 55% [21] de la radiación solar incidente, o lo que es lo mismo $0.44 \leq Q_p \leq 0.55$; este valor se ve afectado por los parámetros meteorológicos que varían a lo largo del año y la región geográfica.

Al no existir información confirmada sobre cuál combinación de parámetros es la más relevante para la estimación de la radiación PAR [18], para el desarrollo de los modelos se utilizan diferentes combinaciones de parámetros. Es por ello que en la literatura pueden encontrarse modelos tan simples que dependen únicamente de un parámetro, o modelos que dependen de cuatro o más. En la literatura es común encontrar trabajos donde la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (μmol) se ha convertido a flujo energético (J), utilizando la constante de conversión de McCree ($4.6 \pm 0.1 \mu\text{mol/J}$).

La variabilidad de los parámetros observados y medidos hace que sea difícil desarrollar y encontrar un modelo que sirva como base universal para estimar la radiación PAR en cualquier área geográfica. En todo caso, un mismo modelo podría ser aplicado en zonas geográficas que tengan condiciones climatológicas similares, es por ello que existe una amplia variedad de modelos según el lugar donde se vayan a utilizar.

Los estudios de este tipo se concentran principalmente en Asia y Europa. Dentro de los que corresponden al continente asiático, un gran número de ellos se desarrolla en China, mientras que los que competen a Europa se concentran en la cuenca mediterránea. En otras regiones del mundo los estudios sobre radiación PAR escasean en comparación a Asia y Europa, destacándose aquellos en áreas de Estados Unidos y la región amazónica de Brasil, así como los desarrollados en Nigeria.

1.5 Trabajos destacados en la literatura

Como se mencionó previamente, la técnica más utilizada para estimar la radiación PAR se lleva a cabo mediante el desarrollo de modelos que emplean la relación Q_p/R_s . Por ello, a continuación, se muestran algunos de los trabajos más destacados que utilizan dicha relación y que sirven como base para la presente investigación.

Uno de los primeros trabajos en destacarse, y que desde su publicación ha sido utilizado con regularidad como referencia por una gran variedad de autores, es el propuesto por Alados, Alados-Arboledas y Foyo-Moreno en 1996 [22]. En este, se utilizó la información meteorológica obtenida de una estación radiométrica en Almería, España para el desarrollo de diversos modelos de estimación de radiación PAR. Con los datos obtenidos se observaron y estudiaron las variaciones de la radiación PAR y la radiación solar, así como las variaciones en las condiciones del cielo durante el tiempo de desarrollo del proyecto. La base de datos utilizada para los modelos abarcó desde junio de 1990 hasta diciembre de 1992.

Con la información meteorológica recabada durante el tiempo de observación se desarrollaron cuatro modelos mediante un enfoque de regresión lineal múltiple, en donde se utilizan los parámetros ε (claridad del cielo), Δ (brillo del tragaluz), $\sin \beta$ (seno del ángulo de elevación solar) y T_d (temperatura de punto de rocío). Los cuatro modelos resultantes pueden ser utilizados en locaciones diferentes al lugar original de desarrollo, dependiendo de la información meteorológica disponible en cada sitio donde se deseen implementar.

En 2017 los mismos autores propusieron un nuevo modelo que se destaca sobre los demás existentes en la literatura debido a su simpleza, ya que depende únicamente de dos parámetros: el ángulo cenital solar y el índice de claridad del cielo. Para su desarrollo se llevaron a cabo

mediciones experimentales en Granada, España durante los años 2014 y 2015. Como los parámetros del modelo pueden calcularse a partir de la información observada en las estaciones meteorológicas locales, es posible utilizar el modelo en cualquier lugar donde dichos parámetros sean observables [19].

Dado que el modelo propuesto se desarrolló para ser utilizado bajo cualquier condición de cielo, el mismo fue validado utilizando información de cinco estaciones meteorológicas localizadas en el hemisferio norte y sur; las estaciones utilizadas se localizan en España, Japón y Argentina, lo que garantiza que se tengan diferentes características climatológicas para la validación del modelo. Los resultados de estimación con el modelo arrojaron un MBE menor al 1% y un RMSE menor al 6%, lo que muestra la efectividad del modelo para su aplicabilidad bajo cualquier condición de clima.

Hablando de trabajos realizados en sitios con condiciones climatológicas similares a la Mesa del Norte de México (clima árido y semiárido), uno de los primeros trabajos a destacar es el publicado por Bo Hu y Yuesi Wang en 2012, en el que se desarrolló un modelo para estimar la radiación PAR utilizando información meteorológica de una estación ubicada en Linze, condado ubicado al norte de China caracterizado por tener clima árido. Para el desarrollo del modelo se utilizaron las mediciones obtenidas entre enero del 2005 y diciembre del 2010. Además de Linze, se obtuvo también la información meteorológica de otras ocho regiones de China con clima árido y semiárido en el mismo periodo de tiempo para validar el modelo.

El modelo resultante utiliza únicamente el ángulo cenital y el índice de claridad y fue diseñado para poder implementarse en cualquier tipo de condición climatológica. Los resultados obtenidos mostraron que se tienen valores ligeramente más altos en las regiones áridas en comparación a las semiáridas. Los datos resultantes en la validación del modelo mostraron que puede ser utilizado para estimar de manera precisa la radiación PAR [23].

En 2013, los mismos autores desarrollaron tres modelos a partir del análisis de la relación entre la radiación solar y la radiación PAR. Los modelos propuestos incluyen parámetros basados en mediciones de radiación solar realizadas en los sitios de estudio, además de parámetros obtenidos a partir de la información meteorológica recabada de las estaciones

locales. De los tres modelos desarrollados el de menor complejidad matemática es el primero, ya que únicamente utiliza la radiación solar, por lo que puede implementarse en cualquier sitio donde dicho parámetro sea medido.

Para el desarrollo del modelo se utilizó la información de tres sitios de observación en el noreste de China. Dichos sitios se localizan en áreas remotas para representar condiciones generales regionales. La información meteorológica obtenida del 2005 al 2011 fue utilizada para analizar las propiedades de la radiación PAR en el noreste de China. Específicamente, el modelo se desarrolló con los datos obtenidos entre enero del 2005 y diciembre del 2007 y se validó con la información recolectada entre enero del 2008 y diciembre del 2011.

La información adquirida demostró que el modelo provee resultados favorables al estimar la radiación PAR en los sitios de observación, al tener un MBE de $35 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, un RMSE de $75.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y un RE de $10.7 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ con respecto a los valores de un sensor cuántico. Esto sugiere que la irradiancia solar puede ser utilizada para estimar la radiación PAR con un nivel alto de precisión [24].

En 2015, Peng et al. estudiaron las características estacionales de la radiación PAR y de la relación Q_p/R_s en la meseta del Tíbet. Para ello, propusieron un modelo para estimar la radiación PAR en diversas condiciones del cielo, basado en el coseno del ángulo cenital solar y el índice de claridad del cielo.

El trabajo se llevó a cabo en la ciudad de Lhasa —ubicada en la meseta del Tíbet—, lugar elegido debido a la alta concentración de radiación que recibe durante el año. Para el desarrollo del modelo se recabó la información meteorológica comprendida entre el 2006 y el 2012. Además de los datos obtenidos en Lhasa, se utilizó la información de otras dos estaciones dentro de China, ubicadas en regiones con características climatológicas diferentes a las del lugar de estudio para evaluar la precisión del modelo desarrollado.

Al comparar los resultados de las estimaciones y las mediciones obtenidas con sensores cuánticos, se observó que las diferencias generales entre ambos resultados fueron inferiores al 5%, lo que sugiere que el modelo puede utilizarse en lugares con características climatológicas diferentes y generar aproximaciones cercanas a los valores reales de radiación PAR [25].

El último trabajo a destacar es el publicado en 2016 por Bo Hu, Hui Liu y Yuesi Wang. En él, se desarrolló un modelo para estimar la radiación PAR bajo diferentes condiciones de cielo con base en mediciones realizadas en el sitio de estudio. Se trabajó con este modelo a partir de la información obtenida entre el 2005 y el 2014 en dos estaciones meteorológicas pertenecientes a las regiones de Lhasa y Haibei.

Una mitad de la información meteorológica se utilizó para establecer el modelo de estimación, mientras que la mitad restante fue utilizada para su validación. El modelo resultante depende únicamente del índice de claridad del cielo y el coseno del ángulo cenital solar, que, como puede observarse, son parámetros usados en la mayoría de los modelos descritos anteriormente.

Para analizar si el modelo desarrollado se puede utilizar con seguridad en sitios diferentes al original, se recurrió a la información de siete lugares distintos dentro de China con condiciones climatológicas diferentes al sitio original. Los resultados obtenidos mostraron que los errores relativos variaron entre 1.58% y 13.46% entre los valores estimados y los valores medidos, mientras que el MBE varió de 0.2% a 7.81%. Esto sugiere que el modelo desarrollado puede ser utilizado para estimar la radiación PAR en otros sitios diferentes a Lhasa, lugar para el que el modelo fue originalmente concebido [26].

Como se puede observar, ninguno de los modelos desarrollados en estos trabajos se muestra en este apartado, debido a que los mismos son listados dentro del capítulo 3 de esta investigación, en el que se explica el criterio utilizado para su elección. De la misma manera, los parámetros utilizados por los modelos de estimación son explicados en el capítulo dos del presente trabajo.

II. MARCO TEÓRICO

Este capítulo describe la información teórica necesaria para comprender los modelos empíricos desarrollados para estimar la radiación fotosintéticamente activa; también se describen los instrumentos convencionales de medición de irradiancia y de radiación PAR.

2.1 Radiometría

La radiometría es el sistema de conceptos, terminología, relaciones matemáticas, instrumentos de medición y unidades de medida empleados para describir y medir la radiación y su interacción con la materia [11].

En radiometría se debe tener en cuenta cómo se distribuye la radiación a lo largo del espectro electromagnético, la cual se divide en diferentes secciones que se clasifican periódicamente de acuerdo con su longitud de onda (λ) o a su frecuencia (ν), como lo muestra la Figura 2.1.

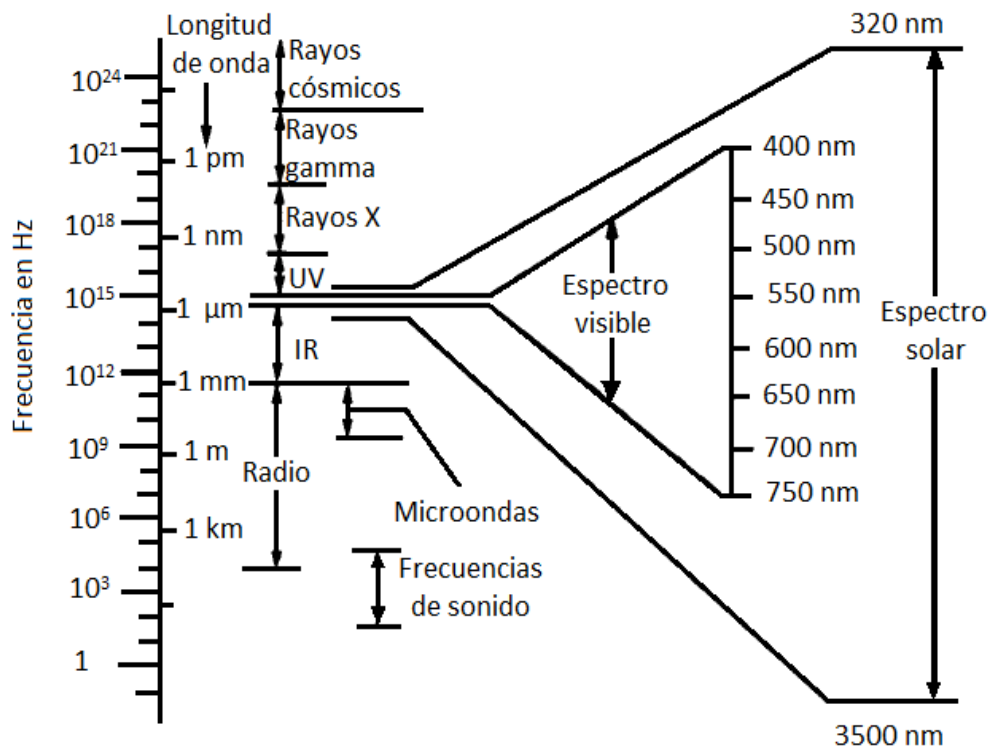


Figura 2.1 Espectro electromagnético y sus diferentes secciones en frecuencia y longitud de onda.

Estas secciones han sido estandarizadas por la Comisión Internacional de Iluminación (*Commission Internationale de l'Eclairage*, CIE), que también ha estandarizado la terminología que se muestra en la Tabla 2.1 para las diferentes secciones del espectro electromagnético.

Tabla 2.1 Regiones del espectro electromagnético de acuerdo con la CIE [11].

Nombre	Rango de longitudes de onda
UV-C	100 a 280 nm
UV-B	280 a 315 nm
UV-A	315 a 400 nm
Visible	Aproximadamente 360-400 a 760-800 nm
IR-A	780 a 1400 nm
IR-B	1.4 a 3 μm
IR-C	3 μm a 1 mm

A continuación, se indican los parámetros de medición más utilizados en la radiometría, mismos que contienen el sufijo *e* para diferenciarlos de los parámetros fotométricos.

2.1.1 Energía radiante Q_e

Es la cantidad de energía propagada a través de, sobre, o que emerge de una superficie de área determinada en un periodo de tiempo dado. Es el parámetro básico de la radiometría. La energía radiante incluye todas las longitudes de onda del espectro de radiación. Sus unidades, según lo marca el Sistema Internacional de Unidades (SI), son los Joules (J).

2.1.2 Flujo radiante Φ_e

Se define como la cantidad total de energía radiante por unidad de tiempo emitida por una fuente de iluminación o recibida por una superficie. Sus unidades, de acuerdo al SI, son los watts (W) (1 W = 1 J/s). La ecuación que define al flujo radiante es:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (2.1)$$

2.1.3 Intensidad radiante I_e

Es la cantidad de flujo radiante por unidad de ángulo solido (Ω) emitido, propagado o incidido por un punto con una dirección dada. Sus unidades son los watts/estereorradián (W/sr). La ecuación que define la intensidad radiante es:

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.2)$$

2.1.4 Irradiancia E_e

Es la cantidad de flujo radiante que incide sobre un punto en una superficie dada (S_0). Sus unidades son los watts por metro cuadrado (W/m²). La ecuación que define la irradiancia es:

$$E_e = \frac{d\Phi}{dS_0} \quad (2.3)$$

2.1.5 Radiancia L_e

Se describe como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación. Sus unidades son W/m²·sr. La ecuación que define la radiancia es:

$$L_e = \frac{d^2\Phi}{d\Omega ds} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega ds_0 \cos\theta} \quad (2.4)$$

2.2 Fotometría

Es una rama de la radiometría en la que los parámetros radiantes son descritos en función de la respuesta del ojo humano a las longitudes de onda. A estos parámetros se les agrega el subíndice v para distinguirlos de los parámetros radiométricos. Los parámetros fotométricos pueden definirse en términos de los parámetros radiométricos mediante la siguiente ecuación:

$$Q_v = 683 \int_{380}^{770} Q_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

donde el término 683 es la máxima eficacia luminosa espectral de la radiación para la visión fotópica, Q es cualquier parámetro radiométrico y $V(\lambda)$ es la función luminosa espectral.

La definición de los parámetros fotométricos es la misma que para los parámetros radiométricos: el flujo luminoso (Φ_v) es el equivalente al flujo radiante y sus unidades son los lúmenes (lm), la intensidad luminosa (I_v) equivale a la intensidad radiante y sus unidades son las candelas (cd), la iluminancia (E_v) es el equivalente a la irradiancia y sus unidades son los luxes (lx). Por último, la luminancia L_v es el parámetro equivalente a la radiancia y sus unidades son el lumen/m²·estereorradián (lm/m²·sr) o candela/m² (cd/m²) [11, 27, 28].

En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo sencillo de los parámetros recién definidos.

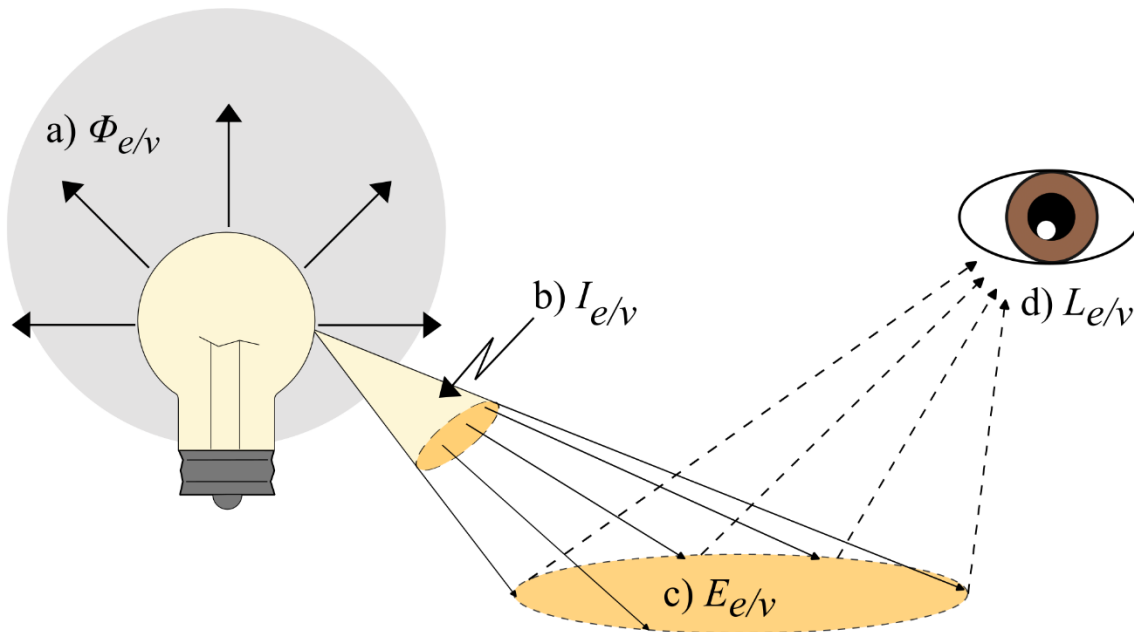


Figura 2.2 Parámetros radiométricos/fotométricos, a) Flujo radiante/luminoso, b) Intensidad radiante/luminosa, c) Irradiancia/iluminancia, d) Radiancia/Luminancia.

2.3 Función luminosa espectral o curva de respuesta espectral del ojo humano

La CIE estandarizó en 1924 la respuesta espectral de un observador humano bajo condiciones de visión fotópica (vista diurna). Aunque la respuesta espectral humana tiene leves variaciones entre cada persona, se ha adoptado una curva de respuesta estándar como se muestra en la Figura 2.3. Como el símbolo $V(\lambda)$ se utiliza para representar esta respuesta espectral, la curva mostrada es comúnmente conocida como curva V de lambda [11].

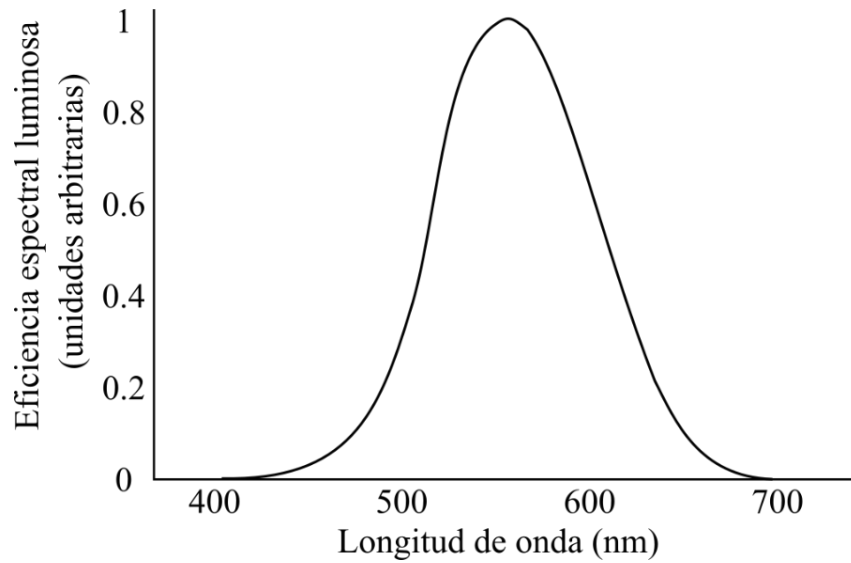


Figura 2.3 Función luminosa espectral $V(\lambda)$ para el estándar de 1924 de la CIE [11].

2.4 Parámetros utilizados para el desarrollo de los modelos empíricos

Los modelos existentes en la literatura utilizan un conjunto de parámetros meteorológicos que pueden describir las condiciones del cielo que influyen la relación Q_p/R_s . A continuación, se mencionan los diferentes parámetros utilizados en los modelos empíricos.

Ángulo de elevación solar (β): es el ángulo entre el horizonte y el centro del disco solar [22]. Para su cálculo pueden utilizarse las ecuaciones propuestas por Michalsky en 1988, que son válidas para el periodo de 1950 a 2050 con una incertidumbre aproximada de $\pm 0.01^\circ$ [29].

Ángulo cenital solar (θ): es el ángulo entre el cenit y el centro del disco solar [30, 31]. Es el ángulo complementario del ángulo de elevación solar.

Humedad relativa (RH): es la cantidad de vapor de agua presente en el aire, expresada como un porcentaje de la cantidad necesaria para la saturación a la misma temperatura. Se relaciona con la temperatura de punto rocío [32, 33].

Temperatura de punto de rocío (T_d): es la temperatura a la cual el vapor de agua contenido en el aire comienza a condensarse produciendo rocío o niebla [22, 34, 35]. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_d = \frac{243.04 \left[\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{7.625t}{243.04+t} \right]}{7.625 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) - \frac{7.625t}{243.04}} \quad (2.6)$$

donde RH es la humedad relativa y t es la temperatura del aire en °C.

Índice de claridad del cielo (k_t): es la relación entre la irradiancia total sobre una superficie horizontal y la radiación solar extraterrestre sobre la misma superficie. Se utiliza para caracterizar el cielo y evaluar la calidad de los datos medidos de radiación solar [19, 36 – 40].

Brillo del tragaluz (Δ): es utilizado para caracterizar las condiciones del cielo. Se calcula a partir de los valores de radiación incidente y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{R_d}{(R_{so} \sin \beta)} \quad (2.7)$$

donde R_d es la radiación difusa incidente y R_{so} es la radiación solar extraterrestre. El brillo del tragaluz depende de la carga del aerosol y del espesor de las nubes [19, 22].

2.5 Instrumentos utilizados para medir la radiación emitida por una fuente de radiación

Existen tres tipos de instrumentos diseñados para medir la radiación emitida por una fuente de iluminación/radiación. Los primeros son llamados piranómetros y se utilizan para medir la radiación emitida por cualquier tipo de fuente de radiación. Al no tener ningún filtro, permiten obtener en su totalidad la lectura del espectro de radiación emitido por la fuente estudiada [41].

El segundo tipo de instrumentos, los luxómetros, están diseñados para medir dentro de los 400 y 700 nanómetros, al contener filtros que les permiten emular la respuesta promedio de la visión humana. Debido a ello, son utilizados para realizar mediciones sobre fuentes de iluminación comunes [42].

El último tipo de instrumentos, llamados sensores cuánticos, están diseñados específicamente para la medición de la radiación PAR, por lo que, al igual que los luxómetros, contienen filtros para discriminar las longitudes de onda fuera del rango de los 400 a 700 nm,

lo que les permite responder a la radiación de manera similar a las plantas [43]. Aunque el rango de longitudes de onda es el mismo para los luxómetros y los sensores cuánticos, las diferencias en su diseño les permiten tener respuestas diferentes.

En el ejemplo de la Figura 2.4, la irradiancia del Sol ($E(\lambda)$) se transmite a través de la atmósfera ($\tau(\lambda)$); dependiendo del sensor, se tendrán tres tipos de respuesta ante el espectro emitido: respuesta radiométrica ($R_e(\lambda)$), respuesta fotométrica ($R_v(\lambda)$) y respuesta cuántica ($R_q(\lambda)$).

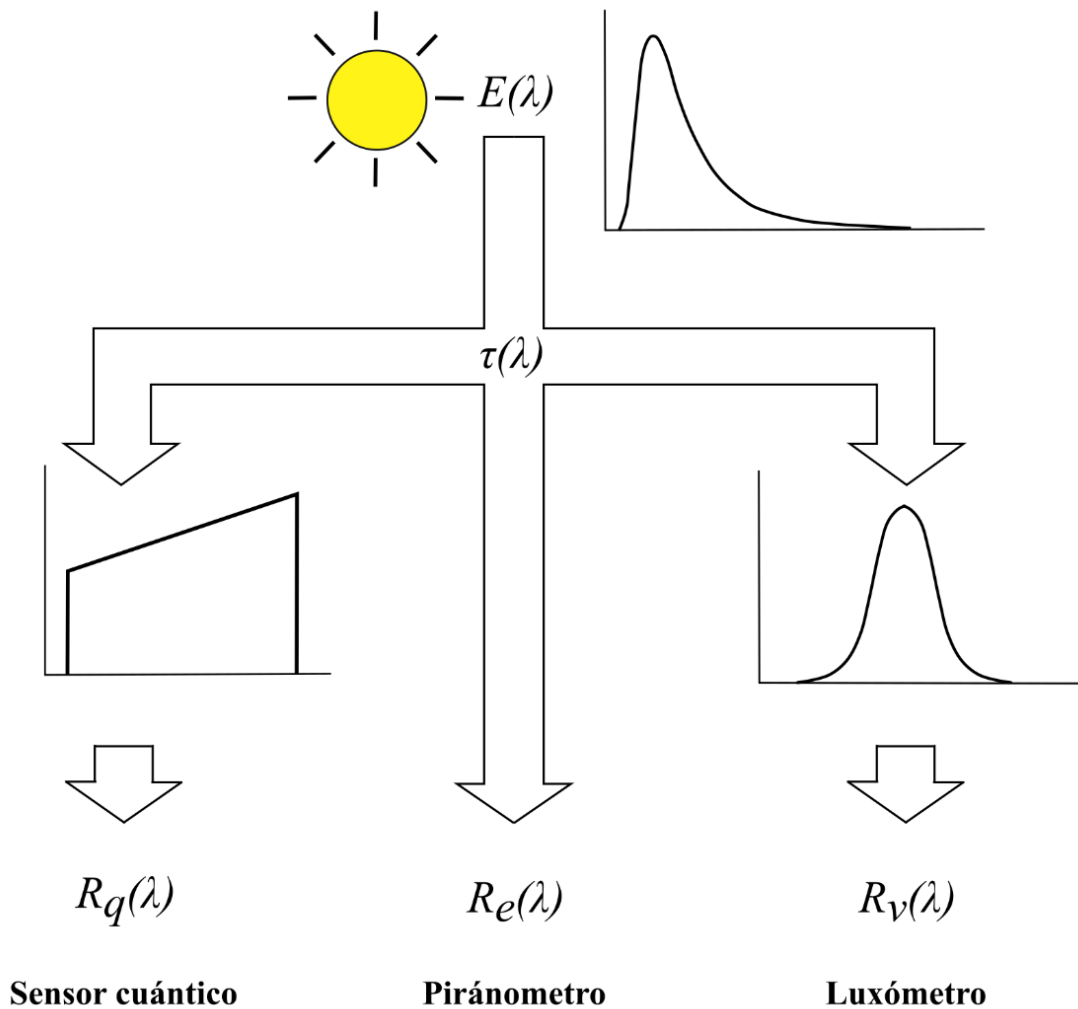


Figura 2.4 Diferentes formas de medir un mismo espectro de radiación.

La Tabla 2.2 muestra una comparación entre los parámetros radiométricos, fotométricos y cuánticos utilizados en estudios de radiación, sus unidades, símbolos y los instrumentos con los que se pueden realizar las mediciones de dichos parámetros.

Tabla 2.2 Comparación de parámetros de radiación.

Parámetro	Flujo			Densidad de flujo			Instrumento
	Nombre	Símb.	Unidad	Nombre	Símb.	Unidad	
Radiométrico	Flujo Radiante	Φ_e	W	Irradiancia	E_e	W/m ²	Piranómetro
Fotométrico	Flujo Luminoso	Φ_v	lm	Iluminancia	E_v	lx	Luxómetro
Cuántico	Flujo de fotones fotosintéticos	PPF	μmol/s	Densidad de flujo de fotones fotosintéticos	$PPFD$	μmol/m ² ·s	Sensor cuántico

2.6 Sensores cuánticos

Como se mencionó en el capítulo uno, los sensores cuánticos basan su funcionamiento en un fotodiodo adecuado para responder en el rango de los 400 a los 700 nanómetros, con la finalidad de medir la radiación PAR. Entre los materiales utilizados para la construcción de los fotodiodos se encuentran el silicio, selenio, sulfuro de cadmio, sulfuro de plomo y fosfuro de arseniuro de galio. Estos sensores deben tener también poca sensibilidad a los cambios de temperatura y una respuesta angular lambertiana, es decir, una alta corrección cosenoidal [44].

En un principio, las condiciones de iluminación en los cultivos de vegetales se determinaban con mediciones tomadas con fotómetros. Sin embargo, al ser sensores diseñados para responder ante la radiación visible, estos no poseen una respuesta lineal en el espectro de la radiación PAR. Debido a su mala precisión, se comenzaron a utilizar filtros ópticos y fotoceldas que aproximarán la respuesta requerida al medir la radiación en el espectro de la radiación PAR.

Finalmente, se desarrollaron los primeros dispositivos capaces de medirla. Dichos dispositivos se conforman por una fotocelda de silicio, un filtro que solamente permite el paso de la radiación comprendida entre los 400 y 700 nm, un cristal absorbedor de calor y un filtro de gelatina Wratten 85A, todo ello montado sobre un armazón metálico con corrección

cosenoidal. Actualmente, el funcionamiento de todos los sensores cuánticos comerciales se basa en esos primeros dispositivos [45].

Los sensores utilizados para medir la radiación PAR varían en su construcción y en el principio detrás de la conversión de radiación a voltaje o corriente. Se pueden definir dos tipos de sensores: el sensor cuántico ideal, diseñado para medir *PPFD*, y el sensor de energía ideal, diseñado para medir irradiancia PAR. Un sensor ideal no se basa en su calidad de construcción o en su principio de funcionamiento sino en función de su respuesta espectral $\varepsilon(\lambda)$. Esta función describe la salida de un instrumento cuando es iluminado por una fuente de radiación monocromática. La respuesta del sensor a cualquier fuente de radiación se integra de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M_{PAR} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda) I_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

donde I_{λ} es la irradiancia espectral.

Un sensor cuántico ideal mide el número de fotones incidentes independientemente de sus longitudes de onda. Para lograrlo, la ley de Planck señala que la función de respuesta espectral tiene que ser proporcional a la longitud de onda $\varepsilon(\lambda) \sim \lambda$, en el intervalo de 400 a 700 nm.

Los sensores cuánticos reales son, generalmente, sensores fotovoltaicos que basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico, lo que permite que la respuesta del sensor al número de fotones tienda a la linealidad, independientemente de sus longitudes de onda. Esto permite también que los sensores cuánticos tengan una sensibilidad alta, por lo que su respuesta a los cambios en la densidad del flujo de fotones es casi instantánea [46].

En los sensores cuánticos se logra un campo de visión hemisférico completo al colocar un difusor —una pieza formada de material difuso transparente— frente al diodo receptor. La naturaleza espectral del material difusor en el ancho de banda de la radiación PAR hace que la superficie receptora se vea blanca. Un filtro adecuado bloquea las longitudes de onda fuera de la región PAR. La elección del filtro, junto con el diseño físico del instrumento, hace que la curva de repuesta espectral sea más cercana a la de un sensor ideal [47].

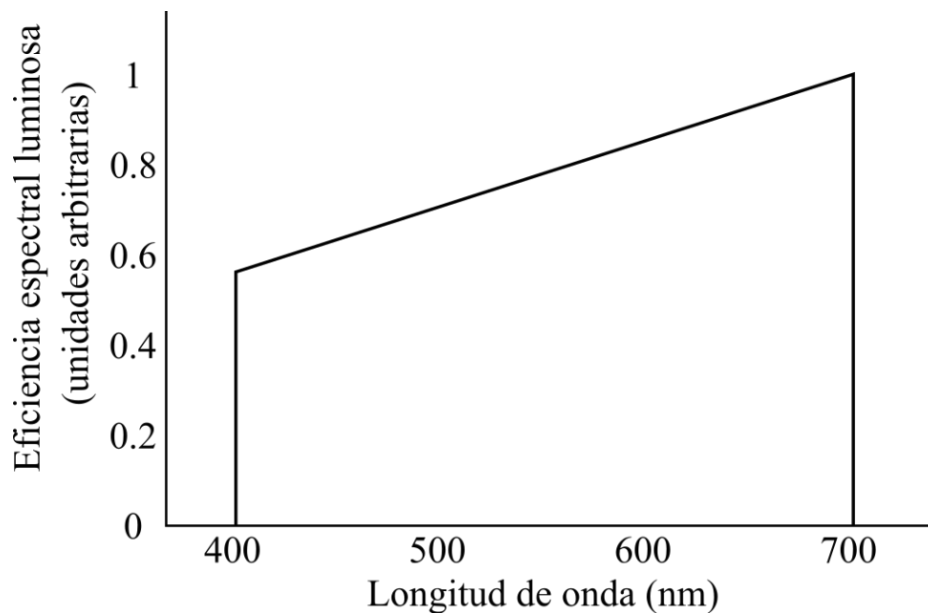


Figura 2.5 Curva de respuesta cuántica espectral.

Los sensores cuánticos están diseñados para responder a la curva de respuesta cuántica espectral, conocida también como espectro de acción de la radiación fotosintética, que se define como la productividad fotosintética de una hoja (medida como captación de CO_2 o producción de O_2) trazada contra la longitud de onda de la irradiancia espectral incidente [46, 47]. La forma de esta curva es prácticamente universal, presentándose pequeñas variaciones debido a diferencias entre especies, lugar de crecimiento, suministro de agua, nutrientes, radiación incidente, entre otras condiciones variables [2].

2.6.1 Sensor cuántico LI-190R

Uno de los sensores cuánticos más utilizados es el LI-190R manufacturado por la empresa LI-COR inc. El sensor consiste en un fotodiodo de silicio cubierto por un filtro de interferencia pasa banda y un filtro de vidrio coloreado, montados debajo de un corrector cosenoidal.

El sensor entrega una señal de corriente en el orden de los micro amperes, directamente proporcional a la radiación PAR hemisférica. Para convertir la señal de corriente en unidades de radiación PAR se utiliza un multiplicador. El LI-190R se emplea en diversas aplicaciones, como la agricultura, invernaderos, cámaras de crecimiento e investigación ambiental [43].



Figura 2.6 Sensor cuántico LI-190R.

El sensor LI-190R (mostrado en la Figura 2.6) tiene una corrección cosenoidal total, con una sensibilidad a la luz igual en todos los ángulos de incidencia hasta los 82°. Regularmente, los errores son menores a $\pm 5\%$ para ángulos menores de 82° con respecto al eje normal. A 90°, una respuesta perfecta del coseno sería cero, y cualquier error a ese ángulo es infinito.

La radiación en el sensor es captada en un disco de acrílico (difusor). Cuando la radiación se recibe con un ángulo de incidencia mayor, es detectada principalmente por el borde difusor, esto compensa el aumento de la reflexión desde la superficie superior a medida que aumenta el ángulo de incidencia; para ángulos mayores de alrededor de 80°, el borde del sensor comienza a bloquear la luz para poder mantener una respuesta correcta mientras se recibe más radiación por el borde superior. En ángulos de incidencia mayores a 90°, el borde del sensor bloquea completamente al difusor.

La señal de corriente producida por el sensor está relacionada a la intensidad de radiación con una constante de calibración que es única para cada sensor. Dicha constante se expresa en una cantidad dada de μA por cada $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. La constante de calibración generalmente se encuentra entre 5 y 10 μA por cada $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ [43].

2.6.2 Sensor cuántico Apogee SQ-500

Otro sensor ampliamente utilizado en diversas aplicaciones es el SQ-500, manufacturado por Apogee Instruments Inc. El SQ-500 es un sensor analógico de espectro completo

autoalimentado con una salida de 0 a 40 mV; incorpora un fotodiodo de silicio mejorado en azul, filtros ópticos personalizados y cuerpo de aluminio anodizado con difusor acrílico. El sensor puede medir la radiación PAR sobre cubiertas de plantas en ambientes exteriores, en invernaderos, en cámaras de crecimiento e incluso en zonas reflejadas por debajo de la cubierta de esos mismos entornos.

El SQ-500 tiene una respuesta cosenoidal de $\pm 5\%$ a un ángulo cenital de 75° , su rango espectral abarca desde 389 nm hasta 692 nm ± 5 nm para longitudes de onda donde la respuesta es mayor al 50%. Su sensibilidad de salida es de 0.01 mV por $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, mientras que el factor de calibración es de 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ por milivolt [48].



Figura 2.7 Sensor cuántico SQ-500.

Los dos sensores descritos son utilizados regularmente junto con los sistemas de adquisición de datos (dataloggers) manufacturados específicamente para ellos, facilitando la lectura y registro de los datos. Sin embargo, también se pueden desarrollar sistemas de adquisición en tarjetas de desarrollo, siendo Arduino una de las más utilizadas en el mercado.

2.7 Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto (open-source), portable y para desarrollo en lenguaje de alto nivel.

Las tarjetas de desarrollo de Arduino están compuestas por un microcontrolador Atmel y un puerto USB para comunicación y alimentación. Cuentan con un conector tipo jack para

alimentación externa, un botón de reinicio, así como una serie de circuitería auxiliar para el microcontrolador, consistente en resistencias, un cristal de cuarzo, etcétera.

Los microcontroladores de Arduino tienen pines que se pueden configurar como entradas o salidas digitales, y también tienen pines que pueden ser utilizados como entrada o salidas analógicas. En los pines digitales se pueden conectar dispositivos que transmitan señales digitales de 0 y 5 V, mientras que en los pines analógicos se pueden conectar datos de sensores en forma de señal continua variable.

Para programar una tarjeta Arduino se provee un software de entorno de desarrollo integrado IDE (*Integrated Development Environment*), que es una multiplataforma programada en Java. La plataforma tiene una interfaz simple e incluye un editor de texto, botones para compilar y cargar los códigos en el microcontrolador, un área de mensajes y una barra de herramientas. El IDE de Arduino soporta los lenguajes de programación C y C++ utilizando reglas especiales en la estructuración del código [49]. Entre las tarjetas de desarrollo más utilizadas se encuentra el modelo Arduino MEGA 2560.

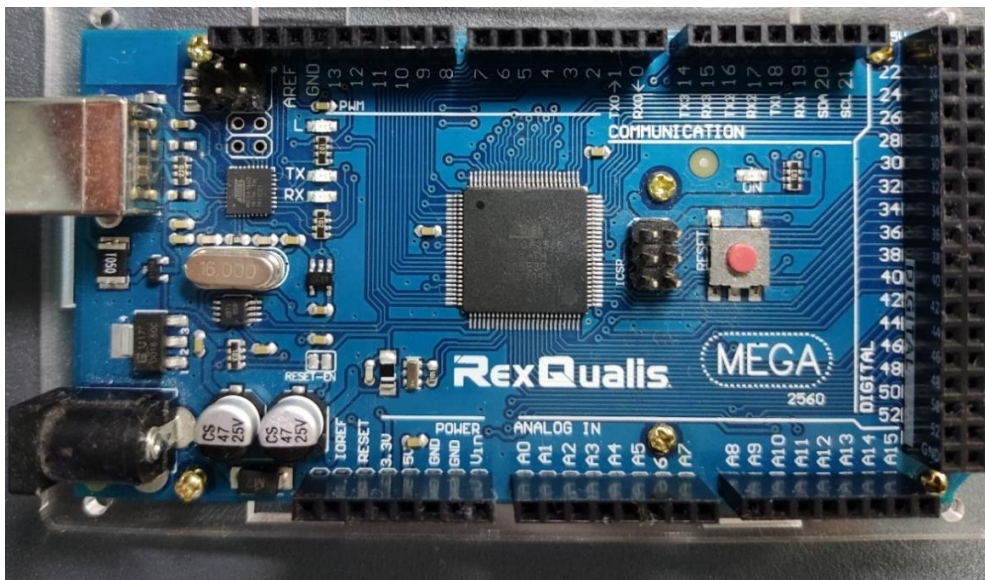


Figura 2.8 Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560.

El Arduino MEGA 2560 es una tarjeta de desarrollo que basa su funcionamiento en el microcontrolador ATmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales

15 pueden ser utilizados como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos seriales de hardware), un cristal oscilador de 16 MHz, un conector USB, un jack de alimentación, un header ICSP, y un botón de reinicio. Cada entrada analógica tiene una resolución de 10 bits. Por defecto, miden el voltaje de 0 a 5 V, sin embargo, es posible cambiar el valor máximo usando el pin AREF. La Tabla 2.3 muestra sus características técnicas completas [50].

Tabla 2.3 Características técnicas del Arduino MEGA 2560.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7 – 12 V
Voltaje de entrada (límite)	6 – 20 V
Pines digitales I/O	54 (15 pueden usarse como PWM)
Pines análogos de entrada	16
Resistencia interna de pull-up	20 – 50 k Ω
Corriente continua por pin I/O	20 mA
Corriente continua en el pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	256 KB (8 KB usado por el bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz

Hasta este punto se han descrito los conceptos e instrumentos utilizados para estimar los diferentes tipos de radiación. A continuación, se detalla la información relevante referente a la Mesa del Norte de México, así como la descripción de las estaciones meteorológicas utilizadas para estudiar las condiciones climatológicas dentro del área de estudio.

2.8 Mesa del Norte de México

Esta zona comprende la sección norte de la Meseta de México. Comienza cerca de la frontera de México con Estados Unidos y cubre grandes áreas de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, Jalisco y Aguascalientes, y termina cerca de la ciudad de San Luis Potosí. Además, tiene una elevación promedio de 1200 metros sobre el nivel del mar.

Gran parte de esta región se conforma de tierra árida quebrada por montañas y planicies incrustadas de sal llamadas bolsones. La población se concentra en mayor parte en las zonas de

riego, las cuales son escasas; ahí se cultiva trigo, algodón, maíz, frijol, entre otros, mientras que las tierras más áridas son utilizadas como pastizales. En la región se extraen cantidades significativas de plomo y zinc, así como cantidades menores de hierro y plata [51 – 53].

2.8.1 Superficie de los estados que conforman la Mesa del Norte de México

Como ya se mencionó, la Mesa del Norte está conformada por grandes áreas de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León y la totalidad de Coahuila y Aguascalientes, como se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Mesa del Norte de México.

Con base en datos del INEGI al 2015 [54], los estados que comprenden la Mesa del Norte representan un 28.4% de la superficie integral de México, cuyo total es de 1.973 millones de kilómetros cuadrados. La Tabla 2.4 muestra la información específica de cada estado.

Tabla 2.4 Superficies de los estados pertenecientes a la Mesa del Norte de México.

Estado	Superficie Total (km ²)	Porcentaje de la superficie de México (%)	Superficie dentro de la Mesa del Norte (km ²)	Porcentaje dentro de la Mesa del Norte (%)
Chihuahua	247 412	12.6	183 929	32.8
Durango	123 364	6.3	80 176	14.3
Coahuila	151 5945	7.7	151 595	27
Zacatecas	75 275	3.8	71 120	12.7
Aguascalientes	5 616	0.3	5 616	1
San Luis Potosí	61 138	3.1	31 197	5.6
Nuevo León	64 156	3.3	36 818	6.6
Total	728 556	37.1	560 451	100

2.8.2 Clima de la Mesa del Norte de México

En la Mesa del Norte de México predominan los climas seco, muy seco y semiseco, aunque en algunas regiones existen otros tipos de climas como el templado subhúmedo o el cálido subhúmedo. Según la clasificación Köppen-Geiger, los tipos de clima que caracterizan a la Mesa del Norte de México son el BSk (frío y semiárido), BWh (árido cálido), BSh (semiárido cálido) y BWk (árido templado y frío) [55]. La Tabla 2.5 muestra los tipos de clima presentes en los estados de la Mesa del Norte.

Tabla 2.5 Climas de cada estado de la Mesa del Norte de México.

Edo.	Clima 1 (%)	Clima 2 (%)	Clima 3 (%)	Otros climas (%)
Chih.	Muy seco (40)	Seco, semiseco (33)	Templado subhúmedo (24)	Cálido subhúmedo (3)
Coah.	Seco, semiseco (49)	Muy seco (46)	Templado subhúmedo (5)	---
Dur.	Seco, semiseco (40)	Templado subhúmedo (34)	Muy seco (14)	Cálido subhúmedo, templado húmedo (12)
Zac.	Seco, semiseco (73)	Templado subhúmedo (17)	Muy seco (6)	Cálido subhúmedo (4)
S.L.P.	Seco, semiseco (71)	Cálido subhúmedo (15)	Cálido húmedo (10)	Muy seco, templado subhúmedo (4)
N.L.	Seco, semiseco (68)	Cálido subhúmedo (20)	Templado subhúmedo (7)	Muy seco (5)
Ags	Semiseco (86)	Templado subhúmedo (14)	---	---

La Tabla 2.6 muestra las temperaturas promedio para cada estado perteneciente a la Mesa del Norte. Las temperaturas máximas se presentan entre mayo y agosto, las mínimas en el mes de enero y las precipitaciones se dan durante los meses de verano (junio a septiembre).

Tabla 2.6 Temperatura promedio en cada estado de la Mesa del Norte de México.

Estado	Temp. Media (°C)	Temp. Max. (°C)	Temp. Min. (°C)	P. anual (mm)
Chihuahua	17	>30	~0	500
Coahuila	18 - 22	>30	~4	400
Durango	17	>31	~1.7	500
Zacatecas	17	~30	~3	510
San Luis Potosí	21	~32	~8.4	950
Nuevo León	20	~32	~5	650
Aguascalientes	17 - 18	~30	~4	526

2.8.3 Flora de la Mesa del Norte de México

Debido a las diferencias de relieve entre cada estado, la flora también es muy diversa. En Chihuahua predominan los matorrales desérticos distribuidos desde las llanuras y desiertos del noreste, a ellos les siguen los bosques de coníferas y encinos que se desarrollan en la Sierra Madre Occidental, además de los pastizales en las mesetas centrales.

En Coahuila predominan los matorrales que se encuentran en más del 80% en las extensas llanuras y la zona desértica del Bolsón de Mapimí. Al noroeste, existen matorrales que se mezclan con pastizales. En menor medida, se encuentran bosques de coníferas y encinos.

El 31% de la superficie de Durango está constituida por bosques de coníferas y encinos en la zona serrana, a ellos le siguen los pastizales y matorrales y finalmente la selva tropical en la región de las quebradas que se ubican al Suroeste.

En Zacatecas, los matorrales abarcan un tercio de la superficie total, después le siguen los pastizales y en las regiones con mayor elevación existen bosques de coníferas y encinos.

En San Luis Potosí predominan los matorrales, que se distribuyen en el centro, norte y oeste del estado. En las partes altas del centro y el este se localizan bosques de encino y coníferas; al

oeste y al este, en la región huasteca, existen pastizales. Las selvas secas y subhúmedas abarcan el 26% de la superficie estatal.

Los matorrales ocupan más de la mitad de la superficie de Nuevo León; los bosques de coníferas y encinos se encuentran en las zonas altas del estado.

En Aguascalientes predominan los pastizales y bosques, que ocupan cada uno de ellos un tercio de la superficie estatal. Le siguen los matorrales, que se ubican en las zonas planas y lomeríos en el este del estado. El oeste se caracteriza por sus sierras y mesetas donde también existe una pequeña porción de selvas en el Valle de Calvillo [56 – 62].

Gran parte de la información descrita sobre la Mesa del Norte es recopilada por diferentes organismos gubernamentales de México, entre los que se encuentra la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que cuenta con una red de estaciones meteorológicas a lo largo del país.

2.9 Estaciones meteorológicas automáticas y sinápticas

Una estación meteorológica automática es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática en forma numérica.

Una estación sinóptica meteorológica automática es un conjunto de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática y autónoma, generan una base de datos y un mensaje sinóptico cada tres horas. Un mensaje sinóptico es el reporte generado de manera simultánea en todos los puntos sinópticos, y además presenta información meteorológica de tiempo presente y pasado de forma codificada.

En ambos casos, las estaciones están formadas por un grupo de sensores que registran y transmiten la información meteorológica de diferentes variables, entre las que se encuentran: velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación.

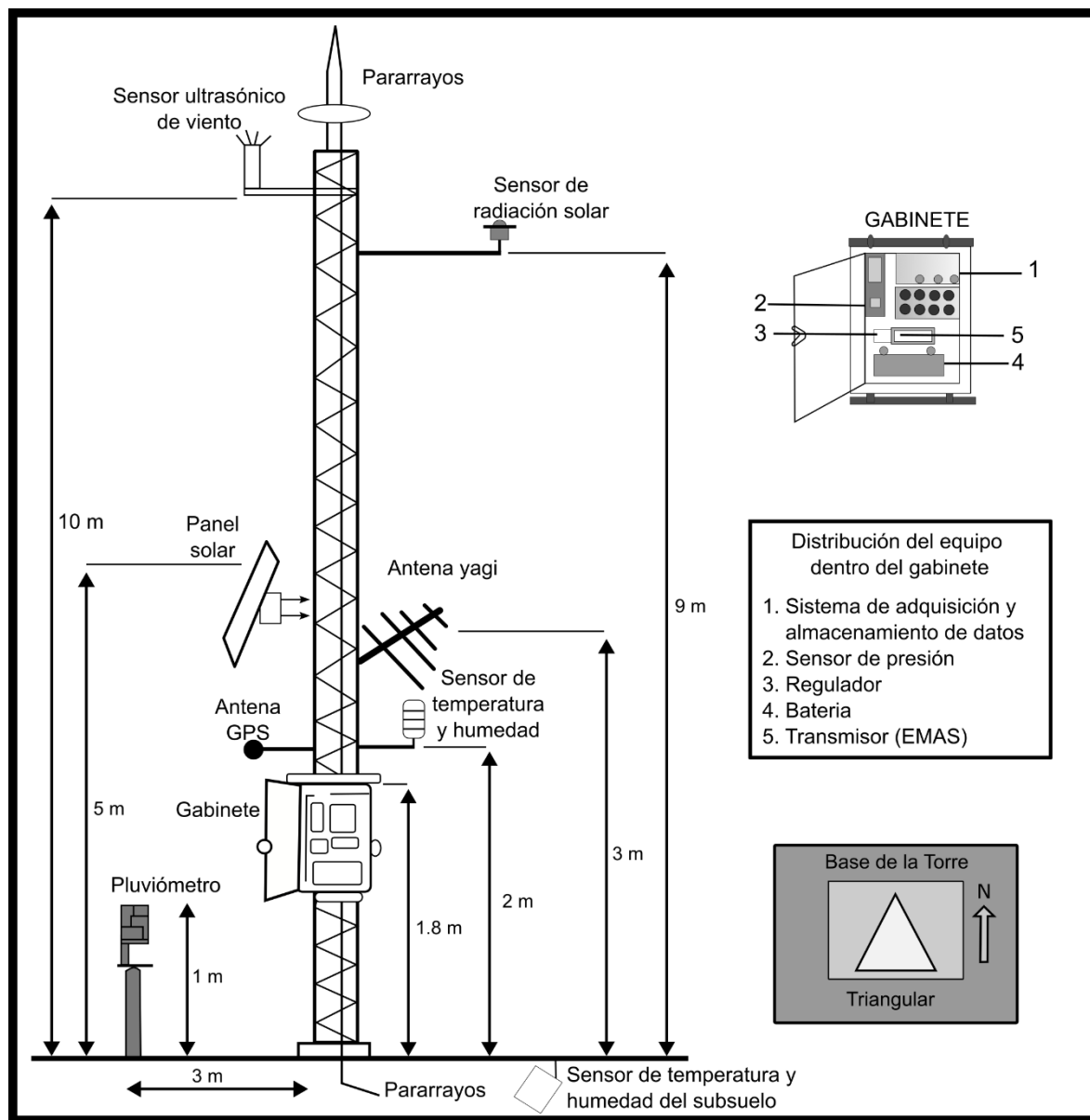
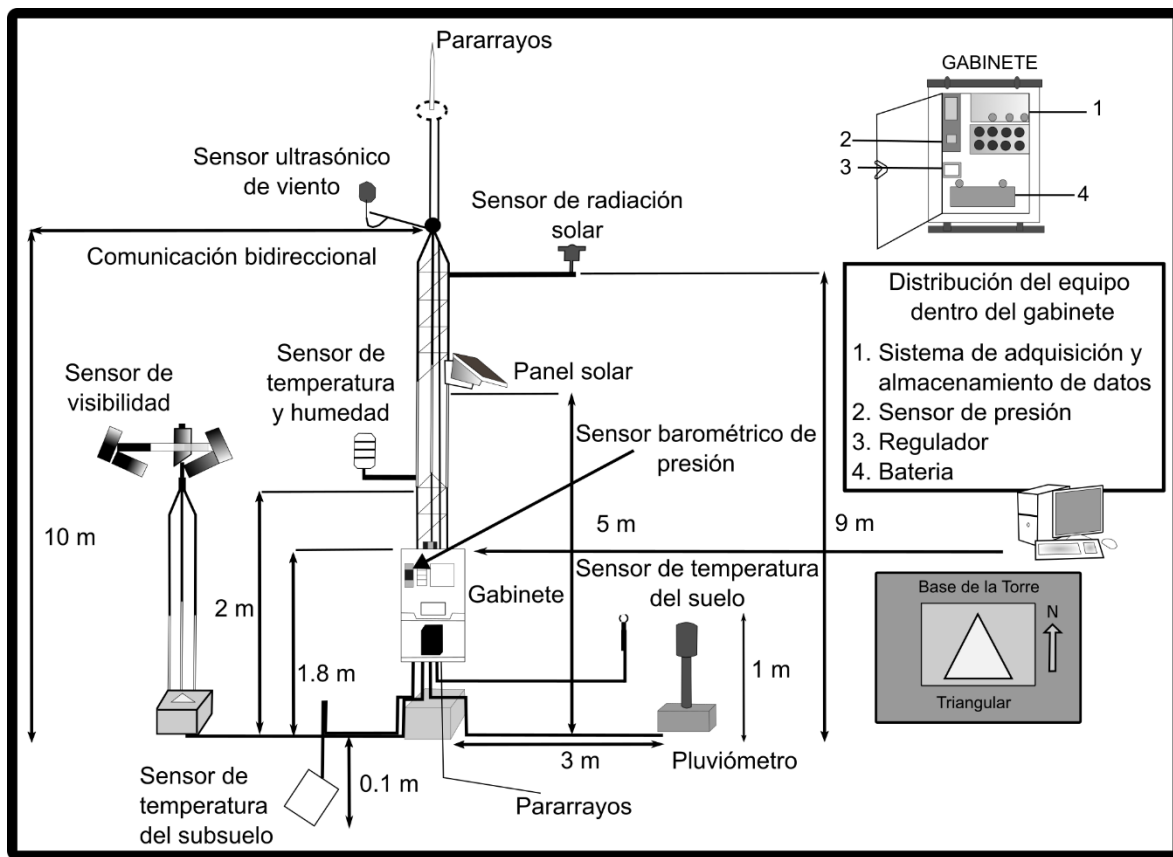


Figura 2.10 Estación Meteorológica Automática (EMA).

Dentro de México, la CONAGUA tiene una red nacional de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) y estaciones sinópticas meteorológicas automáticas (ESMAS), cuya función principal es recopilar y monitorear algunas variables meteorológicas, generando archivos del valor instantáneo de cada una de las variables cada 10 minutos. La información recopilada es enviada por satélite en intervalos de 1 o 3 horas por estación. Cada estación meteorológica está colocada en un sitio estratégico y su área representativa es de



III. MODELOS ELEGIDOS PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN PAR EN LA MESA DEL NORTE

Este capítulo explica el criterio utilizado para seleccionar los modelos existentes en la literatura para estimar la radiación PAR dentro de la Mesa del Norte de México. También se explica el proceso llevado a cabo para obtener las mediciones de los parámetros meteorológicos utilizados en los modelos seleccionados.

3.1 Búsqueda de información meteorológica en México

Para estimar la radiación PAR con los modelos empíricos existentes en la literatura es necesario contar con la información meteorológica en las regiones de interés. En el presente trabajo se llevó a cabo una búsqueda de bases de datos conformadas por redes de estaciones meteorológicas en México, centrándose en la Mesa del Norte.

Entre las bases de datos consultadas se encuentra la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas INIFAP [65], la Base de Datos Climatológica Nacional (sistema CLICOM) [66] y la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) de la CONAGUA [63]. De todas las anteriores, la más completa es la perteneciente a la CONAGUA, ya que es la única que cuenta con la información de todos los parámetros utilizados por los modelos para estimar la radiación PAR, además de que la información registrada es reciente.

La base de datos de la CONAGUA permite descargar los registros de datos recopilados de cada estación en periodos de 24 horas, una semana y 90 días, lo que facilita la recolección de la información meteorológica. La información de las lecturas se registra cada 10 minutos en horario UTC (Tiempo Universal Coordinado), por lo que se debe ser cuidadoso a la hora de interpretar los datos.

La Figura 3.1 muestra la localización de las estaciones meteorológicas dentro de México pertenecientes a la CONAGUA, los puntos morados representan estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) y los puntos verdes representan estaciones sinápticas meteorológicas automáticas (ESMAs). La Figura 3.2 muestra un ejemplo de la información presentada previa

a la descarga de los registros de datos, ahí se indica la información de la estación seleccionada y las opciones para descargar los registros.

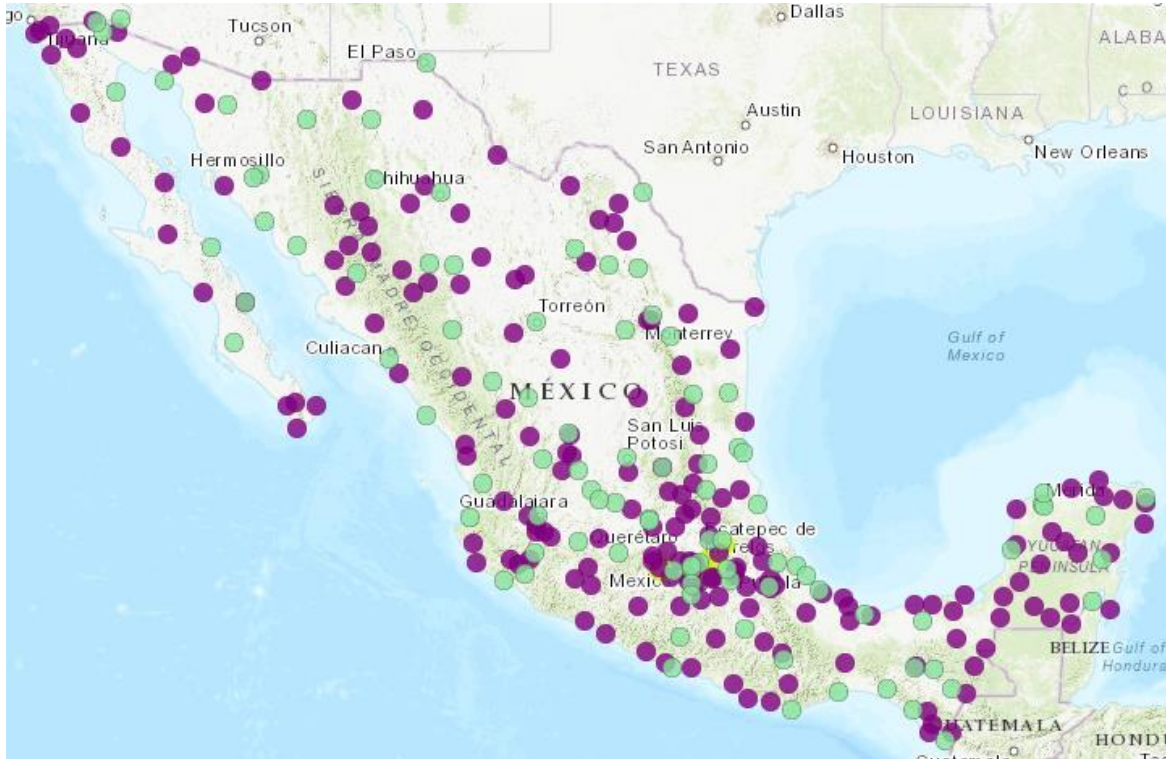


Figura 3.1. Estaciones meteorológicas pertenecientes a la CONAGUA.



Figura 3.2 Información de una estación meteorológica previa a la descarga de datos.

3.2 Búsqueda y selección de los modelos empíricos existentes en la literatura

Luego de encontrar una base de datos que permitiera descargar la información meteorológica, se realizó una búsqueda en la literatura para encontrar los modelos con mejores resultados al estimar la radiación PAR con el fin de implementarlos en la Mesa del Norte.

La búsqueda y selección de los modelos se realizó basándose en que el modelo:

- Fuera desarrollado originalmente en regiones donde las características climatológicas predominantes sean áridas o semiáridas.
- Tenga un bajo nivel de incertidumbre en las estimaciones bajo cualquier tipo de condición climatológica.
- Utilice parámetros que puedan calcularse a partir de la información obtenida en las estaciones meteorológicas locales.

Cabe destacar que, a partir de esta búsqueda, se publicó un artículo recopilando 50 modelos desarrollados alrededor del mundo abarcando diferentes técnicas de estimación [67].

Como se mencionó en el capítulo uno, para estimar la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (Q_p), los modelos dependen de diversos parámetros calculados a partir de la información obtenida en las estaciones meteorológicas. Dentro de dichos parámetros se destacan el índice de claridad del cielo (k_t), la temperatura de punto de rocío (T_d) y el ángulo de elevación solar (β) o su complemento, el ángulo cenital solar (θ). Cada uno de estos parámetros fue descrito en el capítulo dos de este documento.

Conforme al criterio de selección utilizado, los modelos seleccionados para estimar la radiación PAR en la Mesa del Norte son los siguientes:

Modelo 1:

$$\frac{Q_p}{R_s} = 1.791 - 0.190 \ln k_t + 0.005 T_d + 0.049 \sin \beta \quad (3.1)$$

Modelo 2:

$$Q_p = (8.2 + 3409.2 k_t - 2091.7 k_t^2 + 1447.2 k_t^3) \times \mu^{1.031} \quad (3.2)$$

Modelo 3:

$$Q_p = 1.817R_s \quad (3.3)$$

Modelo 4:

$$Q_p = (88.98 + 1486.1k_t + 1094.6k_t^2 - 846.33k_t^3) \times \mu^{1.027} \quad (3.4)$$

Modelo 5:

$$Q_p = (73.5 + 2256.9k_t + 1246.7k_t^2 - 1182.8k_t^3) \times \mu^{1.09} \quad (3.5)$$

Modelo 6:

$$Q_p = 2681k_t \cos \theta \quad (3.6)$$

donde μ representa el coseno del ángulo cenital solar.

El Modelo 1 fue propuesto por Alados, Alados-Arboledas y Foyo-Moreno en 1996 [22]; el Modelo 2 fue propuesto por Hu y Wang en 2012 [23]; el Modelo 3 fue propuesto por los mismos autores en 2013 [24]; el Modelo 4 fue propuesto por Peng et al. en 2015 [25]; el Modelo 5 fue propuesto por Hu, Liu y Wang en 2016 [26] y el Modelo 6 fue propuesto por Foyo-Moreno, Alados y Alados-Arboledas en 2017 [19].

3.3 Cálculo de los parámetros utilizados para la estimación de Q_p

Como se mencionó anteriormente, para estimar Q_p se necesitan varios parámetros meteorológicos. Sin embargo, algunos de ellos no son medidos directamente en las estaciones meteorológicas, sino que son calculados a partir de la información obtenida en dichas estaciones. A continuación, se describe el cálculo de los parámetros que no son medidos de manera directa.

3.3.1 Ángulo de elevación solar (β) y ángulo cenital solar (θ)

El ángulo de elevación solar se define como el ángulo comprendido entre la horizontal y el centro del disco solar, mientras que su complemento, el ángulo cenital solar, es definido como el ángulo comprendido entre la vertical o normal y el centro del disco solar. En ambos casos, los ángulos toman valores entre 0 y 90 grados. La Figura 3.3 muestra los ángulos en la trayectoria del Sol donde se incluye el ángulo de elevación solar y el ángulo cenital solar.

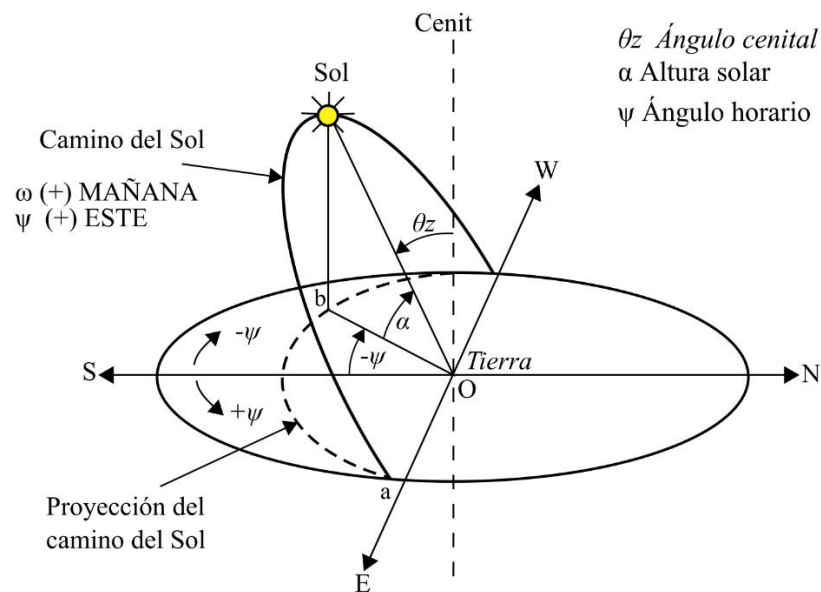


Figura 3.3 Ángulos en la trayectoria del Sol.

Para el cálculo del ángulo de elevación solar es necesario tener las coordenadas geográficas del lugar de medición, además de la hora local a la que se haga este proceso. En la base de datos de la CONAGUA esta información se obtiene al descargar los registros de datos de cada estación. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de las coordenadas geográficas de una de las estaciones dentro de la Mesa del Norte.

Servicio Meteorológico Nacional
Red: ESIME
Estación: CHIHUAHUA ob
Ubicación: CHIHUAHUA
Latitud (N): 28.6705555555556
Longitud (O): -106.030277777778
Altitud: 1433

Figura 3.4 Ejemplo de coordenadas geográficas de una estación meteorológica.

Una vez obtenidas las coordenadas geográficas y la hora de la medición, el ángulo de elevación solar puede calcularse utilizando el método y las ecuaciones propuestas por Michalsky [29]. Debido a la complejidad de las ecuaciones, hacer los cálculos de cada lectura manualmente conlleva mucho tiempo. Por ello, se realizó un script para utilizarse dentro de los

libros de cálculo de Excel. El script permite calcular el ángulo de elevación solar al insertar las coordenadas geográficas, la elevación de cada estación y la hora local de la medición; como cada uno de los registros obtenidos tiene toda esta información, el cálculo del ángulo se realiza de manera automática.

Como alternativa, y para comprobar que los cálculos del ángulo de elevación solar sean correctos, se hizo una búsqueda de diferentes aplicaciones o herramientas que permitan realizar los cálculos de manera automática, siendo la más completa la herramienta web llamada *SunEarthTools* [68], ya que permite calcular diferentes parámetros relacionados con la energía solar de manera automática, entre ellos el ángulo de elevación solar.

SunEarthTools se basa en el método de Michalsky para calcular el ángulo de elevación solar. Para obtener el valor del ángulo de elevación solar se deben proporcionar las coordenadas geográficas del sitio de interés, así como la fecha en la que se obtendrán las mediciones del ángulo de elevación solar. Un dato importante a tener en cuenta, es que también hay que introducir la zona horaria (GMT) del sitio de medición y especificar si tiene cambio de horario en verano (DST). La Figura 3.5 muestra un ejemplo de la interfaz del sitio web.

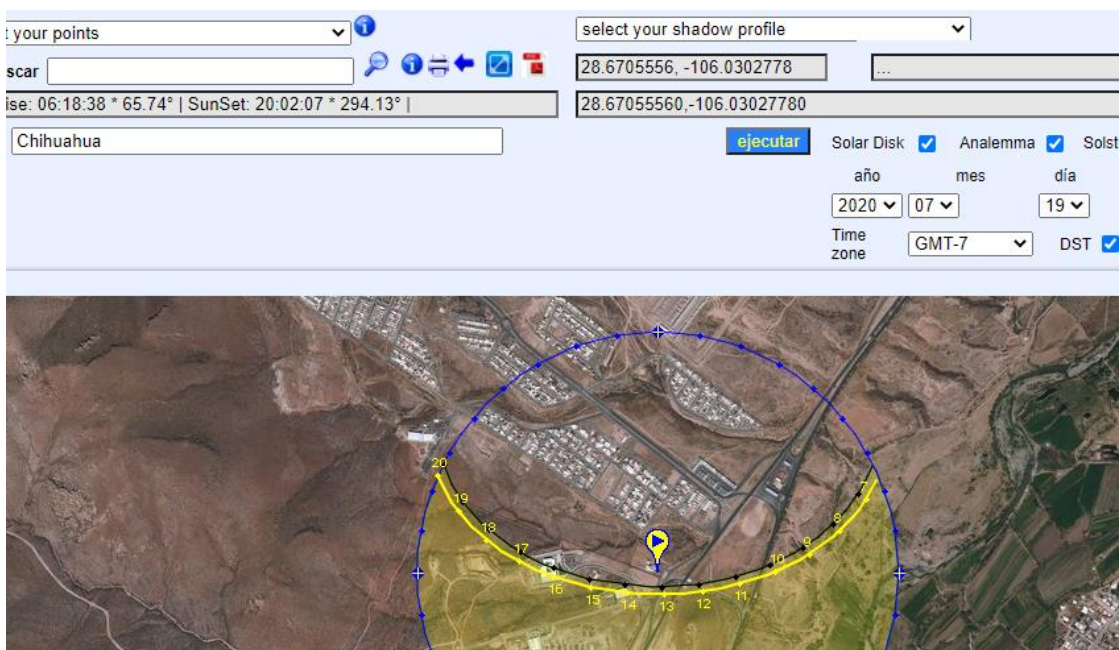


Figura 3.5 Interfaz del sitio web *SunEarthTools* para la medición del ángulo de elevación solar.

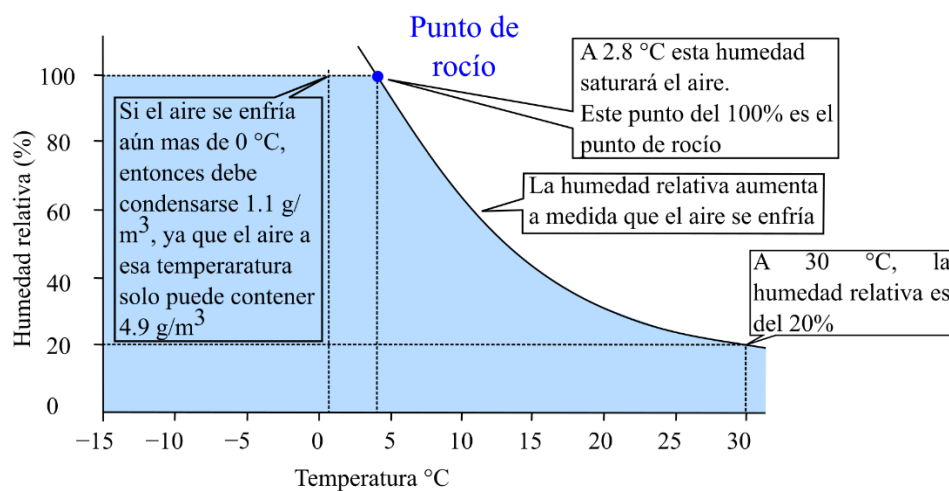
Una vez introducida la información geográfica y la fecha de medición del sitio, la interfaz se encarga de calcular automáticamente los valores del ángulo de elevación solar desde la salida del Sol hasta su puesta. El sitio permite la visualización y descarga de los valores en periodos de tiempo que van de los 5 a los 60 minutos. En este caso, se obtuvieron los datos cada 10 minutos para que coincidieran con los registros de datos de las estaciones meteorológicas.

Al comparar los resultados de ambos cálculos (Excel y *SunEarthTools*), se obtuvieron diferencias alrededor de los 0.005° , comprobando que los cálculos realizados con el script desarrollado pueden utilizarse de manera confiable para calcular el ángulo de elevación solar.

Finalmente, para calcular el ángulo cenital solar lo único que hay que hacer es determinar el complemento del ángulo de elevación solar ($\theta = 90^\circ - \beta$).

3.3.2 Temperatura de punto de rocío

Para calcular la temperatura de punto de rocío se necesita la humedad relativa (RH) y la temperatura del aire (t), que se obtienen de los registros de datos de las estaciones meteorológicas. La temperatura de punto de rocío se calcula mediante la ecuación (2.6) explicada en el capítulo dos. La Figura 3.6 muestra un ejemplo del cálculo de la temperatura de punto de rocío de manera visual.



3.6 Ejemplo de cálculo de la temperatura de punto de rocío.

3.3.3 Índice de claridad del cielo

Para calcular el índice de claridad del cielo es necesario contar con la información de la radiación solar incidente y la radiación solar extraterrestre. El primer parámetro es medible en las estaciones meteorológicas, mientras que el segundo se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_{s0} = 1367 \left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{dn}{365} \right) \right) \cos \theta \quad (3.8)$$

donde 1367 es la constante solar dada en W/m^2 y dn es el día del año. Una vez obtenida la radiación solar extraterrestre, el índice de claridad del cielo se calcula de la siguiente manera:

$$k_t = \frac{R_s}{R_{s0}} \quad (3.9)$$

en este caso, R_s es la radiación solar incidente y R_{s0} es la radiación solar extraterrestre. El rango de valores de k_t varía entre 0 y 1. Cuando los valores de k_t son altos significa que el cielo está despejado y cuando los valores de k_t son bajos significa que el cielo está nublado.

Luego de tener las descripciones formales para calcular los parámetros utilizados en la literatura, lo restante es sustituir la información meteorológica de los registros de datos dentro de cada ecuación para estimar la radiación PAR en el periodo de tiempo seleccionado.

IV. ANÁLISIS TRIMESTRAL DE LAS ESTIMACIONES DE RADIACIÓN PAR

Este capítulo presenta el análisis del comportamiento de la radiación PAR durante el periodo de medición en las estaciones dentro de la Mesa del Norte de México. Se muestra el análisis durante un trimestre de prueba para analizar la viabilidad de los modelos seleccionados en la Mesa del Norte.

Para el análisis, se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos de la radiación PAR (Q_p), la relación entre la radiación PAR y la radiación solar (relación Q_p/R_s) y el promedio diario mensual de Q_p .

4.1 Selección de estaciones meteorológicas para trimestre de prueba

Antes de estimar la radiación PAR en el total de la Mesa del Norte con los modelos de la literatura, se efectuó una fase de pruebas previa con seis estaciones meteorológicas dentro de los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila durante el trimestre de abril a junio del 2020; cabe recordar que estos representan el 74.2% de la superficie de la Mesa del Norte. Esta fase se realizó para analizar si el método seleccionado es viable para utilizarse en la Mesa del Norte, o si se debe seleccionar otra técnica para estimar la radiación PAR.

Como se mencionó con anterioridad, las estaciones meteorológicas de CONAGUA permiten la descarga de los registros de datos en diferentes periodos de tiempo. Para este trabajo se utilizaron los registros con la información recopilada de 90 días.

La Figura 4.1 muestra la ubicación de las seis estaciones elegidas para el periodo de prueba. Se seleccionaron estas estaciones porque comparten características climatológicas, además de estar espaciadas de manera equitativa dentro de la zona de estudio. Cada una de las estaciones puede caracterizar grandes porciones de la Mesa del Norte; de esta manera, se tiene un conocimiento general de sus características climatológicas.

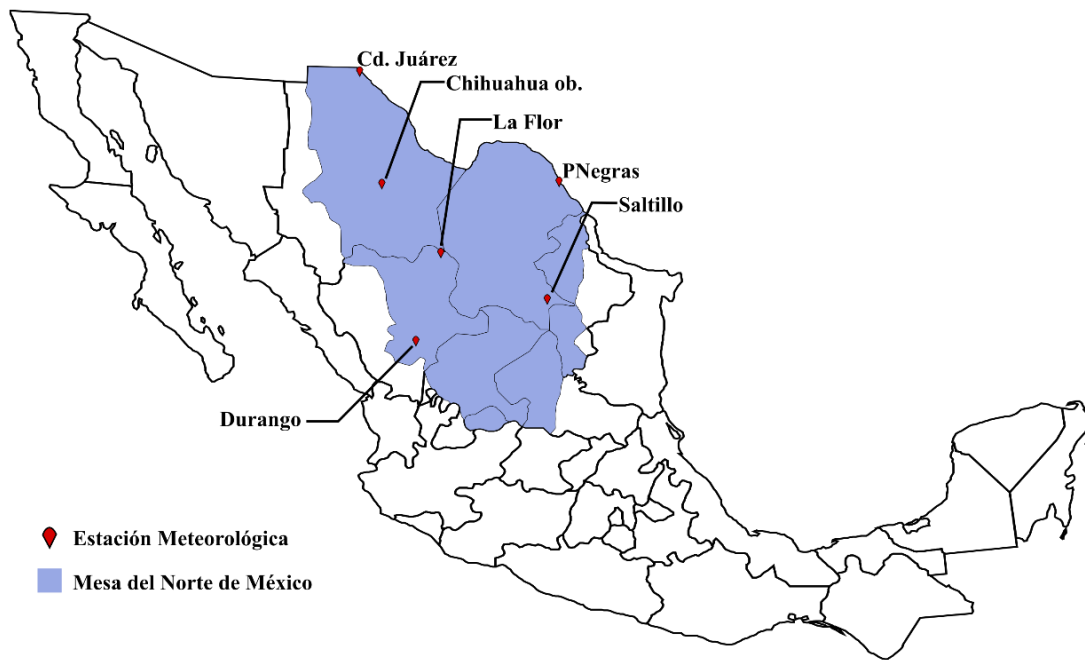


Figura 4.1 Ubicación de las estaciones seleccionadas para el periodo de prueba.

En la siguiente tabla se muestra un resumen detallado de la información de las estaciones meteorológicas seleccionadas en el trimestre abril – junio del 2020.

Tabla 4.1 Información de las estaciones seleccionadas para el periodo de prueba.

Estado	Municipio	Nombre	Latitud [N]	Longitud [W]	Elevación [m]
Chihuahua	Chihuahua	Chihuahua ob.	28°40'14"	106°1'49"	1433
Chihuahua	Ciudad Juárez	Cd. Juárez	31°41'22"	106°25'37"	1127
Coahuila	Saltillo	Saltillo	25°22'35"	101°1'0"	1789
Coahuila	Piedras Negras	PNegras	28°40'59"	100°34'0"	205
Durango	Durango	Durango	24°5'40"	104°35'58"	1871
Durango	Mapimí	La Flor	26°32'58"	103°59'58"	1164

4.2 Procesamiento de la información meteorológica para estimar la radiación PAR

Los registros de datos contienen información meteorológica que no es necesaria para estimar la radiación PAR, por lo que esta y toda la información registrada entre la puesta y la salida del sol deben eliminarse de cada registro, ya que durante ese lapso no existe información de la

radiación solar. La Tabla 4.2 muestra uno de los registros obtenidos antes de eliminar la información no necesaria para realizar las estimaciones, mientras que la Tabla 4.3 muestra el registro después de eliminarla.

Tabla 4.2 Ejemplo de registro de datos con la información originalmente obtenida. a) Parte uno del encabezado del registro, b) Parte dos del encabezado del registro.

Fecha UTC	T Aire (°C)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)	Presión Atm (hpa)
17/06/2020 20:00	33.5	0	16	860.4
17/06/2020 19:50	34.8	0	15	860.5
17/06/2020 19:40	36	0	14	860.6
a)				
Radiación Sol (W/m ²)	Dirección del Viento (grados)	Rapidez de viento (km/h)	Dirección de ráfaga (grados)	Rapidez de ráfaga (km/h)
347	283	24.84	314	40.32
328	311	18	39	41.4
b)				

Tabla 4.3 Registro de datos después de eliminar los parámetros no utilizados.

Fecha UTC	T Aire (°C)	Humedad relativa (%)	Radiación Sol (W/m ²)
17/06/2020 20:00	33.5	16	347
17/06/2020 19:50	34.8	15	328

Después de eliminar la información innecesaria, se deben agregar las ecuaciones para calcular los parámetros utilizados para estimar la radiación PAR. Luego de calcularlos, es necesario eliminar todos los resultados fuera del rango de valores de k_t ($0 < k_t < 1$); regularmente, estos valores se encuentran al inicio o al final del día, cuando el ángulo de elevación solar es bajo, por lo que las mediciones del piranómetro no son confiables al no capturar la totalidad de la radiación incidente. Otra razón para que existan valores de k_t fuera de rango es que se presente algún comportamiento anómalo en las condiciones climatológicas.

Cabe mencionar que los valores fuera del rango de k_t , aunque sean muy cercanos a cero o a uno (por ejemplo, $k_t = 1.01$), son eliminados (no se redondean). Al descartar los valores fuera de rango se mejora la calidad de las estimaciones de radiación PAR.

Tabla 4.4 Registro de datos con los parámetros utilizados para estimar la radiación PAR.

Fecha UTC	JD	β (°)	HR (%)	R_s (W/m ²)	T Aire (°C)	T _d (°C)	θ (°)	R_{s0} (W/m ²)	k_t
01/04/2020 13:00	2458941	0.54	19	1	18.6	6.59	89.46	12.86	0.078
01/04/2020 13:10	2458941.1	2.66	19	6	18.5	6.52	87.34	63.44	0.095
01/04/2020 13:20	2458941.1	4.79	18	34	18.7	6.37	85.21	114.02	0.298
01/04/2020 13:30	2458941.1	6.91	18	42	18.9	6.52	83.09	164.49	0.255

Después de calcular los parámetros, se agregan las ecuaciones de los modelos seleccionados para estimar la radiación PAR, como se observa en la Tabla 4.5. De esta manera, en un solo archivo se cuenta con la información completa referente a las estimaciones de radiación PAR en cada estación. Al tener toda la información dentro de un solo archivo, la misma puede ser manipulada de manera sencilla para su posterior análisis.

Tabla 4.5 Registro de datos con las estimaciones de la radiación PAR calculadas con los seis modelos seleccionados.

k_t	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
0.078	2.310	2.128	1.817	1.749	1.583	1.962
0.095	13.644	13.219	10.902	10.197	10.464	11.772
0.298	69.933	67.772	61.778	47.367	55.114	66.71
0.255	87.733	86.4	76.314	59.769	70.773	82.407

4.3 Obtención de los valores máximos de radiación y de Q_p/R_s diarios

En el trimestre de pruebas se analizó el comportamiento de la radiación PAR con cada modelo, comparando los resultados diarios obtenidos con cada uno. Para ello, se utilizaron los resultados conseguidos a mediodía, ya que es la parte del día donde se obtienen los valores máximos de radiación.

La información recabada a mediodía se registra en un nuevo archivo, donde se calculan los valores máximos diarios de la relación Q_p/R_s para cada modelo. También se calculan los promedios trimestrales de los valores máximos diarios de Q_p y Q_p/R_s . De esta manera, se puede

observar de manera general su comportamiento trimestral. Las tablas 4.6 y 4.7 muestran un ejemplo de lo anterior.

Tabla 4.6 Ejemplo con los valores máximos diarios de radiación PAR extraídos del registro de datos.

Fecha	R_s	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
	Mediodía	Mediodía	Mediodía	Mediodía	Mediodía	Mediodía	Mediodía
01/04/2020	1168	2227.315	2331.266	2122.256	1582.402	2075.986	2291.692
02/04/2020	1051	2024.977	2059.407	1909.667	1469.563	1951.529	2063.303
• • •							
29/06/2020	1171	2277.01	2394.53	2127.707	1673.435	2222.84	2374.946
30/06/2020	1211	2346.762	2493.707	2200.387	1711.67	2263.873	2456.096
Promedio	1072.422	2078.259	2156.399	1948.591	1527.037	2031.516	2149.229

Tabla 4.7 Ejemplo del cálculo de la relación Q_p/R_s máxima a mediodía.

Q_p/R_s						
Fecha	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
01/04/2020	1.907	1.996	1.817	1.355	1.777	1.962
02/04/2020	1.927	1.959	1.817	1.398	1.857	1.963
03/04/2020	1.892	1.974	1.817	1.357	1.758	1.964
• • •						
28/06/2020	1.929	2.066	1.817	1.399	1.836	2.028
29/06/2020	1.945	2.045	1.817	1.429	1.898	2.028
30/06/2020	1.938	2.059	1.817	1.413	1.869	2.028
Promedio	1.941	2.011	1.817	1.427	1.899	2.004

Luego de calcular los promedios máximos diarios en las seis estaciones seleccionadas, todos los resultados se colocan en una tabla para observar el comportamiento de las estimaciones con cada modelo durante el trimestre, como se observa en las tablas 4.8 y 4.9.

Tabla 4.8 Comportamiento trimestral de Q_p máxima diaria.

Promedios de R_s y Q_p de los modelos al mediodía							
Estación	R_s	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Chihuahua ob.	1072.42	2078.26	2156.4	1948.59	1527.04	2031.52	2149.23
Cd. Juárez	1067.64	2069.41	2136.66	1939.91	1519.55	2022.06	2134.39
Durango	1034.21	2016.96	2075.56	1879.17	1488.38	1990.87	2074.06
La Flor	973.37	1917.81	1939.25	1768.62	1401.58	1869.04	1949.47
Saltillo	1095.93	2130.59	2191.46	1979.94	1551.33	2064.8	2183.52
PNegras	1035.8	2045.77	2085.41	1882.05	1478.53	1968.62	2076.7
Promedio	1046.56	2043.13	2097.46	1899.71	1494.4	1991.15	2094.56

Tabla 4.9 Comportamiento trimestral de Q_p/R_s máxima diaria.

Promedios de R_s/Q_p de los modelos al mediodía						
Estación	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Chihuahua ob.	1.938	2.011	1.817	1.424	1.894	2.004
Cd. Juárez	1.938	2.001	1.817	1.423	1.894	1.999
Durango	1.950	2.007	1.817	1.439	1.925	2.005
La Flor	1.970	1.992	1.817	1.440	1.920	2.003
Saltillo	1.944	2.000	1.817	1.416	1.884	1.992
PNegras	1.975	2.013	1.817	1.427	1.901	2.005
Promedio	1.953	2.004	1.817	1.428	1.903	2.001

Luego de obtener el comportamiento de la radiación PAR con los modelos en el trimestre de prueba, el siguiente paso es medir la radiación con un sensor cuántico para validarlos.

4.4 Mediciones físicas de radiación PAR para el trimestre de prueba

Para la validación de los modelos en el trimestre de pruebas, se utilizó un periodo pequeño de mediciones de radiación PAR con un sensor cuántico.

Las mediciones se tomaron dentro de las instalaciones de la estación meteorológica denominada Chihuahua ob., a aproximadamente 15 metros de distancia de la estación propiamente dicha y fueron tomadas el 29 de junio del 2020 con un sensor cuántico de la marca LI-COR modelo LI-190R. Las mediciones del sensor se compararon con las estimaciones de los seis modelos seleccionados el mismo día, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.10 Comparación entre estimaciones y mediciones físicas de radiación PAR el 29 de junio del 2020 (los resultados están dados en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Fecha UTC	Sensor	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
29/06/2020 16:40	1720.1	1633.95	1675.96	1517.19	1211.06	1598.49	1693.49
29/06/2020 16:50	1765.13	1690.67	1736.34	1569.89	1253.01	1656.28	1752.31
29/06/2020 17:00	1814.66	1737.09	1786.15	1613.5	1288.53	1705.97	1800.98
29/06/2020 17:10	1864.19	1784.71	1836.14	1657.1	1323.62	1754.76	1849.66

De la tabla se puede asumir que, a pesar de haber diferencias entre las mediciones físicas y las estimaciones de radiación PAR, todas mantienen un comportamiento similar, siendo la excepción el Modelo 4 que tuvo valores muy por debajo de los demás. De esta manera, se comprueba que todos los modelos seleccionados (exceptuando el Modelo 4) son válidos dentro de la Mesa del Norte.

Sabiendo esto, los modelos pueden utilizarse para estimar la radiación PAR en el periodo comprendido entre abril del 2020 y junio del 2021 (incluido el trimestre de prueba). El tener un año completo de estimaciones permite analizar de manera plena el comportamiento de la radiación PAR en la Mesa del Norte de México.

4.5 Selección de estaciones meteorológicas para el periodo completo de mediciones

La selección de las estaciones pertenecientes a la CONAGUA se realizó teniendo en cuenta su distribución dentro de la Mesa del Norte. Uno de los criterios utilizados para elegir las estaciones fue escoger las que estuvieran en la capital de cada estado, o en su defecto, la más cercana a ella; otro criterio fue seleccionar estaciones ubicadas en lugares que permitan tener

una cobertura completa de la Mesa del Norte, así se tiene conocimiento completo de las condiciones climatológicas durante el periodo de medición. Al pertenecer a una agencia de gobierno, las estaciones meteorológicas de la CONAGUA deben cumplir con las especificaciones técnicas descritas en las Normas Mexicanas NMX-AA-166/1-SCFI-2013 y NMX-AA-166/2-SCFI-2015 [69, 70]. La Tabla 4.11 muestra la información geográfica de las estaciones seleccionadas.

Tabla 4.11 Información geográfica de las estaciones seleccionadas en la Mesa del Norte de México.

Estado	Municipio	Nombre	Latitud [N]	Longitud [W]	Elevación [m]
Chihuahua	Chihuahua	CHIHUAHUA ob.	28°40'14"	106°1'49"	1433
Chihuahua	Ciudad Juárez	CD. JUÁREZ	31°41'22"	106°25'37"	1127
Chihuahua	Cuauhtémoc	CD. CUAUHEMOC	28°23'48"	106°50'21"	2102
Chihuahua	Jiménez	JIMENEZ, CHI.	27°06'39"	104°54'25"	1360
Chihuahua	Ojinaga	OJINAGA	29°32'03"	104°28'07"	790
Coahuila	Saltillo	SALTILLO	25°22'35"	101°1'0"	1789
Coahuila	Piedras Negras	PNEGRAS	28°40'59"	100°34'0"	205
Coahuila	Cuatro Ciénegas	CUATRO CIENEGAS	27°00'08.0"	102°04'21"	556
Coahuila	Candela	CANDELA	26°50'40"	100°39'40"	430
Coahuila	Monclova	MONCLOVA	26°54'01.0"	101°26'02"	615
Coahuila	San Juan de Sabinas	NUEVA ROSITA	27°55'12.0"	101°19'48"	366
Coahuila	Ocampo	OCAMPO	28°49'31.0"	102°31'30"	1662
Durango	Durango	DURANGO	24°5'40"	104°35'58"	1871
Durango	Mapimí	LA FLOR	26°32'58"	103°59'58"	1164
Durango	San Juan de Guadalupe	SN. JUAN DE GPE.	24°38'15.0"	102°46'58"	1526
Durango	Villa Ocampo	VILLA OCAMPO	26°26'26.0"	105°30'09"	1657
Zacatecas	Zacatecas	ZACATECAS	22°46'42.0"	102°33'59"	2616
Zacatecas	Guadalupe	ZACATECAS*	22°44'48.0"	102°30'22"	2270
Zacatecas	Valparaíso	LA FLORIDA	22°41'10.0"	103°36'09"	1870
Aguascalientes	Calvillo	CALVILLO	21°50'57.0"	102°42'44"	1618

Tabla 4.11 Información geográfica de las estaciones seleccionadas en la Mesa del Norte de México (continuación).

Aguascalientes	San José de Gracia	SIERRA FRIA	22°16'11.0"	102°36'31"	2976
San Luis Potosí	Villa de Reyes	GOGORRON	21°48'40.0"	100°56'24"	1809
San Luis Potosí	Matehuala	MATEHUALA	23°38'51.0"	100°39'27"	1627
Nuevo León	Monterrey	EL DIENTE	25°34'36.8"	100°18'30"	734
Nuevo León	Montemorelos	MONTEMORELOS	25°11'12.1"	99°48'22"	398

* Para diferenciar entre ambas estaciones de Zacatecas, cuando se haga referencia a esta estación se le nombrará Zacatecas 2.

Para tener una mejor visualización de las estaciones seleccionadas, en el mapa de la Figura 4.7 se resalta la ubicación geográfica de las mismas. Se observa una distribución uniforme dentro del territorio que comprende la Mesa del Norte de México.

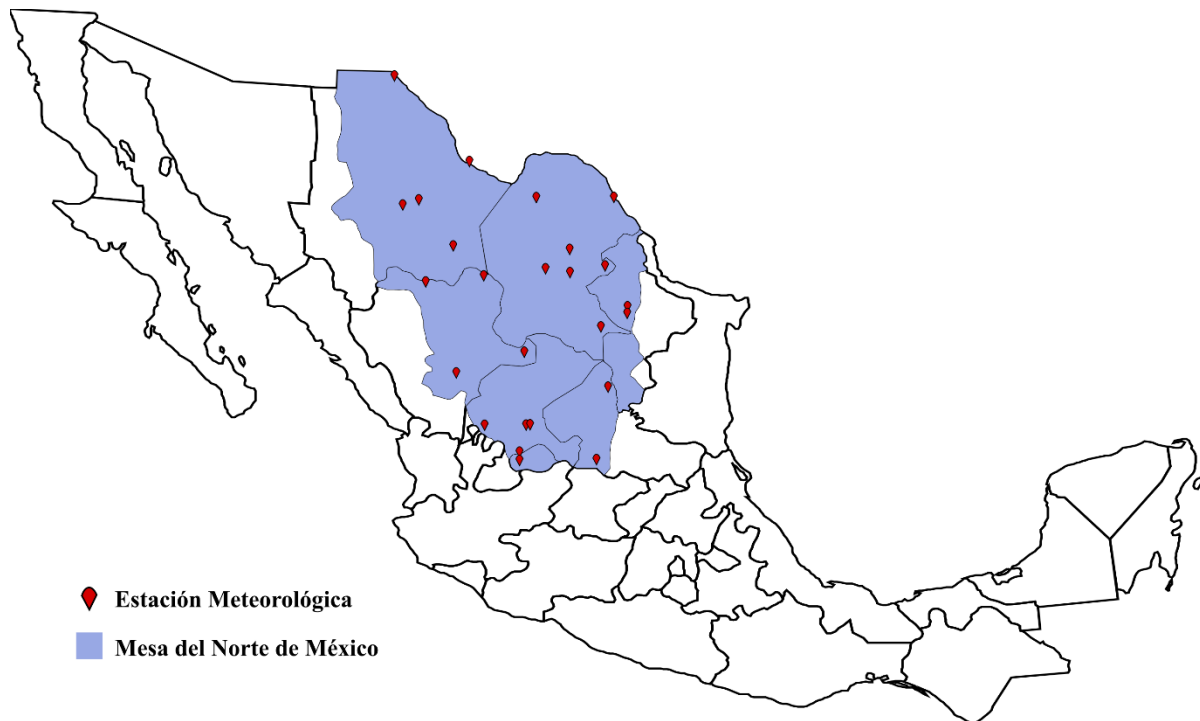


Figura 4.2 Distribución de las estaciones seleccionadas en la Mesa del Norte de México.

4.6 Análisis de la radiación durante el trimestre abril – junio del 2020

Como se mencionó al inicio del capítulo, el trimestre abril – junio del 2020 sirvió de prueba para analizar la viabilidad de los modelos seleccionados en la Mesa del Norte. Para ello, se seleccionaron solamente las estaciones mostradas en la Tabla 4.1.

En este primer trimestre de mediciones, el comportamiento de la radiación solar (R_s) a mediodía se dio de la siguiente manera:

- R_s máxima se obtuvo en Saltillo con un promedio de 1095.93 W/m^2 .
- Los valores mínimos se obtuvieron en La Flor, con un promedio de 973.37 W/m^2 .

En cuanto a la radiación PAR (Q_p), el comportamiento a mediodía fue el siguiente:

- Los valores máximos de Q_p se obtuvieron con el Modelo 2, promediando $2191.46 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ en la estación Saltillo.
- Los valores mínimos se obtuvieron en La Flor con el Modelo 3 y un promedio de $1768.62 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.
- En comparación, los valores máximos y mínimos obtenidos con el Modelo 4 fueron de $1551.33 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ en Saltillo y $1401.58 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ en La Flor.
- Los promedios generales de Q_p con cada modelo fueron, respectivamente, $2043.13 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $2097.46 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1899.71 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1494.4 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1991.15 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ y $2094.56 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.

Teniendo en cuenta que el Modelo 3 es una simple relación entre Q_p y R_s , para la relación Q_p/R_s a mediodía los resultados trimestrales fueron:

- Los valores máximos se obtuvieron en la estación PNegras con el Modelo 2 y un promedio de $2.013 \mu\text{mol /J}$, mientras que los valores mínimos se dieron con el Modelo 5 en la estación Saltillo con un promedio de $1.884 \mu\text{mol /J}$.
- Los valores máximos y mínimos obtenidos con el Modelo 4 fueron de 1.44 y $1.416 \mu\text{mol /J}$ en La Flor y Saltillo.

Los promedios generales con cada modelo fueron: 1.953 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 2.004 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.817 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.428 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.903 $\mu\text{mol}/\text{J}$ y 2.001 $\mu\text{mol}/\text{J}$, respectivamente.

Además de los tres parámetros mencionados, se calcularon también los promedios diarios mensuales de Q_p estimada con cada modelo. El comportamiento trimestral fue el siguiente:

- El valor máximo fue 51.64 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, obtenido en Cd. Juárez con el Modelo 6.
- El valor mínimo fue 36.96 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, se obtuvo con el Modelo 3 en PNegras.
- Con el modelo 4 el valor mínimo fue 29.71 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en PNegras y el máximo fue 37.16 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en La Flor.

Los promedios trimestrales diarios Q_p con cada modelo en todas las estaciones fueron 46.45 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 47.04 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 42.79 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 34.1, 45 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y 47.2 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.

4.7 Análisis de la radiación en el trimestre julio – septiembre del 2020

Este es el primer trimestre luego del periodo de prueba. En él se seleccionaron 22 estaciones, cubriendo prácticamente en su totalidad la superficie de la Mesa del Norte. Cuatro de las estaciones elegidas contaban con periodos de tiempo sin registro de lecturas, por lo tanto, se utilizó interpolación para obtener el comportamiento trimestral de los parámetros estudiados.

El valor de R_s tuvo el siguiente comportamiento trimestral a mediodía:

- Los valores máximos promediaron 1132.56 W/m^2 en la estación Zacatecas 2.
- Los valores mínimos promediaron 736.58 W/m^2 en la estación Gogorrón.
- El promedio general de la radiación solar fue de 1010.75 W/m^2 .

El comportamiento a mediodía de Q_p durante el trimestre fue el siguiente:

- Los valores máximos se obtuvieron con el Modelo 2 en la estación Zacatecas 2, con un promedio de 2307.41 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, mientras que los valores mínimos se obtuvieron con el Modelo 3 en la estación Gogorrón, con un promedio de 1338.36 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

- Con el Modelo 4 los valores máximos y mínimos fueron de 1581.95 y 1093.55 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, obtenidos en Zacatecas 2 y Gogorrón respectivamente.
- Los promedios generales con cada modelo durante el trimestre fueron, respectivamente, 1984.39 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 2031.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1836.54 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1443.22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1920.13 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y 2025.83 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

La relación Q_p/R_s a mediodía se comportó de la siguiente manera durante el trimestre:

- Los valores máximos se obtuvieron con el Modelo 2 en Zacatecas 2 promediando 2.037 $\mu\text{mol}/\text{J}$.
- El promedio mínimo fue 1.844 $\mu\text{mol}/\text{J}$, obtenido en Zacatecas 2 con el Modelo 5.
- Con el modelo 4 los valores máximos y mínimos promediaron 1.485 y 1.397 $\mu\text{mol}/\text{J}$ en Gogorrón y Zacatecas 2.
- Los promedios generales con cada modelo fueron, respectivamente, 1.965 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 2.01 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.817 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.429 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.902 $\mu\text{mol}/\text{J}$ y 2.004 $\mu\text{mol}/\text{J}$.

Por último, el comportamiento diario trimestral de Q_p se dio de la siguiente manera:

- El valor máximo trimestral se obtuvo en Ojinaga con el Modelo 1 con un promedio de 50.68 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.
- El valor mínimo trimestral fue 25.14 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, obtenido con el Modelo 3 en la estación Gogorrón.
- El valor mínimo obtenido con el modelo 4 fue de 20.78 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en Gogorrón, mientras que el valor máximo fue de 36.76 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y se obtuvo en Ojinaga.

Los promedios trimestrales diarios con cada modelo fueron: 41.76 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 42.06 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 37.98 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 30.44 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 40.21 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y 41.9 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.

4.8 Análisis de la radiación en el trimestre octubre – diciembre del 2020

En este trimestre se utilizó la información de 23 estaciones. Dado que en la base de datos de la CONAGUA no se registró ningún tipo de información para la estación Durango durante el

trimestre, se seleccionó la estación meteorológica más cercana: La Florida (ubicada en Zacatecas). En los resultados obtenidos se puede observar un descenso en los valores debido al cambio en las condiciones climatológicas que se presentan en la entrada del otoño.

Los resultados de R_s al mediodía fueron los siguientes:

- El promedio trimestral máximo fue de 891.62 W/m^2 y se obtuvo en Sierra Fría, mientras que el valor mínimo fue de 586.04 W/m^2 obtenido en Gogorrón.
- El promedio general de las 23 estaciones fue de 776.65 W/m^2 .

El comportamiento de Q_p a mediodía se dio de la siguiente manera:

- Los valores máximos se obtuvieron con el Modelo 6 con un promedio de $1713.83 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ en la estación Sierra Fría.
- Los valores mínimos se obtuvieron en Gogorrón con el Modelo 3 y con un promedio de $1064.84 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.
- El promedio máximo con el Modelo 4 fue $1211.5 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ obtenido en Sierra Fría, mientras que el promedio mínimo fue $831.14 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ en Gogorrón.
- Los promedios trimestrales obtenidos con cada modelo fueron: $1498.3 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1476.55 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1411.18 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1063.96 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1396.17 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ y $1492.01 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.

La relación Q_p/R_s a mediodía durante el último trimestre del año se comportó como se muestra a continuación:

- El valor máximo se obtuvo en Gogorrón con el Modelo 1 con $2.0 \mu\text{mol/J}$ y el valor mínimo fue obtenido con el Modelo 5 en la estación Ocampo con un promedio de $1.777 \mu\text{mol/J}$.
- Con el Modelo 4 el valor máximo fue $1.418 \mu\text{mol/J}$ obtenido en Gogorrón, mientras que el valor mínimo lo compartieron dos estaciones (Zacatecas 2, La Florida) con $1.358 \mu\text{mol/J}$.

- Los promedios generales de la relación Q_p/R_s a medio día con cada modelo fueron 1.931 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.901 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.817 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.371 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.799 $\mu\text{mol}/\text{J}$ y 1.921 $\mu\text{mol}/\text{J}$.

El comportamiento diario trimestral de Q_p se dio de la siguiente manera:

- El promedio máximo se obtuvo con el Modelo 6 en la estación Zacatecas 2 con un valor de 43.96 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.
- El valor mínimo se obtuvo en Montemorelos con el Modelo 3 y un valor de 23.92 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.
- Con el modelo 4 el valor máximo fue 31.27 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en Zacatecas 2 y el valor mínimo fue 18.45 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en Montemorelos.
- Los promedios trimestrales con cada modelo fueron: 37.39 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 36.49 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 34.99 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 26.57 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 34.51 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y 37.03 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.

4.9 Análisis de la radiación en el trimestre enero – marzo del 2021

En el trimestre se utilizaron 22 estaciones. La estación Durango fue puesta en funcionamiento nuevamente en marzo, por lo que su información no se utilizó para el análisis. Al ser invierno durante la mayor parte del trimestre, los resultados obtenidos continúan siendo bajos; sin embargo, durante marzo se comienza a ver un aumento en los parámetros estudiados.

El valor de R_s a mediodía tuvo el siguiente comportamiento durante el trimestre:

- El promedio máximo fue 977.92 W/m^2 en la estación Zacatecas 2. El promedio mínimo fue 617.65 W/m^2 y se obtuvo en Gogorrón.
- El promedio general de la radiación solar en las 22 estaciones fue 833.26 W/m^2 .

El valor de Q_p a mediodía se comportó de la siguiente manera en el trimestre del 2021:

- El promedio máximo se obtuvo en la estación Zacatecas 2 con el Modelo 6 y un valor de 1880.81 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

- El promedio mínimo fue $1122.27 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, obtenido en Gogorrón con el Modelo 3.
- El promedio máximo con el Modelo 4 fue $1326.734 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ obtenido en Zacatecas 2 y el promedio mínimo fue $872.457 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ en Gogorrón.
- Los promedios trimestrales de la radiación PAR con cada modelo fueron $1598.35 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, $1593.08 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, $1514.03 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, $1140.61 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, $1501.46 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y $1601.45 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

El comportamiento de la relación Q_p/R_s a mediodía se dio de la siguiente manera:

- El promedio máximo se obtuvo con el Modelo 1 en Gogorrón y un valor de $1.988 \mu\text{mol}/\text{J}$. El promedio mínimo fue $1.763 \mu\text{mol}/\text{J}$, obtenido en Ocampo con el Modelo 5.
- El valor máximo obtenido con el Modelo 4 fue $1.413 \mu\text{mol}/\text{J}$ en Gogorrón y el valor mínimo fue $1.35 \mu\text{mol}/\text{J}$ y se obtuvo en Ocampo.
- Los promedios generales obtenidos con cada modelo fueron respectivamente $1.921 \mu\text{mol}/\text{J}$, $1.912 \mu\text{mol}/\text{J}$, $1.817 \mu\text{mol}/\text{J}$, $1.37 \mu\text{mol}/\text{J}$, $1.804 \mu\text{mol}/\text{J}$ y $1.922 \mu\text{mol}/\text{J}$.

Por último, Q_p diaria trimestral tuvo el comportamiento mostrado a continuación:

- El promedio máximo fue $46.94 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, obtenido en Zacatecas 2 con el Modelo 6.
- El promedio mínimo se obtuvo en El Diente con el Modelo 3 y un valor de $23.82 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.
- El valor máximo obtenido con el Modelo 4 fue $33.4 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y se obtuvo en Zacatecas 2, mientras que el valor mínimo fue $18.66 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ obtenido en El Diente.
- Los promedios diarios trimestrales con cada modelo fueron: $39.4 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, $38.84 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, $37.05 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, $28.17 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, $36.74 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y $39.21 \text{ mol}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.

4.10 Análisis de la radiación en el trimestre abril – junio del 2021

A pesar de que en el trimestre anterior se cumplió un año de mediciones, eso solo ocurrió para las seis estaciones seleccionadas para los tres meses de prueba. Por ello, se estimó la

radiación PAR en el periodo abril – junio del 2021 con el fin de tener un año completo de mediciones en todas las estaciones.

Para este trimestre se utilizaron 23 estaciones. Al ser ya la primavera, se pueden observar incrementos en el comportamiento de R_s , Q_p , Q_p/R_s y Q_p diaria.

R_s a mediodía tuvo el siguiente comportamiento trimestral:

- El promedio máximo de radiación solar fue 1163.49 W/m^2 de y se obtuvo en Zacatecas 2, mientras que el promedio mínimo fue 712.11 W/m^2 en Gogorrón.
- El promedio general de la radiación solar fue 1045.04 W/m^2 .

Q_p a mediodía se comportó de la siguiente manera durante el trimestre:

- El promedio máximo se obtuvo en Zacatecas 2 con el Modelo 2 y un valor de $2358.62 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.
- El promedio mínimo fue $1293.9 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ con el Modelo 3 en Gogorrón.
- El valor máximo con el Modelo 4 fue $1634.52 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ obtenido en Zacatecas 2, mientras que el valor mínimo se obtuvo en Gogorrón y fue $1059.28 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.
- Los promedios generales obtenidos con cada modelo fueron, respectivamente, $2036.61 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $2099.77 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1898.83 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1492.32 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, $1988.37 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ y $2093.27 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$.

La relación Q_p/R_s a mediodía tuvo el siguiente comportamiento:

- El promedio máximo se obtuvo en la estación Zacatecas 2 con el Modelo 2 y un valor de $2.027 \mu\text{mol /J}$, mientras que el promedio mínimo fue $1.862 \mu\text{mol /J}$ obtenido con el Modelo 5 en la misma estación.
- Con el Modelo 4 el valor máximo fue $1.488 \mu\text{mol /J}$ obtenido en Gogorrón y el valor mínimo fue $1.405 \mu\text{mol /J}$ y se obtuvo en Zacatecas 2.
- Los promedios generales de la relación Q_p/R_s fueron respectivamente $1.951 \mu\text{mol /J}$, $2.009 \mu\text{mol /J}$, $1.817 \mu\text{mol /J}$, $1.429 \mu\text{mol /J}$, $1.905 \mu\text{mol /J}$ y $2.003 \mu\text{mol /J}$.

Por último, los promedios trimestrales diarios de Q_p se comportaron de la siguiente manera:

- El promedio máximo se obtuvo con el Modelo 6 en la estación Nueva Rosita con un valor de $61.27 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$.
- El promedio mínimo fue $25.79 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$ obtenido con el Modelo 3 en la estación Gogorrón.
- El valor máximo del Modelo 4 fue de $44.52 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$ en Nueva Rosita, mientras que el valor mínimo fue $21.3 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$ y se obtuvo en Gogorrón.
- Los promedios trimestrales diarios obtenidos con cada modelo fueron $45.32 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$, $46 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$, $41.68 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$, $33.27 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$, $44 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$ y $45.93 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{d}$.

4.11 Análisis general de los parámetros estudiados durante el periodo de mediciones

Una vez analizados los cinco trimestres de manera individual, se muestra enseguida el análisis general del comportamiento a mediodía de R_s , Q_p , la relación Q_p/R_s y Q_p diaria mensual a lo largo del periodo de medición.

Para todos los parámetros los valores máximos se presentan en los meses de verano, mientras que los mínimos se presentan en los meses de invierno. A continuación, se presenta de manera individual el comportamiento de cada parámetro.

4.11.1 Análisis de R_s a mediodía

A lo largo del año, R_s a mediodía se mantiene entre los 938 (Gogorrón) y 1325 W/m^2 (Zacatecas 2) para los valores máximos, mientras que los valores mínimos están entre los 267 (Gogorrón) y 613 W/m^2 (Zacatecas 2). En los meses de verano se encuentran los valores más altos de R_s y en invierno se encuentran los más bajos.

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran el comportamiento de R_s durante el año de mediciones para las estaciones donde se obtuvieron los valores más bajos y los más altos. Los puntos azules representan las lecturas registradas a mediodía durante el año, y la curva de ajuste representa la tendencia de la radiación a lo largo del año.

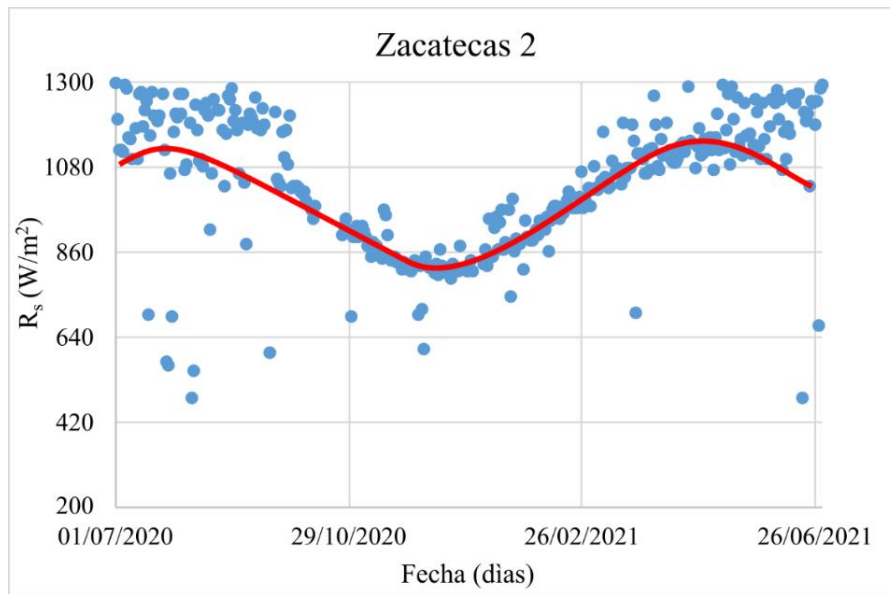


Figura 4.3 Comportamiento de la radiación solar en la estación Zacatecas 2.

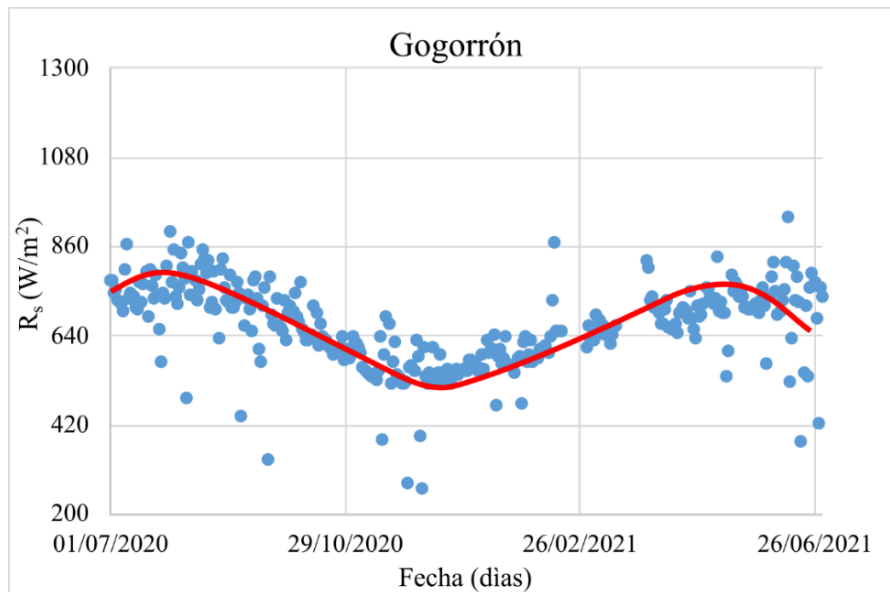


Figura 4.4 Comportamiento de la radiación solar en la estación Gogorrón.

Como se observa, la radiación solar mantiene un comportamiento bastante regular y cíclico a lo largo del año. También se aprecia que existe un número bajo de lecturas anómalas que puede deberse a diferentes motivos, por ejemplo, a errores en las lecturas del sensor causadas por objetos externos interfiriendo en su campo de visión o a errores propios del sensor.

En la estación Gogorrón también se presentan algunos valores de radiación anómalos durante el año, sin embargo, su número es muy bajo, lo que implica que no tiene un gran efecto en el comportamiento anual de R_s . La estación Gogorrón, al igual que las dos estaciones de Nuevo León, se ubica cerca de la Sierra Madre Oriental, provocando que en esas tres estaciones se presenten los valores más bajos de radiación solar a lo largo del año.

Para visualizar con mayor claridad el comportamiento cíclico de la radiación solar, la Figura 4.5 muestra la radiación observada a medio día en la estación Chihuahua ob. durante el año completo de mediciones, además del trimestre de prueba. Se puede observar que en el trimestre abril – junio de ambos años (2020 y 2021) los valores de radiación son similares, lo que demuestra el comportamiento cíclico a lo largo de los años.

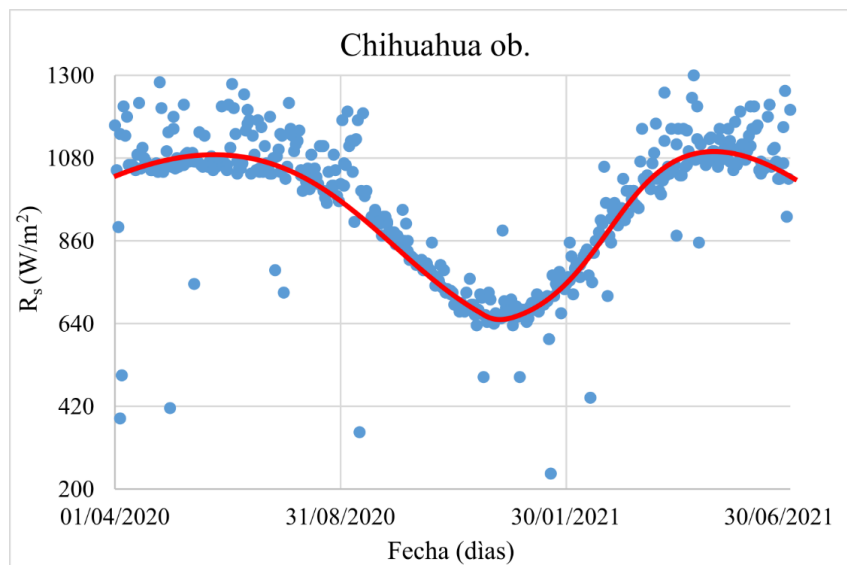


Figura 4.5 Visualización del comportamiento cíclico de la radiación solar en la estación Chihuahua ob.

Al igual que en las estaciones Zacatecas 2 y Gogorrón, se aprecian los valores anómalos que aparecen a lo largo del año. Sin embargo, también se observa que dichos valores no afectan el comportamiento anual de la radiación. La Figura 4.6 muestra el promedio de R_s obtenida a mediodía en cada estación a lo largo del periodo de medición:

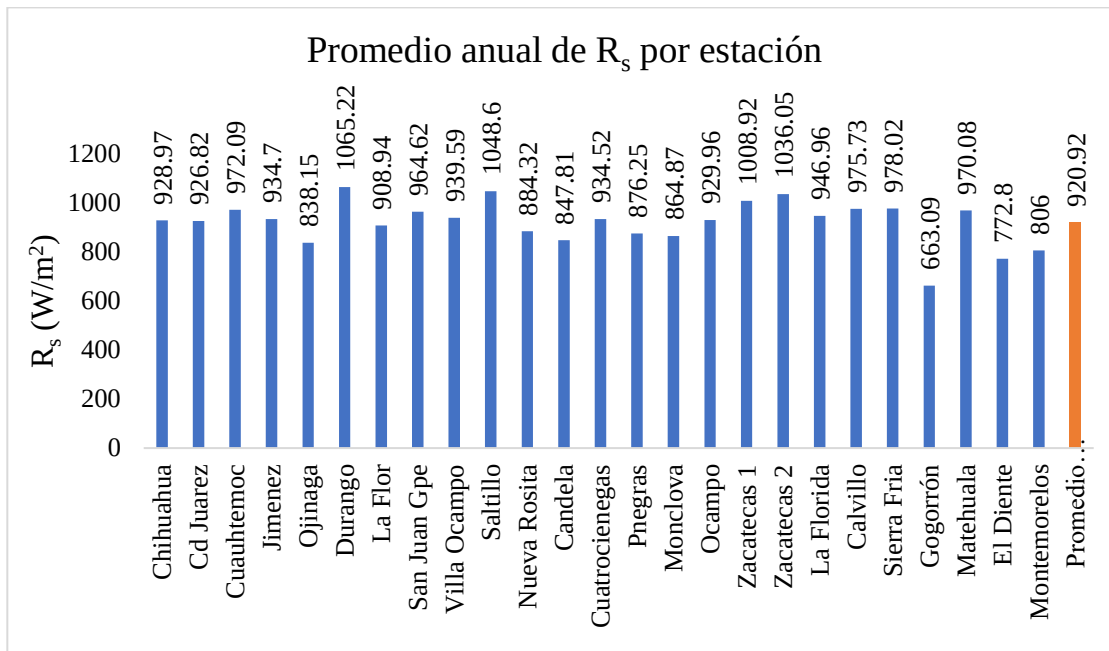


Figura 4.6 Promedio anual de R_s en cada estación, incluido el promedio general de todas las estaciones.

El promedio anual más alto se obtuvo en la estación Durango y el más bajo en Gogorrón. En general, las estaciones más cercanas a la Sierra Madre Oriental contaron con los promedios más bajos y solamente cuatro estaciones tuvieron un promedio anual mayor a los $1000 W/m^2$, pero todas, con excepción de las ubicadas al este, reflejaron promedios mayores a $800 W/m^2$. La media general de todas las estaciones fue de $920.92 W/m^2$.

4.11.2 Análisis de Q_p a mediodía

A lo largo del año de mediciones los valores máximos de Q_p a mediodía variaron entre los 1806.26 (Gogorrón) y $2719.6 \mu mol/m^2 \cdot s$ (Zacatecas 2) con el Modelo 2, mientras que los valores mínimos fueron desde los 485.14 hasta $1131.82 \mu mol/m^2 \cdot s$ con el Modelo 3. El promedio general de Q_p para todas las estaciones con cada modelo seleccionado de la literatura fue respectivamente: 1788.18 , 1812.19 , 1673.19 , 1291.59 , 1715.93 y $1812.32 \mu mol/m^2 \cdot s$.

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran el comportamiento de Q_p a lo largo del año para las estaciones Zacatecas 2 y Gogorrón. Los puntos azules representan las lecturas registradas a mediodía durante el año, y la curva de ajuste representa la tendencia de Q_p en el mismo lapso de tiempo.

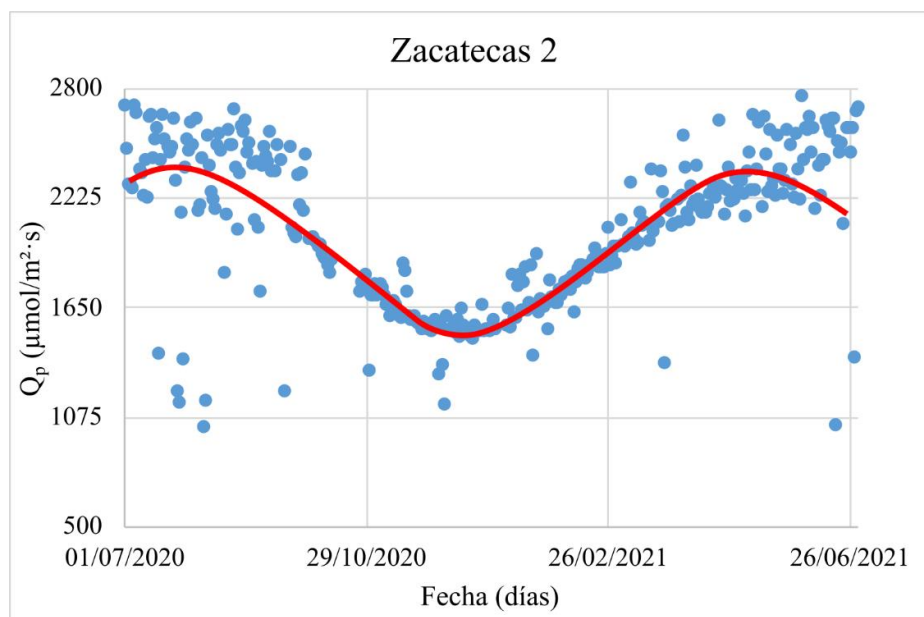


Figura 4.7 Q_p anual a mediodía para la estación Zacatecas 2.

En la figura anterior se observa el comportamiento cíclico que mantiene Q_p anualmente en la estación Zacatecas 2, estación donde se encontraron los valores máximos de Q_p a lo largo del año. Al igual que R_s , se observan también los datos que tienen un comportamiento anómalo.

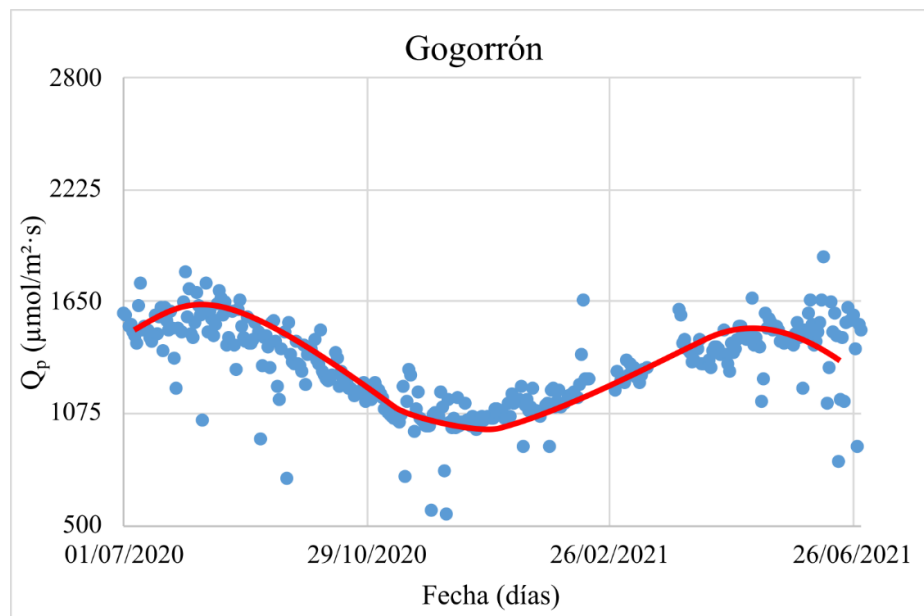


Figura 4.8 Q_p anual a mediodía para la estación Gogorrón.

Para la estación Gogorrón se puede observar también el comportamiento cíclico de Q_p , sin embargo, la curva es menos pronunciada que en la estación Zacatecas 2 debido a las diferencias entre los valores mínimos y los máximos.

4.11.3 Análisis de la relación Q_p/R_s a mediodía

Una vez que se tienen los análisis de R_s y Q_p a mediodía, se puede analizar el comportamiento anual de la relación Q_p/R_s . Lo primero a mencionar es que, los valores máximos se siguieron obteniendo en la estación Zacatecas 2, pero, a diferencia de los análisis anteriores, los valores mínimos no se dieron en la estación Gogorrón, sino en la estación Ocampo.

El promedio general de la relación Q_p/R_s para todas las estaciones con cada modelo fue respectivamente: 1.942, 1.968, 1.817, 1.402, 1.863 y 1.967 $\mu\text{mol/J}$. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el comportamiento de Q_p/R_s a lo largo del año para las estaciones Zacatecas 2 y Ocampo. Los puntos azules representan los valores calculados a mediodía durante el año, y la curva de ajuste representa la tendencia de Q_p/R_s a lo largo del año.

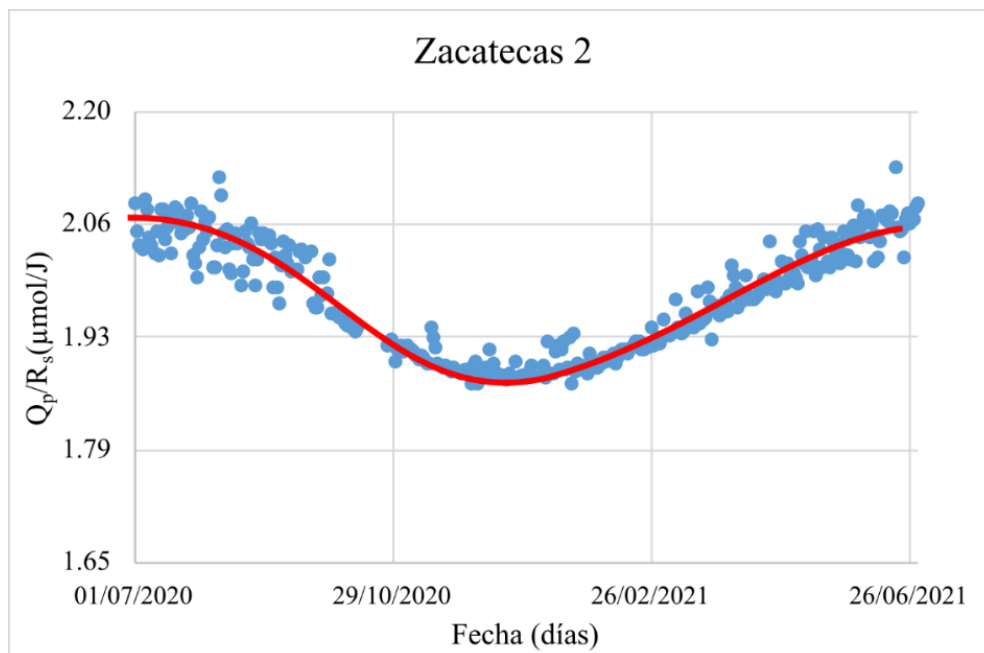


Figura 4.9 Comportamiento anual de Q_p/R_s para la estación Zacatecas 2 con el Modelo 2.

En la estación Zacatecas 2, el valor máximo de Q_p/R_s a mediodía con el Modelo 2 fue 2.134 $\mu\text{mol/J}$ en junio del 2021 y el mínimo fue 1.869 $\mu\text{mol/J}$ en diciembre del 2020, mientras que el promedio general fue 1.972 $\mu\text{mol/J}$.

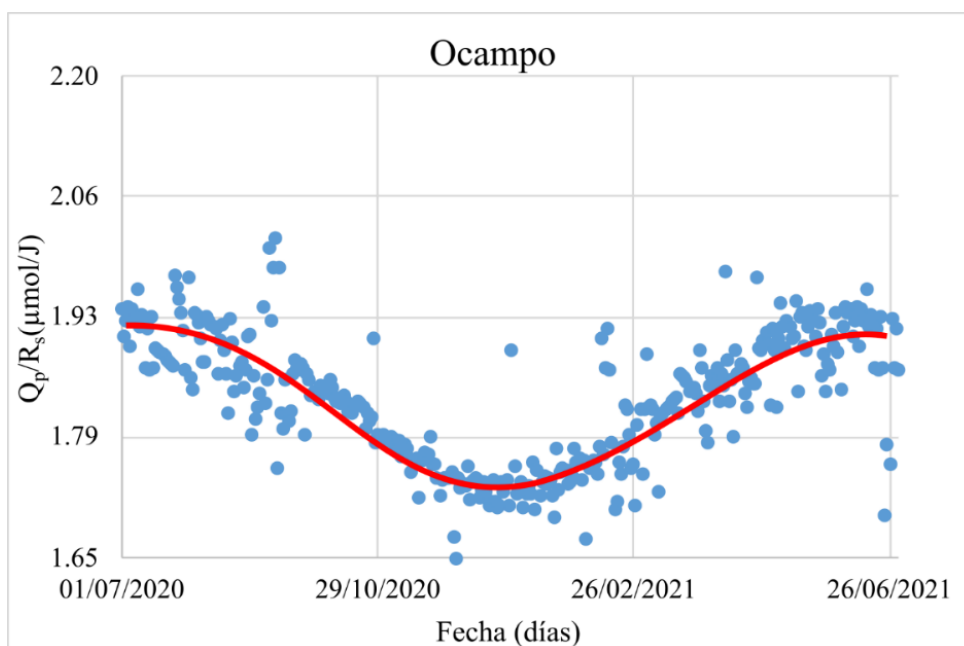


Figura 4.10 Comportamiento anual de Q_p/R_s para la estación Ocampo con el Modelo 5.

Lo primero que se puede notar de la estación Ocampo es que hay un mayor número de datos con comportamiento anómalo a lo largo del año de mediciones, sin embargo, se sigue observando de manera clara el comportamiento cíclico de Q_p/R_s . Sin contar los datos anómalos, para esta estación el valor máximo con el Modelo 5 fue 2.016 $\mu\text{mol/J}$ en septiembre del 2020, mientras que el valor mínimo fue 1.652 $\mu\text{mol/J}$, obtenido en diciembre del 2020; el promedio anual de la relación Q_p/R_s fue 1.832 $\mu\text{mol/J}$.

4.11.4 Análisis de Q_p diaria mensual

El último parámetro por analizar es Q_p diaria mensual. Al contrario de los tres análisis anteriores, aquí se muestra el comportamiento trimestral. El promedio trimestral máximo registrado se obtuvo en Nueva Rosita de abril a junio del 2021 con el Modelo 6 y su valor fue

61.27 mol/m²·d, mientras que el promedio mínimo registrado se obtuvo en el trimestre enero – marzo del 2021 en El Diente con el Modelo 3 y un valor de 23.35 mol/m²·d.

La Figura 4.11 muestra el comportamiento diario mensual obtenido con el Modelo 6 en la estación Nueva Rosita. Se observa que en los meses de invierno se tienen los valores más bajos, mientras que en los meses de verano se tienen los valores más altos.

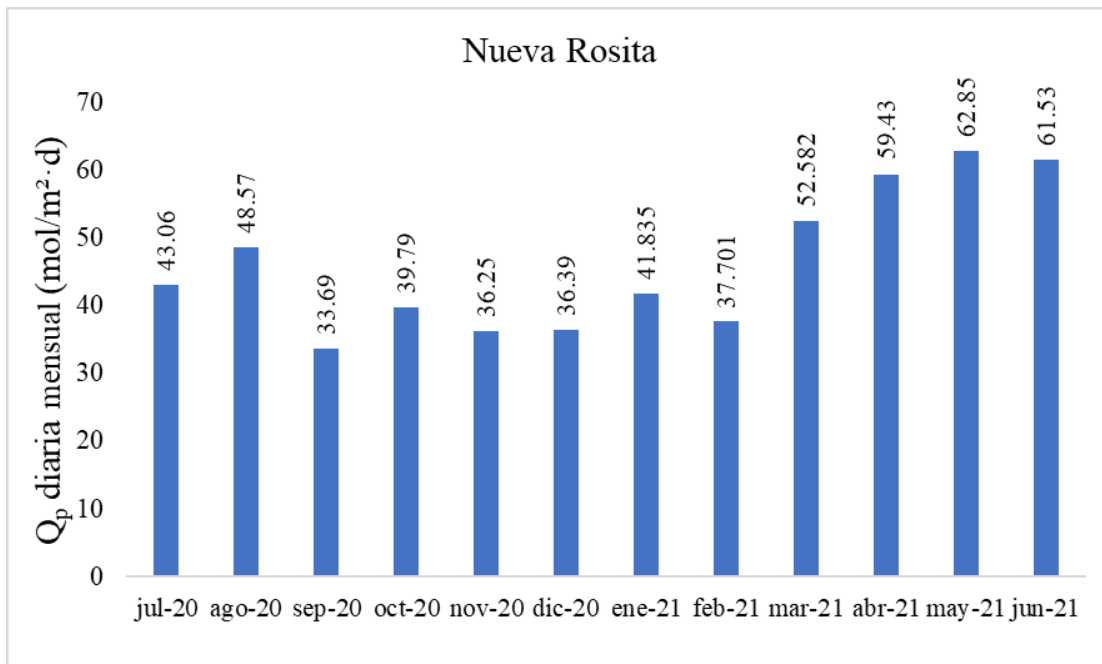


Figura 4.11 Comportamiento anual de Q_p diaria mensual para la estación Nueva Rosita con el Modelo 6.

La Figura 4.12 muestra el comportamiento diario mensual obtenido con el Modelo 3 en El Diente. Se observa que los valores mensuales no sufren cambios drásticos a lo largo del año, sin embargo, en invierno se siguen teniendo los valores más bajos y en verano los más altos.

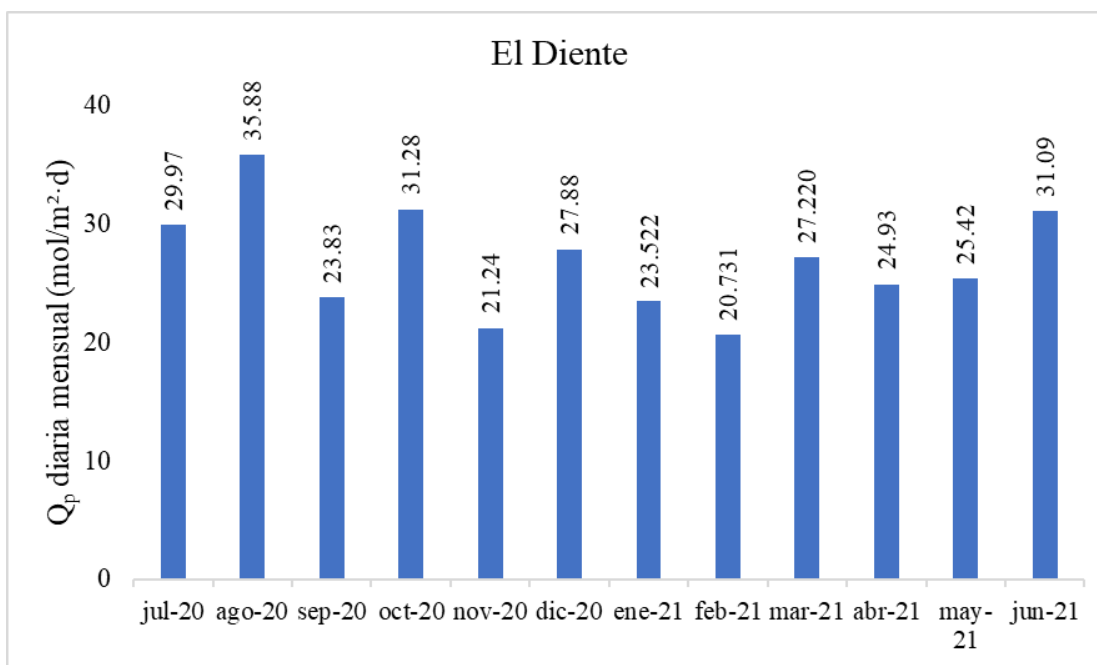


Figura 4.12 Comportamiento anual de Q_p diaria mensual para la estación El Diente con el Modelo 3.

Conociendo el comportamiento de la radiación PAR a lo largo del año con los modelos seleccionados, y teniendo su clasificación conforme a su rendimiento, el siguiente paso es desarrollar modelos de estimación propios basados en la información meteorológica recopilada en las diferentes estaciones a lo largo del periodo de mediciones.

V. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN PAR PROPUESTOS

Este capítulo muestra el desarrollo de los modelos particulares de cada estación a partir de la información meteorológica recopilada durante el periodo de mediciones. Se muestra también el desarrollo de un modelo general para la Mesa del Norte de México basado en los modelos particulares de cada estación.

5.1 Clasificación de los modelos de la literatura según su rendimiento

Debido a la imposibilidad de adquirir y colocar sensores cuánticos en cada estación durante el periodo de medición, se colocó un sensor cuántico de la marca LI-COR modelo LI-190R en las instalaciones de la estación Chihuahua ob. al mediodía del 29 de junio del 2020, con el objetivo de tomar mediciones con él y compararlas con las estimaciones obtenidas en ese mismo periodo de tiempo con los seis modelos seleccionados.

La Tabla 5.1 muestra el error cuadrático medio (RMSE) y el error relativo obtenidos con los seis modelos, comparados con las mediciones del sensor cuántico.

Tabla 5.1 Comparación del rendimiento de los modelos contra las mediciones del sensor cuántico en la estación Chihuahua ob.

	RMSE ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Error relativo (%)
Modelo 1	87.03	4.33
Modelo 2	43.26	1.48
Modelo 3	216.94	11.19
Modelo 4	560.32	29.09
Modelo 5	114.86	5.87
Modelo 6	34.54	1

De acuerdo con lo observado en la tabla, el modelo con el mejor rendimiento fue el Modelo 6, con un RMSE de $34.54 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, seguido de los Modelos 2, 1, 5 y 3; finalmente, y como se esperaba según los resultados de las estimaciones a lo largo del año de mediciones, el modelo con el peor rendimiento fue el Modelo 4, con un RMSE $560.32 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

De esta manera, a pesar de no contar con mediciones físicas de radiación PAR para cada estación, se pueden desarrollar estimaciones basadas en el modelo con mayor rendimiento, es decir, el Modelo 6, y además tener una aproximación bastante cercana al comportamiento real de la radiación PAR en los sitios donde se obtuvieron los modelos.

5.2 Desarrollo de los modelos particulares de estimación

Para el desarrollo de los modelos particulares se siguió la metodología utilizada con más frecuencia en los trabajos existentes en la literatura relativa al tema [17, 22 – 25]. Debido a que el desarrollo de todos los modelos siguió la misma metodología, en este documento se muestra únicamente el proceso llevado a cabo para la estación Chihuahua ob.

Para desarrollarlos, se tomaron como base los resultados obtenidos del Modelo 6, ya que este tuvo el mejor rendimiento al estimar la radiación PAR en comparación a las mediciones de un sensor cuántico. Esto se realizó conforme a los resultados mostrados en la Tabla 5.1.

El índice de claridad del cielo (k_t) se utiliza, de manera general, como indicador de los procesos de absorción y esparcimiento producidos por los gases, nubes y aerosoles que intervienen en la transmisión de la radiación a través de la atmósfera [71]. Por ello, es un parámetro principal en el desarrollo de los modelos de estimación de radiación PAR. La Figura 5.1 muestra la radiación PAR (Q_p) como función del ángulo cenital solar (θ), donde se observa que para un intervalo dado de k_t , Q_p aumenta de manera exponencial con el coseno de θ .

Al analizar el comportamiento de Q_p en cada estación meteorológica, se observa que es similar al mostrado en la Figura 5.2, por lo que se puede utilizar una metodología similar a la existente en la literatura para desarrollar los modelos dentro de la Mesa del Norte.

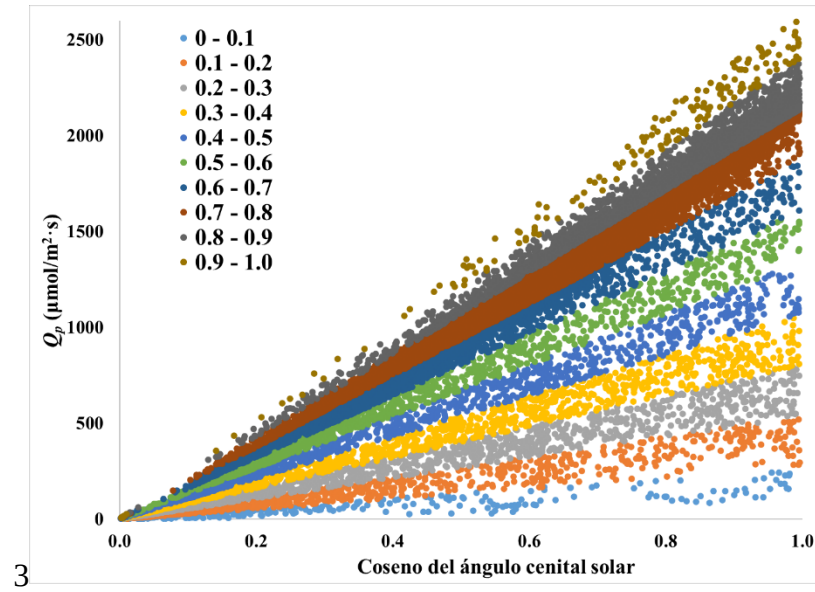


Figura 5.1 Q_p como función del coseno del ángulo cenital solar de acuerdo con los cálculos comprendidos entre abril del 2020 y marzo del 2021 en la estación Chihuahua ob.

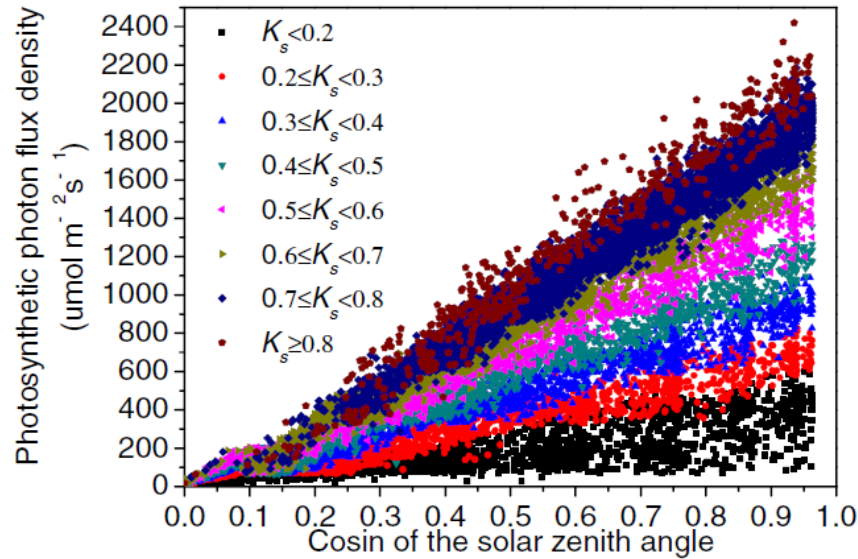


Figura 5.2 Q_p como función del coseno del ángulo cenital solar de acuerdo con los resultados obtenidos por Hu & Wang [23].

Es posible describir de manera clara la relación entre Q_p , k_t y el coseno del ángulo cenital solar (μ) mediante el uso de una ecuación de ley potencial (Power Law Equation). Una ecuación de este tipo permite observar la dependencia de la radiación PAR máxima (Q'_p) con k_t [71].

La radiación PAR puede ser calculada con una ecuación de ley potencial como la siguiente:

$$Q_p = Q'_p \times \mu^b \quad (5.1)$$

donde Q'_p representa el valor máximo de radiación PAR en un intervalo dado de k_t y b es un parámetro de ajuste que muestra cómo cambia Q_p con respecto a μ .

Para analizar y poder observar la relación entre Q'_p y k_t , los resultados de las estimaciones de Q_p con el Modelo 6 (en promedio 20000 datos por estación) deben reordenarse de acuerdo con los incrementos de k_t , comenzando en cero y terminando en uno, y avanzando en pasos de 0.01. De cada intervalo de k_t se extrae el valor máximo de Q_p para obtener una gráfica como la mostrada en la siguiente figura:

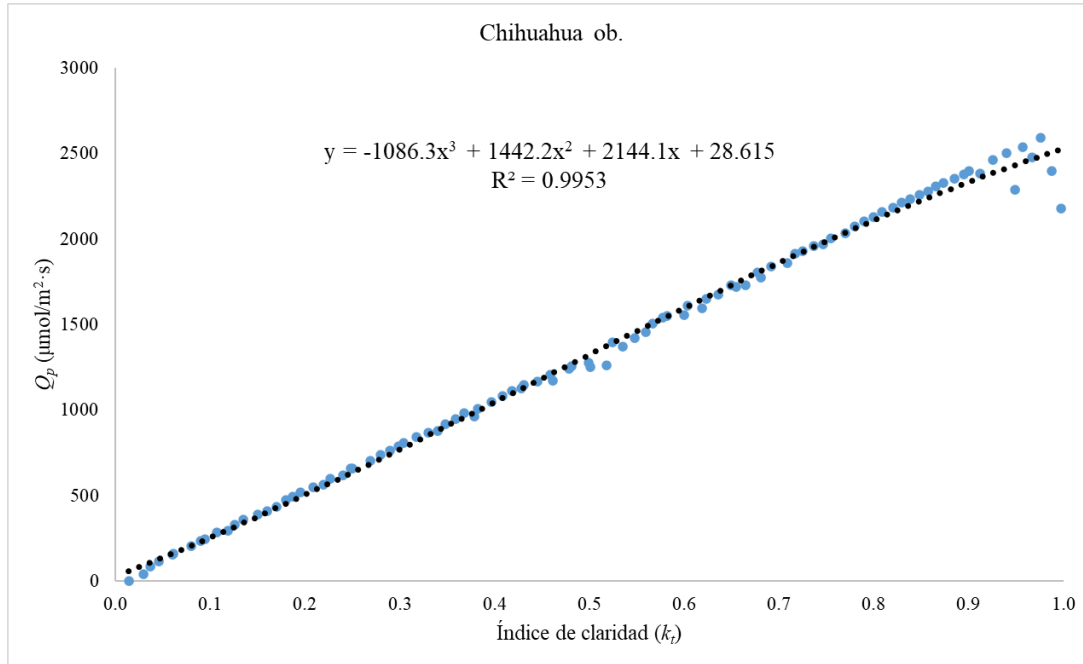


Figura 5.3 Q_p máxima (Q'_p) como función del índice de claridad (k_t) en la estación Chihuahua ob.

A partir de los puntos k_t , Q'_p , se obtiene una ecuación de ajuste entre ambas variables como la mostrada en la Figura 5.3.

$$Q'_p = 28.615 + 2144.1k_t + 1442.2k_t^2 - 1086.3k_t^3 \quad (5.2)$$

Al sustituir (5.2) dentro de (5.1) se obtiene la siguiente ecuación.

$$Q_p = 28.615 + 2144.1k_t + 1442.2k_t^2 - 1086.3k_t^3 \times \mu^b \quad (5.3)$$

El último paso para obtener el modelo es ajustar el exponente de μ (parámetro b). Para ajustar su valor, se utiliza un método de mínimos cuadrados con valores comenzando en 1, mientras se calcula el error cuadrático medio (RMSE) con respecto a las estimaciones del Modelo 6. Después del análisis, para el caso mostrado (estación Chihuahua ob.), el mejor ajuste del parámetro b es 0.976, quedando el modelo de la siguiente manera:

$$Q_p = 28.615 + 2144.1k_t + 1442.2k_t^2 - 1086.3k_t^3 \times \mu^{0.988} \quad (5.4)$$

Como se puede observar en la Figura 5.3, la relación entre Q'_p y k_t mantiene un comportamiento similar al de una recta, por lo que podría ser descrita mediante una ecuación de ajuste de primer grado. Sin embargo, para este trabajo se decidió utilizar ecuaciones de tercer grado, con la finalidad de apegarse a la manera más común de los modelos existentes en la literatura, tal como se puede apreciar en los modelos descritos en [67].

La Tabla 5.2 muestra los modelos resultantes para cada estación meteorológica.

Tabla 5.2 Modelos de estimación de radiación PAR desarrollados en las 25 estaciones de la Mesa del Norte.

Modelo	Estación	Estado
$Q_p = (28.615 + 2144.1k_t + 1442.2k_t^2 - 1086.3k_t^3) \times \mu^{0.976}$	Chihuahua ob.	Chihuahua
$Q_p = (-15.743 + 2357k_t + 861.94k_t^2 - 657.22k_t^3) \times \mu^{0.948}$	Ciudad Juárez	
$Q_p = (3.7114 + 2513.5k_t + 489.71k_t^2 - 392.21k_t^3) \times \mu^{0.985}$	Cuauhtémoc	
$Q_p = (4.7719 + 2225.3k_t + 1569.8k_t^2 - 1387.4k_t^3) \times \mu^{0.962}$	Ojinaga	
$Q_p = (-9.0303 + 2547.2k_t + 499.092k_t^2 - 436.97k_t^3) \times \mu^{0.985}$	Jiménez	
$Q_p = (-2.2706 + 2674.3k_t - 57.027k_t^2 + 59.323k_t^3) \times \mu^{0.985}$	Saltillo	Coahuila
$Q_p = (-16.85 + 2765.1k_t - 56.447k_t^2 + 48.469k_t^3) \times \mu^{0.982}$	PNegras	
$Q_p = (-9.5395 + 2688.8k_t + 1566.7k_t^2 - 1277.6k_t^3) \times \mu^{0.985}$	Cuatrociénegas	
$Q_p = (0.9574 + 2453.5k_t + 523.528k_t^2 - 387.06k_t^3) \times \mu^{0.961}$	Candela	
$Q_p = (-5.6413 + 2551.4k_t + 475.48k_t^2 - 422.33k_t^3) \times \mu^{0.986}$	Nueva Rosita	
$Q_p = (-8.12 + 2622k_t + 138.88k_t^2 - 110.33k_t^3) \times \mu^{0.98}$	Ocampo	

Tabla 5.2 Modelos de estimación de radiación PAR desarrollados en las 25 estaciones de la Mesa del Norte (continuación).

Modelo	Estación	Estado
$Q_p = (-23.947 + 2651.9k_t + 145.68k_t^2 - 132.92k_t^3) \times \mu^{0.979}$	Monclova	Coahuila
$Q_p = (-4.006 + 2643.7k_t + 144.38k_t^2 - 138.4k_t^3) \times \mu^{0.988}$	Durango	Durango
$Q_p = (-25.499 + 2626.7k_t + 326.73k_t^2 - 313.617k_t^3) \times \mu^{0.984}$	La Flor	
$Q_p = (-6.1601 + 2650.5k_t + 139.5k_t^2 - 135.6k_t^3) \times \mu^{0.991}$	San Juan Gpe	
$Q_p = (-8.0685 + 2697.1k_t - 51.662k_t^2 + 39.668k_t^3) \times \mu^{0.992}$	Villa Ocampo	
$Q_p = (-0.9883 + 2638.5k_t + 132.9k_t^2 - 107.76k_t^3) \times \mu^{0.995}$	Zacatecas 1	Zacatecas
$Q_p = (-6.1315 + 2696.9k_t - 31.456k_t^2 + 17.37k_t^3) \times \mu^{0.995}$	Zacatecas 2	
$Q_p = (-17.385 + 2694.5k_t - 49.338k_t^2 + 35.148k_t^3) \times \mu^{0.981}$	La Florida	
$Q_p = (9.4973 + 2396.1k_t + 898.85k_t^2 - 719.5k_t^3) \times \mu^{0.995}$	Calvillo	Aguascalientes
$Q_p = (4.1508 + 2599.8k_t + 224.51k_t^2 - 174.71k_t^3) \times \mu^{0.993}$	Sierra Fría	
$Q_p = (4.0965 + 2498k_t + 837.59k_t^2 - 969.02k_t^3) \times \mu^{0.997}$	Gogorrón	San Luis
$Q_p = (-5.4357 + 2657.2k_t + 48.98k_t^2 - 22.903k_t^3) \times \mu^{0.994}$	Matehuala	Potosí
$Q_p = (6.9256 + 2531.2k_t + 466.18k_t^2 - 394.65k_t^3) \times \mu^{0.993}$	El Diente	Nuevo León
$Q_p = (-3.2134 + 2633.2k_t + 161.79k_t^2 - 145.31k_t^3) \times \mu^{0.991}$	Montemorelos	

Según Willmott [72], el error cuadrático medio (RMSE) es una herramienta para el análisis de regresión de valores estimados contra medidos. Una de sus ventajas es que se encuentra en las mismas unidades que la variable estudiada. Debido a esto, y como ya fue mencionado, se utilizó el RMSE para analizar el comportamiento de cada modelo.

La Tabla 5.3 muestra el RMSE y el error relativo de cada modelo con respecto a los resultados del Modelo 6 a lo largo del año de mediciones.

Tabla 5.3 RMSE y error relativo de las estimaciones de radiación PAR con cada modelo desarrollado.

Estado	Estación	RMSE ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Error relativo (%)
Chihuahua	Chihuahua ob.	16.79	1.15
	Ciudad Juárez	24.77	1.82
	Cuauhtémoc	9.06	0.65
	Ojinaga	20.84	1.55
	Jiménez	8.98	1.05
Coahuila	Saltillo	6.41	0.5
	PNegras	7.17	0.61
	Cuatrociénegas	5.95	0.45
	Candela	14.91	1.27
	Nueva Rosita	8.16	0.58
	Ocampo	9.19	0.71
	Monclova	9.36	0.76
Durango	Durango	6.22	0.44
	La Flor	8.39	0.64
	San Juan Gpe	4.76	0.36
	Villa Ocampo	3.44	0.26
Zacatecas	Zacatecas 1	2.7	0.19
	Zacatecas 2	2.09	0.16
	La Florida	8.04	0.57
Aguascalientes	Calvillo	7.76	0.52
	Sierra Fría	3.34	0.25
San Luis Potosí	Gogorrón	3.32	0.35
	Matehuala	2.76	0.21
Nuevo León	El Diente	4.05	0.38
	Montemorelos	4.15	0.39

5.3 Desarrollo del modelo general de estimación

A partir de los modelos particulares se puede desarrollar uno que pueda utilizarse de manera general en la Mesa del Norte. Para ello, de cada modelo particular se deben extraer los valores de cada uno de los términos de las ecuaciones, como se muestra en la Tabla 5.4:

Tabla 5.4 Términos de las ecuaciones de cada modelo particular.

Términos de cada modelo					
Estación	Independiente	k_t	k_t^2	k_t^3	b
Chihuahua ob.	28.615	2144.1	1442.2	-1086.3	0.976
Ciudad Juárez	-15.743	2357	861.94	-657.22	0.948
Cuauhtémoc	3.7114	2513.5	489.71	-392.21	0.985
Ojinaga	4.7719	2225.3	1569.8	-1387.4	0.962
Jiménez	-9.0303	2547.2	499.09	-436.97	0.985
Saltillo	-2.2706	2674.3	-57.027	59.323	0.985
PNegras	-16.85	2765.1	-207.93	123.36	0.985
Cuatrociénegas	-9.5395	2688.8	-56.447	48.469	0.985
Candela	0.9754	2453.5	523.28	-387.06	0.961
Nueva Rosita	-5.6413	2551.4	475.48	-422.33	0.986
Ocampo	-8.12	2622	138.88	-110.33	0.98
Monclova	-23.947	2651.9	145.68	-132.92	0.979
Durango	-4.006	2643.7	144.38	-138.4	0.988
La Flor	-25.499	2626.7	326.73	-313.61	0.984
San Juan Gpe	-6.1601	2650.5	139.5	-135.6	0.991
Villa Ocampo	-8.0685	2697.1	-51.662	39.668	0.992
Zacatecas 1	-0.9883	2638.5	132.9	-107.76	0.995
Zacatecas 2	-6.1315	2696.9	-31.456	17.37	0.955
La Florida	-17.385	2694.5	-49.338	35.148	0.981
Calvillo	9.4973	2396.1	898.85	-719.5	0.995
Sierra Fría	4.1508	2599.8	224.51	-174.74	0.993

Tabla 5.4 Términos de las ecuaciones de cada modelo particular (continuación).

Términos de cada modelo					
Estación	Independiente	k_t	k_t^2	k_t^3	b
Gogorrón	4.0965	2498	837.59	-969.02	0.997
Matehuala	-5.4357	2658.2	48.98	-22.903	0.994
El Diente	6.9256	2531.2	466.18	-394.65	0.993
Montemorelos	-3.2134	2633.2	161.79	-145.31	0.991

Para el desarrollo del modelo general se excluyen los modelos de las estaciones Gogorrón, El Diente y Montemorelos, porque como se muestra en el capítulo cuatro, estas tres estaciones mantienen un comportamiento muy por debajo de las demás debido a su cercanía con la Sierra Madre Oriental. Si estos datos fueran utilizados, el modelo general resultante no sería óptimo para estimar la radiación PAR.

La Tabla 5.5 muestra los términos de los 22 modelos restantes (utilizados para desarrollar el modelo general ordenados de menor a mayor), donde cada columna fue ordenada de manera independiente.

Tabla 5.5 Términos de las ecuaciones los 22 modelos particulares restantes.

Términos de los 22 modelos restantes				
Independiente	k_t	k_t^2	k_t^3	b
-25.499	2144.1	-207.93	-1387.4	0.948
-23.947	2225.3	-57.027	-1086.3	0.955
-17.385	2357	-56.447	-719.5	0.961
-16.85	2396.1	-51.662	-657.22	0.962
-15.743	2453.5	-49.338	-436.97	0.976
-9.5395	2513.5	-31.456	-422.33	0.979
-9.0303	2547.2	48.98	-392.21	0.98
-8.12	2551.4	132.9	-387.06	0.981
-8.0685	2599.8	138.88	-313.61	0.984
-6.1601	2622	139.5	-174.74	0.985
-6.1315	2626.7	144.38	-138.4	0.985

Tabla 5.5 Términos de las ecuaciones los 22 modelos particulares restantes (continuación).

Términos de los 22 modelos restantes				
Independiente	k_t	k_t^2	k_t^3	b
-5.6413	2638.5	145.68	-135.6	0.985
-5.4357	2643.7	224.51	-132.92	0.985
-4.006	2650.5	326.73	-110.33	0.985
-2.2706	2651.9	475.48	-107.76	0.986
-0.9883	2658.2	489.71	-22.903	0.988
0.9754	2674.3	499.09	17.37	0.991
3.7114	2688.8	523.28	35.148	0.992
4.1508	2694.5	861.94	39.668	0.993
4.7719	2696.9	898.85	48.469	0.994
9.4973	2697.1	1442.2	59.323	0.995
28.615	2765.1	1569.8	123.36	0.995

De cada conjunto de valores se calcula su promedio y su desviación estándar, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 5.6 Promedio y desviación estándar de cada columna de términos.

Independiente		k_t^3	
Promedio	-5.141	Promedio	-286.451
Desviación estándar	11.757	Desviación estándar	387.6
k_t		k_t^2	
Promedio	2568.005	Promedio	345.82
Desviación estándar	160.664	Desviación estándar	476.429
b			
Promedio	0.981		
Desviación estándar	0.0132		

Una vez que se calculan el promedio y la desviación estándar para cada término, los valores que caen fuera de esta última son excluidos, y de los valores restantes para cada término se calcula una vez más su promedio. Cada valor promediado representa el valor correspondiente dentro del modelo general, el cual queda de la siguiente forma:

$$Q_p = (-4.22 + 2624.029k_t + 179.011k_t^2 - 179.56k_t^3) \times \mu^{0.985} \quad (5.5)$$

Después de calcular el modelo general, este se implementó en cada estación para comparar su rendimiento contra los modelos particulares. La siguiente tabla muestra el RMSE obtenido con el modelo general y su comparación con el RMSE de los modelos particulares:

Tabla 5.7 Comparación del RMSE entre el modelo general y los modelos particulares.

Estado	Estación	RMSE Modelo particular ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	RMSE Modelo General ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
Chihuahua	Chihuahua ob.	16.79	11.57
	Ciudad Juárez	24.77	11.46
	Cuauhtémoc	9.06	12.12
	Ojinaga	20.84	9.58
	Jiménez	8.98	10.75
Coahuila	Saltillo	6.41	13.43
	PNegras	7.17	9.91
	Cuatrociénegas	5.95	10.84
	Candela	14.91	9.28
	Nueva Rosita	8.16	10.47
	Ocampo	9.19	11.74
	Monclova	9.36	10.33
Durango	Durango	6.22	13.62
	La Flor	8.39	10.9
	San Juan Gpe	4.76	11.7
	Villa Ocampo	3.44	11.58
Zacatecas	Zacatecas 1	2.7	12.62
	Zacatecas 2	2.09	14.25
	La Florida	8.04	12.45
Aguascalientes	Calvillo	7.76	11.57
	Sierra Fría	3.34	11.79
San Luis Potosí	Gogorrón	3.32	4.9
	Matehuala	2.76	11.85
Nuevo León	El Diente	4.05	7.66
	Montemorelos	4.15	8.61

Al aplicar el modelo general en las tres estaciones excluidas para su desarrollo, se observa que tiene un buen rendimiento a pesar de tener un comportamiento diferente al de las demás estaciones dentro de la Mesa del Norte.

Analizando la Tabla 5.7 se puede observar que el RMSE promedio para los modelos particulares es de $8.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, mientras que el RMSE con el modelo general es de $11 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, habiendo una diferencia aproximada de $3 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. La diferencia promedio entre el error particular y el error general es de $2.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, y en 21 de las 25 estaciones el modelo general tiene un error mayor al de los modelos particulares, el cual es un comportamiento esperado, al tratarse de un modelo que combina el comportamiento de los modelos particulares.

A pesar de tener un rendimiento menor, el modelo general puede utilizarse en lugares que no tengan acceso a la información meteorológica necesaria para desarrollar un modelo particular, con la certeza de que los valores estimados serán cercanos a los valores reales de radiación PAR.

VI. DESARROLLO DE MODELOS FÍSICOS Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS

Este capítulo muestra la validación de los modelos propuestos. En primer lugar, se muestra el desarrollo y validación de dos modelos basados en mediciones físicas de radiación PAR; después, se muestran las validaciones de los modelos restantes con conjuntos de datos independientes a los utilizados para su construcción.

6.1 Mediciones físicas de radiación PAR en la estación Durango



Figura 6.1 Sensor LI-190R.

En diciembre del 2021 se tomaron mediciones de radiación PAR dentro de la zona de validación de la estación Durango, con el objetivo de desarrollar y validar un modelo basado en las estimaciones hechas a partir de esas mediciones. Las mediciones fueron tomadas con un sensor cuántico de la marca LI-COR modelo LI-190R.

Como el sensor por sí solo no puede registrar las lecturas, se diseñó un sistema registrador de datos (datalogger) utilizando una tarjeta Arduino MEGA, un módulo RTC y un módulo lector de tarjetas micro SD [72, 73]; además de estos tres instrumentos, se utilizó también un amplificador de señal para sensores LI-COR. El sistema fue configurado para registrar las lecturas del sensor cada 30 segundos. La siguiente figura muestra un diagrama de la conexión realizada para el datalogger:

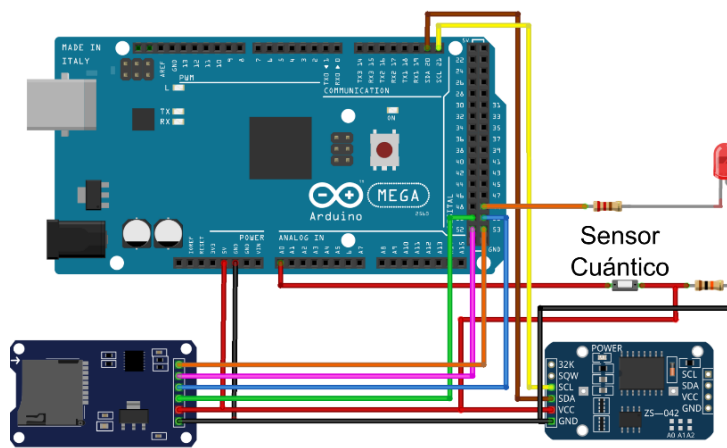


Figura 6.2 Esquema de la conexión realizada para el registrador de datos.

El sensor cuántico y el datalogger se colocaron aproximadamente a 250 metros de distancia de la estación meteorológica, como se muestra en la Figura 6.3. Esta distancia cae dentro de la zona de validación establecida por la CONAGUA, que, como ya fue mencionado, tiene 5 km de radio. Las mediciones se tomaron entre el 20 y el 29 de diciembre del 2021 y fueron registradas cada 30 segundos, asegurando así que la hora de las lecturas coincidiera con las lecturas registradas por la estación meteorológica. Después de recopilar todas las mediciones, estas fueron analizadas y utilizadas para el desarrollo y validación de un modelo para la estación.



Figura 6.3 Distancia aproximada entre la estación meteorológica y el sitio de mediciones de radiación PAR.

6.2 Análisis de la información obtenida y desarrollo de un modelo para la estación Durango

Del periodo de mediciones se tuvieron cinco días completos para el monitoreo de radiación PAR, cuya información fue procesada para analizar y comparar el comportamiento de la radiación a mediodía con el modelo particular de la estación, el modelo general y los seis modelos de la literatura. La Figura 6.4 muestra los promedios obtenidos al mediodía.

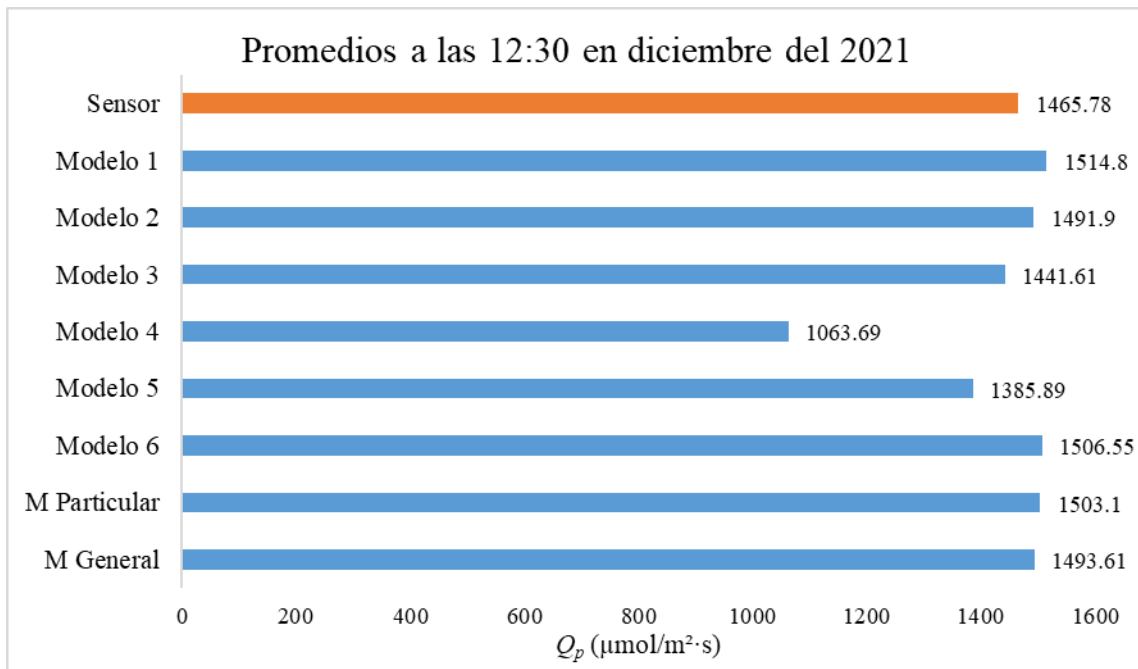


Figura 6.4 Comparación de los diferentes modelos en la estación Durango en diciembre del 2021.

Se observa que la mayoría de los modelos tienen un comportamiento similar al del sensor al estimar la radiación PAR, siendo los Modelos 4 y 5 los que tuvieron el rendimiento más bajo. Este es un comportamiento esperado, de acuerdo al mostrado por los modelos de la literatura descritos en el capítulo cinco.

A pesar de que el modelo particular de la estación Durango arroja resultados cercanos a los del sensor, se implementó un nuevo modelo para la estación, esta vez basado en la información obtenida con el sensor cuántico. De esa manera se tienen un modelo que dependa directamente

de las mediciones del sensor. Para su desarrollo, se siguió la misma metodología explicada en el capítulo cuatro de este trabajo.

El modelo resultante fue implementado junto con los otros, para comparar su rendimiento con el de los demás. El nuevo modelo propuesto se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_p = (-371 + 3482.7k_t - 2879.9k_t^2 + 1520.2k_t^3) \times \mu^{0.419} \quad (6.1)$$

La Figura 6.5 muestra el comportamiento de todos los modelos a mediodía.

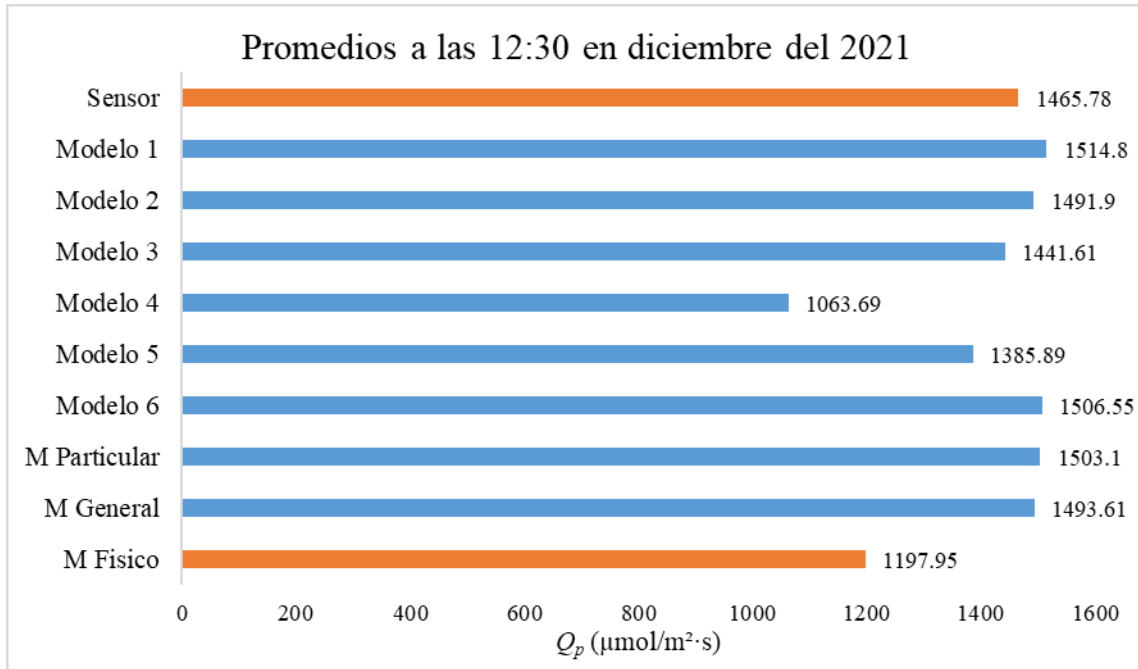


Figura 6.5 Rendimiento del modelo desarrollado para la estación Durango en diciembre del 2021.

Se observa que el modelo desarrollado tiene uno de los rendimientos más bajos, esto debido a que el bajo número de mediciones con el sensor cuántico no es representativo del comportamiento general de la radiación PAR. Por ello, cada día de mediciones fue analizado de manera independiente. Del análisis se obtuvo una ecuación de ajuste para cada día entre Q_p y k_t , como se muestra a continuación:

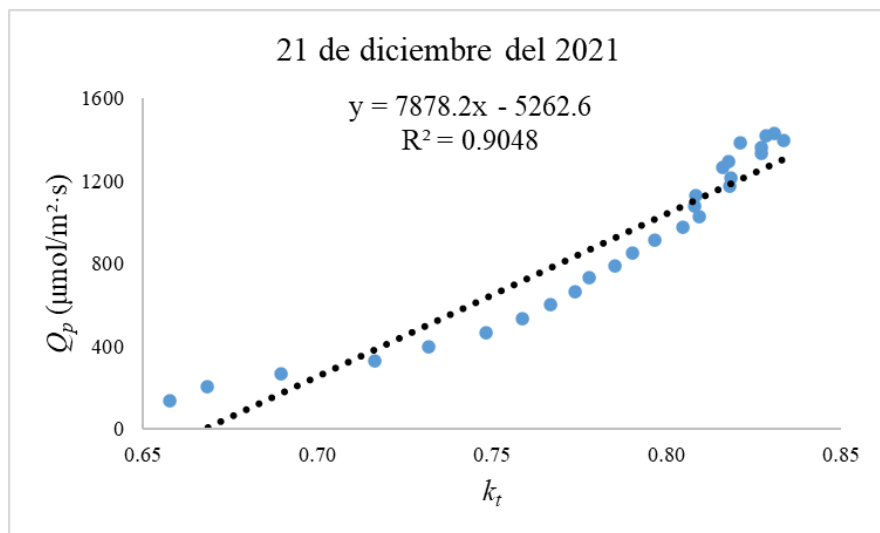


Figura 6.6 Ecuación de ajuste entre Q_p y k_t en la estación Durango el 21 de diciembre del 2021.

De las ecuaciones obtenidas cada día se calculó el nuevo modelo para la estación, fusionando los términos de los parámetros de cada ecuación. Para optimizar su rendimiento, el modelo se ajustó utilizando mínimos cuadrados para quedar de la siguiente forma:

$$Q_p = (-14.457 + 2717.996k_t) \times \mu^{1.096} \quad (6.2)$$

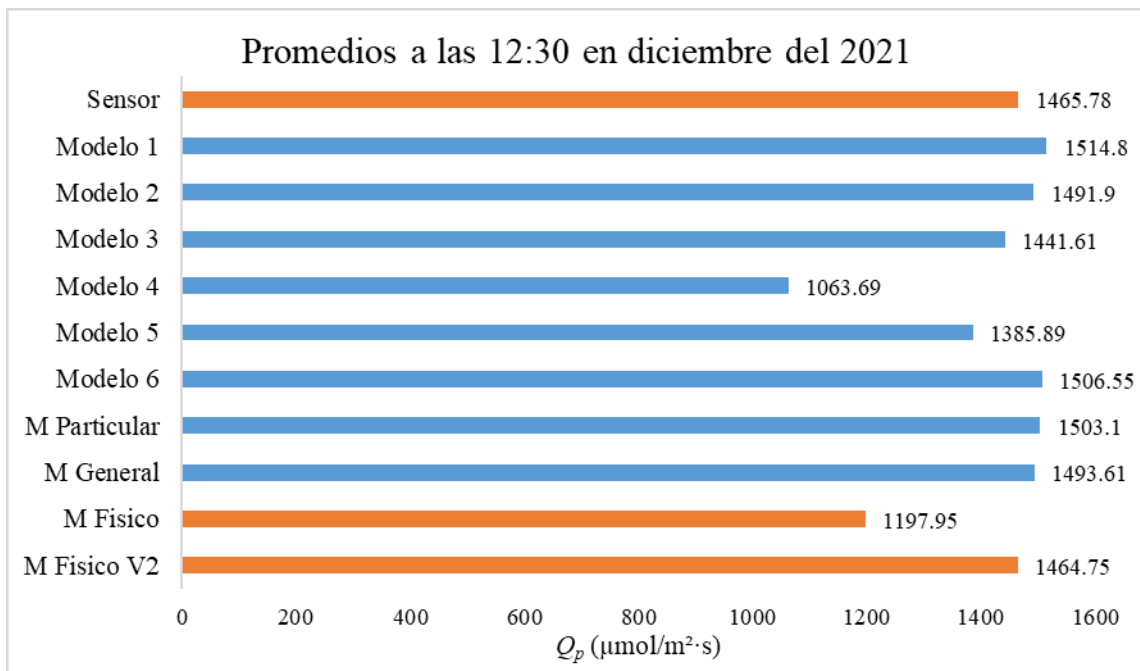


Figura 6.7 Comparación de los diferentes modelos en la estación Durango en diciembre del 2021.

Este modelo fue comparado una vez más contra los demás modelos. En la Figura 6.7 se observa que el modelo mejora su rendimiento al acercar su comportamiento al del sensor cuántico a mediodía.

6.3 Mediciones físicas de radiación PAR en la estación Chihuahua ob.

La otra estación donde se realizaron mediciones con un sensor cuántico fue la estación Chihuahua ob. En la estación se colocó un sensor cuántico dentro de su zona de validez y se realizaron mediciones del 9 de junio al 8 de agosto del 2022. La Figura 6.8 muestra la distancia aproximada entre el punto donde se colocó el sensor y la estación meteorológica.



Figura 6.8 Distancia aproximada entre la estación Chihuahua ob. y el sitio de mediciones de radiación PAR.

A diferencia de la estación Durango, las mediciones en la estación Chihuahua ob. se hicieron utilizando un sensor cuántico de la marca Apogee modelo SQ-500 y un datalogger de la misma marca modelo AT-100. Este sensor tiene un rango de lecturas que va de 0 a 4000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y su rango espectral va de los 389 a los 692 nm $\pm$ 5nm, mientras que el datalogger permite la conectividad con el celular a través de una aplicación móvil en la que se pueden monitorear en tiempo real las lecturas del sensor y configurar el dispositivo para que registre lecturas en el periodo de tiempo deseado. A través de la aplicación se pueden obtener y guardar los registros históricos de mediciones para ser analizados. Para este caso, el datalogger fue configurado para registrar lecturas cada minuto [48].



Figura 6.9 Sensor cuántico y datalogger marca Apogee.

6.4 Análisis de la información obtenida y desarrollo de un modelo para la estación Chihuahua ob.

Durante los dos meses en que se utilizó el sensor cuántico, se estimó la radiación PAR con los modelos de la literatura, el modelo particular de la estación y el modelo general. La información recopilada se analizó para comparar el rendimiento de los modelos contra las mediciones del sensor cuántico. La Figura 6.10 muestra los promedios obtenidos a mediodía con los diferentes modelos y el promedio obtenido con el sensor cuántico.

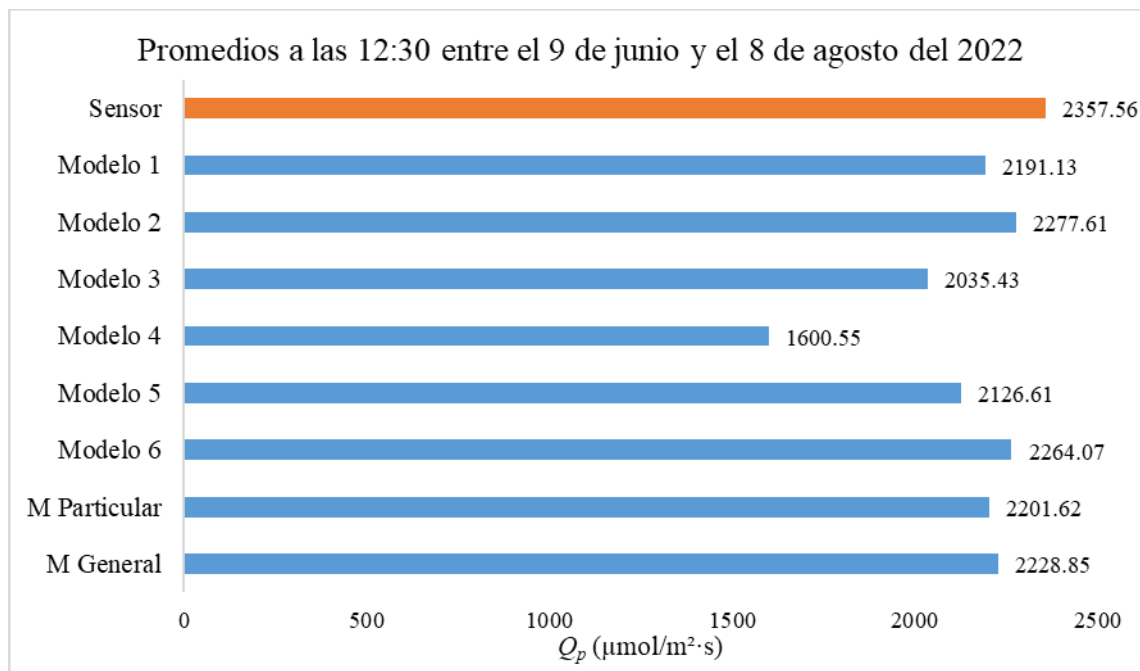


Figura 6.10 Comparación de los modelos en la estación Chihuahua ob. del 09 de junio al 08 de agosto del 2022.

Se aprecia que los modelos con el mejor rendimiento son los Modelos 2 y 6, seguidos del particular y el general. Igual que en la estación Durango, a pesar de que el modelo particular se comporta de manera similar a los Modelos 2 y 6, lo ideal es tener un modelo basado en mediciones físicas del sensor cuántico. Por ello, se desarrolló un nuevo modelo para la estación Chihuahua ob., basado en las lecturas del sensor cuántico durante los dos meses de medición.

Siguiendo la metodología vista en el capítulo cinco, el modelo obtenido a partir de las mediciones del sensor cuántico quedó de la siguiente forma:

$$Q_p = (-115.98 + 7644.1k_t - 7734.5k_t^2 + 2758.2k_t^3) \times \mu^{1.433} \quad (6.3)$$

El comportamiento del modelo a mediodía comparado con los demás se muestra a continuación:

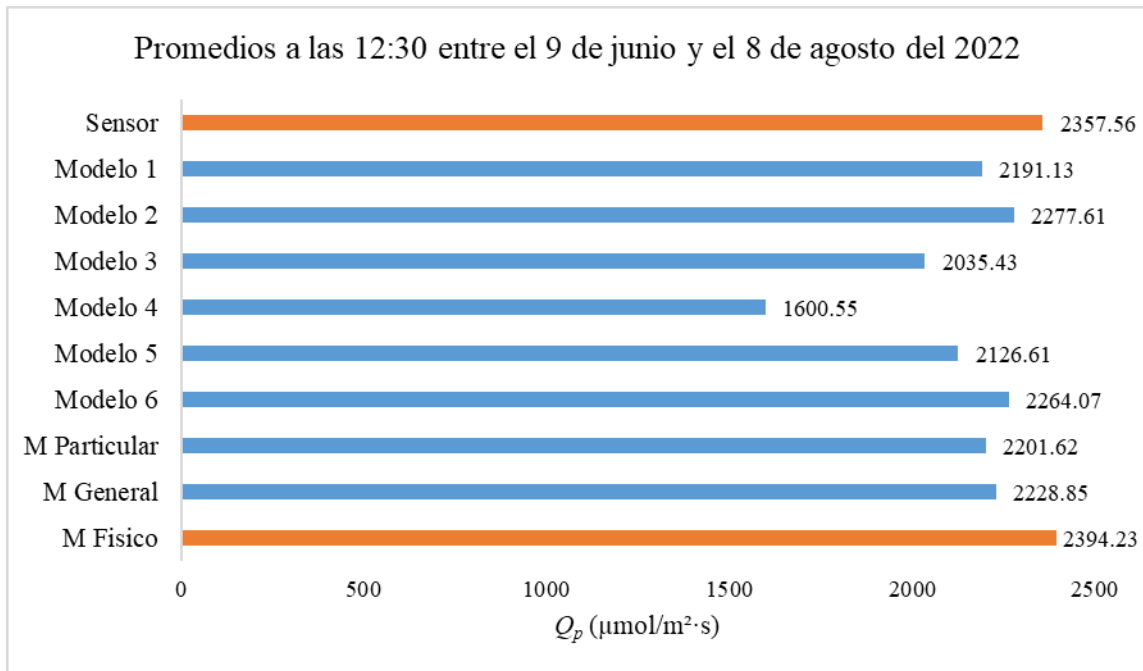


Figura 6.11 Rendimiento del modelo desarrollado en la estación Chihuahua ob. entre el 09 de junio y el 08 de agosto del 2022.

Se observa que el modelo desarrollado tiene un rendimiento similar al del sensor cuántico, lo que podría sugerir que es muy preciso al estimar la radiación PAR. Sin embargo, al calcular su RMSE en los dos meses de medición, se encontró un valor muy alto en comparación a los

demás modelos. Como se observa en la Tabla 6.1, los únicos modelos con rendimiento más bajo que el modelo desarrollado son los Modelos 3 y 4.

Tabla 6.1 Comparación del RMSE obtenido con los diferentes modelos entre el 09 de junio y el 08 de agosto del 2022.

Sensor/Modelo	RMSE ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
Sensor	---
Modelo Físico	220.74
Modelo Particular	184.44
Modelo General	181.96
Modelo 1	186.57
Modelo 2	175.28
Modelo 3	260.79
Modelo 4	472.18
Modelo 5	203.21
Modelo 6	175.87

Teniendo en cuenta lo mencionado, y al utilizar la misma metodología empleada para ajustar el parámetro b en los modelos particulares de cada estación, una vez fijado, el modelo propuesto (ecuación (6.3)), quedó de la siguiente manera:

$$Q_p = (2680.1689k_t) \times \mu^{0.938} \quad (6.4)$$

Este nuevo modelo también fue implementado. Con él, se obtuvo un RMSE de 174.28 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Comparándolo contra los modelos en la Tabla 6.1, se observa que el error disminuye hasta tener un comportamiento similar al de los modelos con el error más bajo (Modelo 2 y 6).

Una vez que se tienen los dos modelos de estimación basados en mediciones físicas de sensores cuánticos, lo siguiente es validar su rendimiento utilizando información independiente a la usada para su desarrollo.

6.5 Validación de los modelos desarrollados en la Mesa del Norte de México

Como se mencionó al inicio del capítulo cinco, al no poder colocar sensores cuánticos en cada estación de la Mesa del Norte, los modelos desarrollados están basados en las estimaciones

obtenidas con el Modelo 6. Entonces, para validar los modelos, se utilizaron conjuntos de datos de estimaciones obtenidas con el Modelo 6, pero dichos conjuntos abarcan trimestres independientes a los usados para la implementación de los 25 modelos.

Para la validación de 22 de los 25 modelos se utilizó la información de las estimaciones del Modelo 6 en el trimestre julio – septiembre del 2021, para los modelos de Ciudad Juárez y La Florida se usó la información del trimestre enero – marzo del 2022 y para el modelo de Monclova se utilizaron diferentes conjuntos de datos entre enero y agosto del 2022. No se empleó el mismo trimestre para validar todos los modelos, debido a que algunas estaciones se encontraban fuera de línea. Esta problemática es resultado de las condiciones atmosféricas que afectan las ubicaciones de las estaciones meteorológicas, dejándolas sin funcionamiento hasta que se les da mantenimiento y son puestas en operación nuevamente.

La validación de los modelos desarrollados se hizo mediante el cálculo del RMSE de cada uno de ellos. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 6.2 RMSE obtenido con los modelos desarrollados en el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Edo.	Estación	Modelo	RMSE
Chih.	Chihuahua ob.	$Q_p = (28.615 + 2144.1k_t + 1442.2k_t^2 - 1086.3k_t^3) \times \mu^{0.976}$	17.79
	Ciudad Juárez	$Q_p = (-15.743 + 2357k_t + 861.94k_t^2 - 657.22k_t^3) \times \mu^{0.948}$	16.84
	Cauhtémoc	$Q_p = (3.7114 + 2513.5k_t + 489.71k_t^2 - 392.21k_t^3) \times \mu^{0.985}$	8.96
	Ojinaga	$Q_p = (4.7719 + 2225.3k_t + 1569.8k_t^2 - 1387.4k_t^3) \times \mu^{0.962}$	19.02
	Jiménez	$Q_p = (-9.0303 + 2547.2k_t + 499.092k_t^2 - 436.97k_t^3) \times \mu^{0.985}$	9.44
Coah.	Saltillo	$Q_p = (-2.2706 + 2674.3k_t - 57.027k_t^2 + 59.323k_t^3) \times \mu^{0.985}$	6.01
	PNegras	$Q_p = (-16.85 + 2765.1k_t - 56.447k_t^2 + 48.469k_t^3) \times \mu^{0.982}$	8.26
	Cuatrociénegas	$Q_p = (-9.5395 + 2688.8k_t + 1566.7k_t^2 - 1277.6k_t^3) \times \mu^{0.985}$	7.06
	Candela	$Q_p = (0.9574 + 2453.5k_t + 523.528k_t^2 - 387.06k_t^3) \times \mu^{0.961}$	14.91
	Nueva Rosita	$Q_p = (-5.6413 + 2551.4k_t + 475.48k_t^2 - 422.33k_t^3) \times \mu^{0.986}$	8.96
	Ocampo	$Q_p = (-8.12 + 2622k_t + 138.88k_t^2 - 110.33k_t^3) \times \mu^{0.98}$	9.19
	Monclova	$Q_p = (-23.947 + 2651.9k_t + 145.68k_t^2 - 132.92k_t^3) \times \mu^{0.979}$	6.77
Dur.	Durango	$Q_p = (-4.006 + 2643.7k_t + 144.38k_t^2 - 138.4k_t^3) \times \mu^{0.988}$	5.73

Tabla 6.2 RMSE obtenido con los modelos desarrollados en el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) (continuación).

Edo.	Estación	Modelo	RMSE
Dur.	La Flor	$Q_p = (-25.499 + 2626.7k_t + 326.73k_t^2 - 313.617k_t^3) \times \mu^{0.984}$	8.97
	San Juan Gpe	$Q_p = (-6.1601 + 2650.5k_t + 139.5k_t^2 - 135.6k_t^3) \times \mu^{0.991}$	4.98
	Villa Ocampo	$Q_p = (-8.0685 + 2697.1k_t - 51.662k_t^2 + 39.668k_t^3) \times \mu^{0.992}$	4.05
Zac.	Zacatecas 1	$Q_p = (-0.9883 + 2638.5k_t + 132.9k_t^2 - 107.76k_t^3) \times \mu^{0.995}$	2.72
	Zacatecas 2	$Q_p = (-6.1315 + 2696.9k_t - 31.456k_t^2 + 17.37k_t^3) \times \mu^{0.995}$	2.39
	La Florida	$Q_p = (-17.385 + 2694.5k_t - 49.338k_t^2 + 35.148k_t^3) \times \mu^{0.981}$	6.54
Ags.	Calvillo	$Q_p = (9.4973 + 2396.1k_t + 898.85k_t^2 - 719.5k_t^3) \times \mu^{0.995}$	8.37
	Sierra Fría	$Q_p = (4.1508 + 2599.8k_t + 224.51k_t^2 - 174.71k_t^3) \times \mu^{0.993}$	2.94
S.L.P.	Gogorrón	$Q_p = (4.0965 + 2498k_t + 837.59k_t^2 - 969.02k_t^3) \times \mu^{0.997}$	3.98
	Matehuala	$Q_p = (-5.4357 + 2657.2k_t + 48.98k_t^2 - 22.903k_t^3) \times \mu^{0.994}$	3.38
N.L.	El Diente	$Q_p = (6.9256 + 2531.2k_t + 466.18k_t^2 - 394.65k_t^3) \times \mu^{0.993}$	4.22
	Montemorelos	$Q_p = (-3.2134 + 2633.2k_t + 161.79k_t^2 - 145.31k_t^3) \times \mu^{0.991}$	5.16

En la tabla se observa que todos los modelos tuvieron un RMSE menor a 20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, siendo el modelo de Ojinaga el que tuvo el error más alto con 19.02 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, mientras que el modelo de la estación Zacatecas 2 tuvo el error más bajo con 2.39 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. De los 25 modelos, solo cuatro tuvieron un RMSE mayor a 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ (Chihuahua ob., Cd Juárez, Ojinaga y Candela). Entre tanto, que las demás tuvieron un RMSE menor a esa cantidad. De manera general el error promedio de todas las estaciones es de 7.87 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

Para mostrar el comportamiento de todos los modelos en forma conjunta, la Tabla 6.2 muestra el RMSE de los modelos de las estaciones Chihuahua ob. y Durango desarrollados a partir de las estimaciones del Modelo 6.

Al implementar los modelos basados en las mediciones físicas de radiación PAR (ecuaciones (6.2) y (6.4)) en el trimestre de validación, se obtuvieron los siguientes resultados: el modelo de la estación Chihuahua ob. tuvo un RMSE de 23.91 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y el de la estación Durango fue de 26.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Las desigualdades entre el modelo teórico y el práctico para Chihuahua ob. son pequeñas, teniendo una diferencia de 6.12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, pero para la estación Durango

las diferencias son más evidentes con $20.47 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ entre el modelo practico y el teórico. A pesar de tener una mayor diferencia, es una cifra baja al compararla contra el valor promedio de las mediciones de radiación PAR.

Las desigualdades del error entre ambos modelos se deben principalmente a que el primer modelo (el teórico) fue desarrollado a partir de aproximadamente 13000 datos, mientras que el segundo (modelo práctico) solamente utilizó 220 datos, provocando que este último presente un mayor grado de incertidumbre al basarse en una cantidad menor de información con respecto al modelo teórico.

De igual manera, el modelo general también fue implementado en cada estación durante el trimestre de validación. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con el modelo general y su comparación con los errores particulares:

Tabla 6.3 RMSE obtenido con el modelo general y comparación con los modelos particulares (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Estado	Estación	RMSE Modelo General	RMSE Modelo Particular
Chihuahua	Chihuahua ob.	11.98	17.79
	Ciudad Juárez	7.82	16.84
	Cuauhtémoc	12.25	8.96
	Ojinaga	10.23	19.02
	Jiménez	10.93	9.44
Coahuila	Saltillo	11.88	6.01
	PNegras	11.08	8.26
	Cuatrociénegas	11.61	7.06
	Candela	9.28	14.91
	Nueva Rosita	12.71	8.96
	Ocampo	11.74	9.19
	Monclova	6.6	6.77
Durango	Durango	12.45	5.73
	La Flor	11.14	8.97
	San Juan Gpe	12.36	4.98
	Villa Ocampo	11.69	4.05
Zacatecas	Zacatecas 1	11.56	2.72

Tabla 6.3 RMSE obtenido con el modelo general y comparación con los modelos particulares (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) (continuación).

Estado	Estación	RMSE Modelo General	RMSE Modelo Particular
Zacatecas	Zacatecas 2	13.75	2.39
	La Florida	10.89	6.54
Aguascalientes	Calvillo	11.48	8.37
	Sierra Fría	9.89	2.94
San Luis	Gogorrón	5.78	3.98
Potosí	Matehuala	13.26	3.38
Nuevo León	El Diente	8.49	4.22
	Montemorelos	10.48	5.16

Se observa que veinte de los veinticinco modelos particulares tienen un desempeño superior en relación al modelo general, que es un comportamiento ya esperado debido al desarrollo del modelo.

Por otro lado, el modelo general en la estación Monclova tuvo un comportamiento prácticamente igual al del modelo particular, al tener una diferencia de $0.17 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ entre ambos.

Finalmente, hubo cuatro casos donde el modelo general tuvo un mejor rendimiento (Chihuahua ob., Cd Juárez, Ojinaga y Candela) que los modelos particulares. Esos cuatro modelos tuvieron el RMSE más alto de todos los modelos particulares, sin embargo, las diferencias entre el modelo general y los modelos particulares en los cuatro casos es menor a $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, lo que representa menos del 1% de error relativo.

De manera general, la diferencia promedio entre el RMSE del modelo general y los modelos particulares sin tener en cuenta los cuatro modelos ya mencionados es de $5.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y si se tienen en cuenta, la diferencia es de $2.98 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

VII. SIMPLIFICACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS

Este capítulo muestra la simplificación de los modelos desarrollados para estimar la radiación PAR dentro de la Mesa del Norte de México, así como su implementación y validación. Al final del mismo, se muestra una comparación entre el rendimiento de los modelos de tercer grado y los modelos de primer grado.

7.1 Desarrollo de los modelos utilizando ecuaciones de primer grado

La mayoría de los modelos de estimación de radiación PAR existentes en la literatura utilizan ecuaciones de tercer grado [67], por ello, en este trabajo los modelos propuestos se desarrollaron manteniendo el mismo tipo de ecuaciones. Sin embargo, como se explica en el capítulo cinco, al analizar de manera gráfica la relación entre la radiación PAR máxima (Q'_p) y el índice de claridad (k_t), se puede observar que la relación mantiene un comportamiento similar al de una recta, por lo que también puede ser descrita con una ecuación de primer grado.

En la Figura 7.1 se observa Q'_p como función de k_t para la estación Cuauhtémoc y la ecuación de ajuste de tercer grado entre ambas variables, mientras que la Figura 7.2 muestra la misma relación, pero utilizando ahora una ecuación de ajuste de primer grado. Es de notar que el coeficiente de determinación (R^2) es prácticamente el mismo en ambos casos.

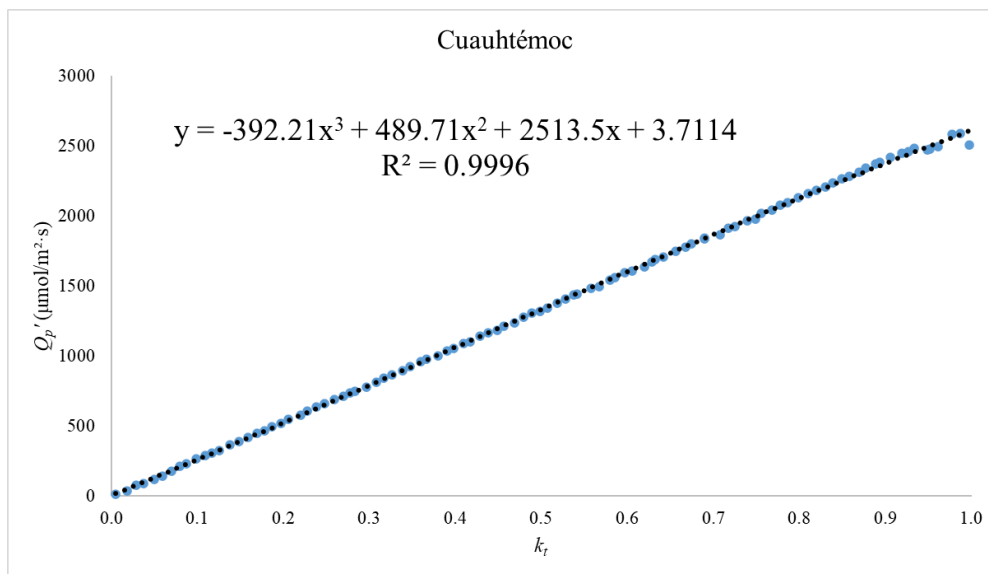


Figura 7.1 Q'_p como función de k_t en la estación Cuauhtémoc utilizando una ecuación de ajuste de tercer grado.

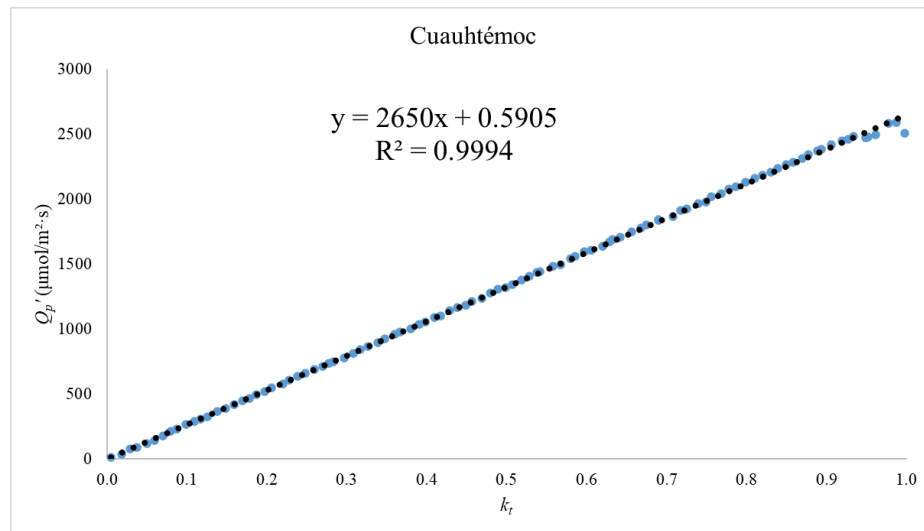


Figura 7.2 Q_p' como función de k_t en la estación Cuauhtémoc utilizando una ecuación de ajuste de primer grado.

Haciendo este análisis en cada estación de manera individual, se encontró en todas ellas el mismo comportamiento, por lo que se decidió desarrollar nuevas versiones de los modelos ya existentes, utilizando esta vez ecuaciones de primer grado. Para la construcción de los modelos simplificados se utilizó la metodología descrita en el capítulo cinco de este trabajo, por lo que no es necesario explicarla nuevamente.

La Tabla 7.1 muestra los nuevos modelos desarrollados, en donde se puede observar de manera clara las similitudes entre cada uno de ellos.

Tabla 7.1 Modelos de estimación de radiación PAR desarrollados en las 25 estaciones de la Mesa del Norte utilizando ecuaciones de primer grado.

Modelo	Estación	Estado
$Q_p = (4.8183 + 2609.2k_t) \times \mu^{0.954}$	Chihuahua ob.	Chihuahua
$Q_p = (-30.153 + 2633.7k_t) \times \mu^{0.937}$	Ciudad Juárez	
$Q_p = (0.5905 + 2650k_t) \times \mu^{0.979}$	Cuauhtémoc	
$Q_p = (-4.3466 + 2625k_t) \times \mu^{0.958}$	Ojinaga	
$Q_p = (-8.1573 + 2663.2k_t) \times \mu^{0.98}$	Jiménez	
$Q_p = (-4.5457 + 2670.4k_t) \times \mu^{0.987}$	Saltillo	Coahuila
$Q_p = (-6.7494 + 2668k_t) \times \mu^{0.983}$	PNegras	
$Q_p = (-9.2434 + 2674.2k_t) \times \mu^{0.986}$	Cuatrociénegas	

Tabla 7.1 Modelos de estimación de radiación PAR desarrollados en las 25 estaciones de la Mesa del Norte utilizando ecuaciones de primer grado (continuación).

Modelo	Estación	Estado
$Q_p = (-9.6427 + 2630.7k_t) \times \mu^{0.955}$	Candela	Coahuila
$Q_p = (-2.1872 + 2651.3k_t) \times \mu^{0.974}$	Nueva Rosita	
$Q_p = (-9.9392 + 2663.8k_t) \times \mu^{0.979}$	Ocampo	
$Q_p = (-22.226 + 2679.8k_t) \times \mu^{0.976}$	Monclova	
$Q_p = (-0.3404 + 2663.4k_t) \times \mu^{0.985}$	Durango	Durango
$Q_p = (-24.917 + 2695.6k_t) \times \mu^{0.987}$	La Flor	
$Q_p = (-3.4318 + 2671.5k_t) \times \mu^{0.99}$	San Juan Gpe	
$Q_p = (-7.1974 + 2680.5k_t) \times \mu^{0.993}$	Villa Ocampo	
$Q_p = (-2.0809 + 2675.9k_t) \times \mu^{0.994}$	Zacatecas 1	Zacatecas
$Q_p = (-4.3397 + 2681k_t) \times \mu^{0.996}$	Zacatecas 2	
$Q_p = (-16.058 + 2676.4k_t) \times \mu^{0.981}$	La Florida	
$Q_p = (3.629 + 2647.2k_t) \times \mu^{0.978}$	Calvillo	Aguascalientes
$Q_p = (1.6713 + 2667k_t) \times \mu^{0.99}$	Sierra Fría	
$Q_p = (4.7406 + 2646.4k_t) \times \mu^{0.982}$	Gogorrón	San Luis
$Q_p = (-8.8981 + 2685.2k_t) \times \mu^{0.994}$	Matehuala	Potosí
$Q_p = (2.3127 + 2660.4k_t) \times \mu^{0.986}$	El Diente	Nuevo León
$Q_p = (-1.9558 + 2666.8k_t) \times \mu^{0.988}$	Montemorelos	

En los nuevos modelos también se calculó el RMSE obtenido a lo largo del año de mediciones (como se observa en la Tabla 7.2), donde se muestra la comparación entre el RMSE obtenido con las dos versiones de los modelos. Como es de esperarse, en la mayoría de los casos los modelos de tercer grado tienen un error menor, debido al mayor número de parámetros en las ecuaciones, permitiendo tener un mejor ajuste entre Q_p' y k_t .

Las ecuaciones de los modelos de tercer grado tienden a intentar ajustarse a todos los valores de k_t , provocando desajustes en algunos valores medios, lo cual hace que aumente el error de las estimaciones; esto a su vez provoca que, en algunos casos, los modelos de primer grado presenten un error más bajo. Este problema no se presenta con las ecuaciones de primer grado. En cualquier caso, las diferencias en los errores nunca representan más de $3 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

Tabla 7.2 Comparación del RMSE (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) obtenido con los modelos de 3er y 1er grado durante el año completo de mediciones.

Estado	Estación	RMSE 3er grado	RMSE 1er grado
Chihuahua	Chihuahua ob.	16.79	20.81
	Ciudad Juárez	24.77	26.98
	Cuauhtémoc	9.06	9.33
	Ojinaga	20.84	19.34
	Jiménez	8.98	8.75
Coahuila	Saltillo	6.41	6.19
	PNegras	7.17	6.58
	Cuatrociénegas	5.95	5.92
	Candela	14.91	16.07
	Nueva Rosita	8.16	10.18
	Ocampo	9.19	9.07
	Monclova	9.36	9.64
Durango	Durango	6.22	6.66
	La Flor	8.39	6.63
	San Juan Gpe	4.76	4.45
	Villa Ocampo	3.44	3.35
Zacatecas	Zacatecas 1	2.7	2.52
	Zacatecas 2	2.09	2.06
	La Florida	8.04	7.95
Aguascalientes	Calvillo	7.76	9.37
	Sierra Fría	3.34	3.24
San Luis Potosí	Gogorrón	3.32	5.21
	Matehuala	2.76	2.81
Nuevo León	El Diente	4.05	4.14
	Montemorelos	4.15	4.37

7.2 Desarrollo del modelo general de estimación de primer grado

A partir de los modelos simplificados, se puede implementar también un modelo de primer grado para utilizarse de manera general en la Mesa del Norte. La metodología en su desarrollo es la misma que la mostrada en el capítulo cinco. El modelo general queda de la siguiente forma:

$$Q_p = (-6.035 + 2667.7k_t) \times \mu^{0.983} \quad (7.1)$$

Este nuevo modelo general fue implementado para comparar su rendimiento contra los modelos particulares. La Tabla 7.3 muestra el RMSE obtenido con el modelo general y su comparación con el RMSE de los modelos particulares.

Tabla 7.3 Comparación del RMSE entre el modelo general y los modelos particulares durante el año completo de mediciones (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Estado	Estación	RMSE Modelo particular	RMSE Modelo General
Chihuahua	Chihuahua ob.	20.81	6.7
	Ciudad Juárez	26.98	6.6
	Cauhtémoc	9.33	6.65
	Ojinaga	19.34	6.86
	Jiménez	8.75	6.56
Coahuila	Saltillo	6.19	7.94
	PNegras	6.58	6.37
	Cuatrociénegas	5.92	6.58
	Candela	16.07	5.53
	Nueva Rosita	10.18	6.78
	Ocampo	9.07	6.45
	Monclova	9.64	6.32
Durango	Durango	6.66	7.96
	La Flor	6.63	6.87
	San Juan Gpe	4.45	6.82
	Villa Ocampo	3.35	6.83
Zacatecas	Zacatecas 1	2.52	6.86
	Zacatecas 2	2.06	7.11
	La Florida	7.95	6.48
Aguascalientes	Calvillo	9.37	6.83
	Sierra Fría	3.24	6.09
San Luis	Gogorrón	5.21	5.43
Potosí	Matehuala	2.81	6.73
Nuevo León	El Diente	4.14	5.65
	Montemorelos	4.37	5.85

Igual que pasa con el modelo general de tercer grado, al aplicar el modelo de primer grado en las tres estaciones excluidas para su desarrollo, es notable que tiene un error bajo a pesar de tener un comportamiento diferente al de las demás estaciones dentro de la Mesa del Norte.

Analizando la Tabla 7.3, se observa que el RMSE obtenido con el modelo general es similar en todas las estaciones, teniendo un promedio de $6.59 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. La estación con el error más alto es Durango, con $7.96 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y la estación con el error más bajo es Gogorrón, con $5.43 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Es de notar que el modelo de esta estación no se utilizó para el desarrollo del modelo general, sin embargo, arrojó un error bajo en la estación con las estimaciones de todo un año.

Otro punto importante a considerar es que, en la mitad de las estaciones, el modelo general presenta un mejor rendimiento que los modelos particulares. Como ningún modelo particular se basa en mediciones físicas, sino en las estimaciones de otro modelo, el modelo general tiende a tener un comportamiento similar al del modelo en el que se basan los modelos particulares, provocando que se tenga una consistencia en todos los errores presentados con ese modelo.

7.3 Validación de los modelos desarrollados de primer grado

Para validar los modelos de primer grado se utilizaron los mismos conjuntos de datos usados con los modelos de tercer grado, de esa manera se tiene la misma información al momento de comparar el rendimiento de una versión del modelo con la otra.

La información utilizada fue la siguiente: en 22 modelos se usó la información de las estimaciones del Modelo 6 en el trimestre julio – septiembre del 2021, para los modelos de las estaciones Cd. Juárez y La Florida se utilizó la información del trimestre enero – marzo del 2022 y para el modelo de Monclova se usaron diferentes conjuntos de datos entre enero y agosto del 2022.

La validación de los modelos se hizo calculando el RMSE de cada uno de ellos. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 7.4 RMSE obtenido en el trimestre de validación con los modelos desarrollados (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Estado	Estación	Modelo	RMSE
Chihuahua	Chihuahua ob.	$Q_p = (4.8183 + 2609.2k_t) \times \mu^{0.954}$	22.22
	Ciudad Juárez	$Q_p = (-30.153 + 2633.7k_t) \times \mu^{0.937}$	17.09
	Cuauhtémoc	$Q_p = (0.5905 + 2650k_t) \times \mu^{0.979}$	10.1
	Ojinaga	$Q_p = (-4.3466 + 2625k_t) \times \mu^{0.958}$	17.26
	Jiménez	$Q_p = (-8.1573 + 2663.2k_t) \times \mu^{0.98}$	9.81
Coahuila	Saltillo	$Q_p = (-4.5457 + 2670.4k_t) \times \mu^{0.987}$	5.73
	PNegras	$Q_p = (-6.7494 + 2668k_t) \times \mu^{0.983}$	7.56
	Cuatrociénegas	$Q_p = (-9.2434 + 2674.2k_t) \times \mu^{0.986}$	5.95
	Candela	$Q_p = (-9.6427 + 2630.7k_t) \times \mu^{0.955}$	16.07
	Nueva Rosita	$Q_p = (-2.1872 + 2651.3k_t) \times \mu^{0.974}$	12.88
	Ocampo	$Q_p = (-9.9392 + 2663.8k_t) \times \mu^{0.979}$	9.07
	Monclova	$Q_p = (-22.226 + 2679.8k_t) \times \mu^{0.976}$	7.14
Durango	Durango	$Q_p = (-0.3404 + 2663.4k_t) \times \mu^{0.985}$	6.09
	La Flor	$Q_p = (-24.917 + 2695.6k_t) \times \mu^{0.987}$	8.56
	San Juan Gpe	$Q_p = (-3.4318 + 2671.5k_t) \times \mu^{0.99}$	5.08
	Villa Ocampo	$Q_p = (-7.1974 + 2680.5k_t) \times \mu^{0.993}$	3.98
Zacatecas	Zacatecas 1	$Q_p = (-2.0809 + 2675.9k_t) \times \mu^{0.994}$	2.7
	Zacatecas 2	$Q_p = (-4.3397 + 2681k_t) \times \mu^{0.996}$	2.45
	La Florida	$Q_p = (-16.058 + 2676.4k_t) \times \mu^{0.981}$	6.49
Aguascalientes	Calvillo	$Q_p = (3.629 + 2647.2k_t) \times \mu^{0.978}$	9.82
	Sierra Fría	$Q_p = (1.6713 + 2667k_t) \times \mu^{0.99}$	3.06
San Luis	Gogorrón	$Q_p = (4.7406 + 2646.4k_t) \times \mu^{0.982}$	5.59
Potosí	Matehuala	$Q_p = (-8.8981 + 2685.2k_t) \times \mu^{0.994}$	3.34
Nuevo León	El Diente	$Q_p = (2.3127 + 2660.4k_t) \times \mu^{0.986}$	4.74
	Montemorelos	$Q_p = (-1.9558 + 2666.8k_t) \times \mu^{0.988}$	5.61

El único modelo que tuvo un RMSE mayor a $20 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ fue el de la estación Chihuahua ob., mientras que el RMSE más bajo lo tuvo el modelo de la estación Zacatecas 2, con $2.45 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. El RMSE promedio de los 25 modelos es de $8.37 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Los resultados

obtenidos muestran que los modelos de primer grado pueden utilizarse de manera confiable para estimar la radiación PAR en la Mesa del Norte de México.

La Tabla 7.5 muestra el RMSE obtenido con los modelos de primer y tercer grado para comparar su rendimiento en el trimestre de validación.

Tabla 7.5 Comparación del RMSE (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) obtenido con los modelos de 3er y 1er grado durante el trimestre de validación.

Estado	Estación	RMSE 3er grado	RMSE 1er grado
Chihuahua	Chihuahua ob.	17.79	22.22
	Ciudad Juárez	16.84	17.09
	Cuauhtémoc	8.96	10.1
	Ojinaga	19.02	17.26
	Jiménez	9.44	9.81
Coahuila	Saltillo	6.02	5.73
	PNegras	8.29	7.56
	Cuatrociénegas	7.06	5.95
Coahuila	Candela	14.91	16.07
	Nueva Rosita	8.96	12.88
	Ocampo	9.19	9.07
	Monclova	6.77	7.14
Durango	Durango	5.73	6.09
	La Flor	8.97	8.56
	San Juan Gpe	4.98	5.08
	Villa Ocampo	4.05	3.98
Zacatecas	Zacatecas 1	2.72	2.7
	Zacatecas 2	2.39	2.45
	La Florida	6.54	6.49
Aguascalientes	Calvillo	8.37	9.82
	Sierra Fría	2.94	3.06
San Luis Potosí	Gogorrón	3.98	5.59
	Matehuala	3.38	3.34
Nuevo León	El Diente	4.23	4.74
	Montemorelos	5.16	5.61

Como era de esperarse, en la mayoría de los casos los modelos de tercer grado tienen un RMSE menor debido al mayor grado de complejidad. En los casos donde el modelo de primer grado tiene un RMSE menor, las diferencias entre ambos son menores a $1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, por lo que el error es prácticamente el mismo en ambos modelos. La excepción es el modelo de Ojinaga, donde el RMSE del modelo de primer grado es $1.76 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ menor al del tercer grado, pero esta diferencia representa menos del 1% de error relativo con respecto a los resultados obtenidos con el Modelo 6.

El modelo general de primer grado también se implementó para analizar si es viable utilizarlo para estimar la radiación PAR. La Tabla 7.6 muestra los resultados obtenidos con él y su comparación con el RMSE obtenido con los modelos particulares.

Tabla 7.6 RMSE obtenido con el modelo general y comparación con los modelos particulares en el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Estado	Estación	RMSE Modelo General	RMSE Modelo Particular
Chihuahua	Chihuahua ob.	7.33	22.22
	Ciudad Juárez	4.45	17.09
	Cuauhtémoc	7.25	10.1
	Ojinaga	7.68	17.26
	Jiménez	7.21	9.81
Coahuila	Saltillo	7.36	5.73
	PNegras	7.29	7.56
	Cuatrociénegas	7.51	5.95
	Candela	5.53	16.07
	Nueva Rosita	8.64	12.88
	Ocampo	6.45	9.07
	Monclova	4.66	7.14
Durango	Durango	7.49	6.09
	La Flor	7.71	8.56
	San Juan Gpe	7.66	5.08
	Villa Ocampo	7.33	3.98
Zacatecas	Zacatecas 1	7.35	2.7

Tabla 7.6 RMSE obtenido con el modelo general y comparación con los modelos particulares en el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) (continuación).

Estado	Estación	RMSE Modelo General	RMSE Modelo Particular
Zacatecas	Zacatecas 2	7.3	2.45
	La Florida	5.5	6.49
Aguascalientes	Calvillo	7.63	9.82
	Sierra Fría	6.58	3.06
San Luis Potosí	Gogorrón	6.21	5.59
	Matehuala	7.93	3.34
Nuevo León	El Diente	6.63	4.74
	Montemorelos	7.49	5.61

En la mitad de las estaciones el modelo general superó el rendimiento de los modelos particulares, este es el mismo comportamiento que se obtuvo al implementar el modelo general en todo el año de mediciones. Como se mencionó, esto se debe a que el modelo general tiende a comportarse de manera similar al modelo en que se basan los modelos particulares. Los resultados muestran que el modelo general de primer grado puede utilizarse de manera confiable para estimar la radiación PAR dentro de la Mesa del Norte.

Por último, se muestra una comparación entre el RMSE obtenido con el modelo general de tercer grado y el modelo general de primer grado para observar cuál de los dos presenta mejores resultados al estimar la radiación PAR.

Tabla 7.7 Comparación del RMSE obtenido con el modelo general de 3er y 1er grado durante el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Estado	Estación	RMSE 3er grado	RMSE 1er grado
Chihuahua	Chihuahua ob.	11.98	7.33
	Ciudad Juárez	7.78	4.45
	Cuauhtémoc	12.25	7.25
	Ojinaga	10.23	7.68
	Jiménez	10.93	7.21
Coahuila	Saltillo	11.88	7.36
	PNegras	11.08	7.29

Tabla 7.7 Comparación del RMSE obtenido con el modelo general de 3er y 1er grado durante el trimestre de validación (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) (continuación).

Estado	Estación	RMSE 3er grado	RMSE 1er grado
Coahuila	Cuatrociénegas	11.61	7.51
	Candela	9.28	5.53
	Nueva Rosita	12.71	8.64
	Ocampo	11.74	6.45
	Monclova	6.6	4.66
Durango	Durango	12.45	7.49
	La Flor	11.14	7.71
	San Juan Gpe	12.36	7.66
	Villa Ocampo	11.69	7.33
Zacatecas	Zacatecas 1	11.56	7.35
	Zacatecas 2	13.75	7.3
	La Florida	10.89	5.5
Aguascalientes	Calvillo	11.48	7.63
	Sierra Fría	9.89	6.58
San Luis Potosí	Gogorrón	5.78	6.21
	Matehuala	13.26	7.93
Nuevo León	El Diente	8.49	6.63
	Montemorelos	10.48	7.49

Se observa que en todos los casos el modelo general de primer grado tuvo un mejor rendimiento que el de tercer grado, con la excepción de Gogorrón, donde el modelo de primer grado tuvo un error ligeramente mayor.

Que el modelo de primer grado tenga un mayor rendimiento puede explicarse debido a la alta complejidad del modelo de tercer grado, ya que al combinar todos los modelos particulares se pierde información de cada uno de ellos, mientras que en el de primer grado, a pesar de seguir la misma metodología para su desarrollo, los modelos particulares son muy similares entre sí, provocando poca pérdida de información en el modelo final.

En cualquier caso, las diferencias entre ambos son menores a $7 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, que, para el promedio anual de radiación PAR que se tiene en las estaciones ($\sim 1030 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), representa menos del 1%.

VIII. CONCLUSIONES

En este trabajo se validó el uso de los modelos empíricos existentes en la literatura más aptos para estimar la radiación fotosintéticamente activa (PAR) dentro de la Mesa del Norte de México. El comportamiento de la radiación PAR se analizó en el periodo del 1 de abril del 2020 al 30 de junio del 2021, utilizando la información recopilada de 25 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de dicha región.

También se propusieron 25 modelos de estimación propios, además de un modelo general para utilizarse de manera indistinta en cualquier parte de la Mesa del Norte. Todos los modelos se desarrollaron a partir de la información meteorológica recopilada a lo largo del año. Además de los modelos mencionados, se desarrollaron también dos modelos basados en mediciones de sensores cuánticos colocados en las estaciones Chihuahua ob. y Durango.

Los resultados del análisis anual de la radiación PAR con los modelos seleccionados de la literatura arrojaron que los valores máximos de radiación se presentan en los meses de verano, mientras que los mínimos durante los meses de invierno. Este comportamiento concuerda con lo reportado en la mayoría de los trabajos existentes en la literatura. A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el análisis de la radiación PAR:

- Los valores máximos de radiación PAR a mediodía variaron entre 1806.26 (estación Gogorrón) y 2719.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ (estación Zacatecas 2) en verano, mientras que los valores mínimos en invierno variaron de 485.14 hasta 1131.82 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. El promedio general a mediodía con cada modelo fue 1788.18 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1812.19 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1673.19 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1291.59 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 1715.93 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y 1812.32 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

- Los valores máximos de la relación Q_p/R_s a mediodía variaron entre 2.016 (estación Ocampo) y 2.134 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (estación Zacatecas 2) y los valores mínimos estuvieron entre 1.652 y 1.869 $\mu\text{mol}/\text{J}$. El promedio general de la relación Q_p/R_s con cada modelo fue, respectivamente, 1.942 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.968 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.817 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.402 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 1.863 $\mu\text{mol}/\text{J}$ y 1.967 $\mu\text{mol}/\text{J}$.

Los resultados de las estimaciones de radiación PAR con los modelos seleccionados de la literatura muestran que, con la excepción del Modelo 4, pueden ser trasladados a regiones diferentes a las utilizadas originalmente para su desarrollo, siempre y cuando tengan características climatológicas similares.

Se desarrollaron además dos versiones para cada modelo propuesto, utilizando ecuaciones de tercer y primer grado. El RMSE obtenido con los modelos de tercer grado varió entre 2.39 y 19.02 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, dependiendo de la estación, mientras que el RMSE del modelo general varió entre 5.78 y 13.75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Por otro lado, el RMSE con los modelos de primer grado varió entre 2.45 y 22.22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, y el error del modelo general varió entre 4.45 y 8.64 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

Los resultados obtenidos con los modelos tanto de primer como tercer grado indican que tienen un rendimiento alto al estimar la radiación PAR dentro de la Mesa del Norte. De manera general, los modelos particulares tuvieron un mejor rendimiento que los dos modelos generales, sin embargo, las diferencias entre ambos son bajas, por lo que también pueden ser empleados para estimar la radiación PAR con la confianza de obtener estimaciones con un margen de error reducido.

Como era de esperarse, los modelos de tercer grado tuvieron un mejor rendimiento que los de primer grado de manera general debido a su complejidad, lo que permite realizar mejores ajustes en las ecuaciones para minimizar el error de las estimaciones.

Debido a la emergencia sanitaria provocada por el COVID-19, solo se pudieron tomar mediciones físicas de radiación PAR en dos estaciones meteorológicas, Chihuahua ob. y Durango. Esas mediciones se utilizaron para desarrollar dos modelos de estimación basados en ellas. El RMSE obtenido con el modelo de la estación Chihuahua ob. fue de 23.91 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ y el error de la estación Durango fue de 26.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Estos errores se asemejan a los obtenidos con los modelos propuestos a partir de las estimaciones de los modelos de la literatura. El comportamiento de los dos modelos muestra que, si se desarrollan modelos basados en mediciones físicas de radiación PAR, se pueden obtener estimaciones con un bajo grado de incertidumbre.

Dentro del trabajo a futuro se proponen los siguientes puntos:

El análisis del uso de las otras técnicas existentes para estimar la radiación PAR, por ejemplo, la utilización de redes neuronales para el desarrollo de modelos de estimación. La aplicación de esta técnica es viable debido a que ya se tienen modelos propios, los cuales pueden ser introducidos en la capa de entrada de las redes en conjunto a la información meteorológica.

El trabajo desarrollado abre la posibilidad de generar un modelo que incluya regiones del sur de Estados Unidos, con las mismas condiciones climatológicas que la Mesa del Norte de México, tales como Arizona, Nuevo México y Texas.

REFERENCIAS

- [1] K. J. McCree, "Significance of Enhancement for Calculations Based on the Action Spectrum for Photosynthesis". *Plant Physiology*, vol. 49, 1972, pp. 704-706.
- [2] K. J. McCree, "The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants". *Agricultural Meteorology*, vol. 9, 1971, pp. 191-216.
- [3] W. A. Noyes and P. A. Leighton, "The photochemistry of gases". Rochester, New York: Viking, 1940, p. 14.
- [4] B. Hu, Y. Wang and G. Liu, "Spatiotemporal characteristics of photosynthetically active radiation in China". *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 2007, pp. 1 – 12.
- [5] T. Wenjun, Q. Jun, Y. Kun, N. Xiaolei, M. Min, L. Shunlin, "An efficient algorithm for calculating photosynthetically active radiation with MODIS products". *Remote Sensing of Environment*, vol. 194, 2017, pp. 146 – 154.
- [6] B. Hu, L. Tang, H. Liu, X. Zhao, Z. Liu, Y. Wang, L. Wang, "Trends of photosynthetically active radiation over China from 1961 to 2014". *International Journal of Climatology*, vol. 38, 2018, pp. 4007 – 4024.
- [7] A. García-Rodríguez, S. García-Rodríguez, M. Díez-Mediavilla, C. Alonso-Tristán, "Photosynthetic Active Radiation, Solar Irradiance and the CIE Standard Sky Classification". *Applied Sciences*, vol.10, 2020, pp. 1 – 14.
- [8] P. Gaastra, "Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance". Mededel. Landbouwhogeschool Wageningen, vol. 59, 1959, pp. 1-68.
- [9] A. A. Nichiporovich, "Conference on measurement of visible radiation in plant physiology, agrometeorology and ecology". *Fizid. Rast*, vol.7 1960, pp. 744-747.

- [10] K. J. McCree, "A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation". *Agricultural Meteorology*, vol. 3, 1966, pp. 353-366.
- [11] W.R. McCluney, "Introduction to radiometry and photometry", Artech House Inc., 1994.
- [12] S. E. Baleigh and O. Biddulph. "The photosynthetic action spectrum of the bean plant". *Plant Physiology*, vol. 46, 1970, pp. 1-5.
- [13] O. Bjorkman. "Further studies on differentiation of photosynthetic properties in sun and shade ecotypes of *Solidago virgaurea*". *Physiologia Plantarum*, vol. 21, 1968, pp. 84-99.
- [14] N. R. Bulley, C. D. Nelson and E. B. Tregunna. "Photosynthesis: action spectra for leaves in normal and low oxygen". *Plant Physiology*, vol. 44, 1969, pp. 678-684.
- [15] S. Janjai, A. Sripradit, R. Wattan, S. Buntoung, S. Pattarapanitchai and I. Masiri, "A Simple Semi-Empirical Model for the Estimation of Photosynthetically Active Radiation from Satellite Data in the Tropics". *International Journal of Photoenergy*, 2013, pp. 1-6.
- [16] S. Janjai, R. Wattan and A. Sripradit, "Modelling the ratio of photosynthetically active radiation to broadband global solar radiation using ground and satellite-based data in the tropics". *Advances in Space Research*, vol. 56, 2015, pp. 2356-2364.
- [17] C. P. Jacovides, F. S. Tymvios, J. Boland and M. Tsitouri, "Artificial Neural Network models for estimating daily solar global UV, PAR and broadband radiant fluxes in an eastern Mediterranean site". *Atmospheric Research*, vol. 1521, 2015, pp. 138-145.
- [18] X. Yu, X. Guo, (2015). "Hourly photosynthetically active radiation estimation in Midwestern United States from artificial neural networks and conventional

- regressions models”, *International Journal of Biometeorology*, vol. 60, 2015, pp. 1247-1259.
- [19] I. Foyo-Moreno, I. Alados and L. Alados-Arboledas, “A new conventional regression model to estimate hourly photosynthetic photon flux density under all sky conditions”. *International Journal of Climatology*, vol. 37, 2017, pp. 1067-1075.
- [20] X. Zhang, Y. Zhang and Y. Zhou, “Measuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April–October”. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 102, 2000, pp. 207-212.
- [21] B. Hu, Y. Wang and G. Liu, “Measurements and estimations of photosynthetically active radiation in Beijing”. *Atmospheric Research*, vol. 85, 2007, pp. 361-371.
- [22] I. Alados, I. Foyo-Moreno and L. Alados-Arboledas, “Photosynthetically active radiation: measurements and modelling”. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 78, 1996, pp. 121-131.
- [23] B. Hu, Y. Wang, “The climatological characteristics of photosynthetically active radiation in arid and semi-arid regions of China”. *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 69, 2012, pp. 175-186.
- [24] B. Hu, Y. Wang, “Comparison of multi-empirical estimation models of photosynthetically active radiation under all sky conditions in Northeast China”. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 116, 2013, pp. 119-129.
- [25] S. Peng, Q. Du, A. Lin, B. Hu, K. Xiao K and Y. Xi, “Observation and estimation of photosynthetically active radiation in Lhasa (Tibetan Plateau)”. *Advances in Space Research*, vol. 55, 2015, pp. 1604-1612.
- [26] B. Hu, H. Liu and Y. Wang, “Investigation of the variability of photosynthetically active radiation in the Tibetan Plateau, China”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, 2016, pp. 240-248.

- [27] W. J. Smith, "Radiometry and Photometry", in *Modern Optical Engineering The Design of Optical Systems*, 3th ed., McGraw-Hill, 2000, pp 219-250.
- [28] K. J. Gasvik, "Ligt Sources and Detectors", in *Optical Metrology*, 3th ed., John Wiley & Sons Ltd, 2002, pp 99-124.
- [29] J. J. Michalsky, "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)". *Solar Energy*, vol. 40(3), 1988, pp. 227-235.
- [30] R. H. Grant and J. R. Slusser, "Estimation of Photosynthetic Photon Flux Density from 368-nm Spectral Irradiance". *Journal of atmospheric and oceanic technology*, vol. 21, 2004, pp. 481-487
- [31] J. Bai, "Observations and estimations of PAR and solar visible radiation in North China". *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 69, 2012 pp. 231–252
- [32] J. C. Kathilankal, T. L. O'Halloran, A. Schmidt, C. V. Hanson and B. E. Law, "Development of a semi-parametric PAR (Photosynthetically Active Radiation) partitioning model for the United States, version 1.0". *Geoscientific Model Development*, vol. 7, 2014, pp. 2477-2484.
- [33] S. C. Nwokolo, J. C. Ogbulezie, C. K. Toge and S. A. John-Jaja, "Modeling the Influence of Relative Humidity on Photosynthetically Active Radiation from Global Horizontal Irradiation in Six Tropical Ecological Zones in Nigeria". *New York Science Journal*, vol. 9, 2016, pp. 40-55.
- [34] S. Ge, R. G. Smith, C. P. Jacovides, M. G. Kramer and R. I. Carruthers, "Dynamics of photosynthetic photon flux density (PPFD) and estimates in coastal northern California". *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 105, 2010, pp. 107-118.

- [35] M. G. Lawrence, “The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air A Simple Conversion and Applications”. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 86, 2005, pp. 225 – 233.
- [36] I. Foyo-Moreno, I. Alados and L. Alados-Arboledas, “A new empirical model to estimate hourly diffuse photosynthetic photon flux density”. Atmospheric Research, vol. 203, 2018, pp. 189-196.
- [37] M. Tsubo and S. Walker, “Relationships between diffuse and global solar radiation in southern Africa”. Theoretical and Applied Meteorology, vol. 80, 2005, pp. 17-25.
- [38] C. P. Jacovides, J. Boland, D. N. Asimakoupoulos and S. A. Kaltsounides, “Comparing diffuse radiation models with one predictor for partitioning incident PAR radiation into its diffuse component in the eastern Mediterranean basin”. Renewable Energy, vol. 35, 2009, pp. 1820–1827.
- [39] Y. Mizoguchi, Y. Yasuda, Y. Ohtani, T. Watanabe, Y. Kominami and K. Yamanoi, “A practical model to estimate photosynthetically active radiation using general meteorological elements in a temperate humid area and comparison among models”. Theoretical and Applied Climatology, vol. 115, 2013.
- [40] X. Yu, Z. Wu, W. Jiang and X. Guo, “Predicting daily photosynthetically active radiation from global solar radiation in the Contiguous United States”. Energy Conversion and Management, vol. 89, 2015, pp. 71-82
- [41] Kipp & Zonen, “Principio de funcionamiento de un piranómetro de termopila”, 2015. [Online]. Disponible en: <https://www.kippzonen.es/News/575/Principio-de-funcionamiento-de-un-piranometro-de-termopila> [Nov, 27, 2019].
- [42] GOSSEN, “MAVOLUX 5032 C USB”. [Online]. Disponible en: <https://gossen-photo.de/en/mavolux-5032-c-usb/> [Nov, 27, 2019].

- [43] “Terrestrial Quantum Sensors”, cuarta edición, LI-COR, Lincoln, NE, 2015.
- [44] P. Fielder and P. Comeau, Construction and Testing of an Inexpensive PAR Sensor. Victoria, BC, Work. –Pap. 53, 2000.
- [45] V. L. Barradas, L. M. Tapia-Vargas, A. Torrecillas-Melendreras, E. Nicolás-Nicolás and J. J. Alarcón-Caballero, “Prototipo de sensor cuántico UIC-01 para mediciones de radiación fotosintéticamente activa en el dosel vegetal”, Terra Latinoamericana, vol. 24, no. 2, April-June 2006, pp. 225-231.
- [46] M. Mottus, M. Sulev, B. Frederic and R. López-Lozano, “Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modelling”, Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, 2011, pp. 7970-8000.
- [47] J. Ross, M. Sulev, “Sources of errors in measurements of PAR”, Agricultural and Forest Meteorology, vol. 100, 200, pp. 103 – 125
- [48] Apogee Instruments, Inc, "SQ-500-SS: Full-Spectrum Quantum Sensor". [Online]. Disponible en: <https://www.apogeeinstruments.com/sq-500-ss-full-spectrum-quantum-sensor/> [Feb, 02, 2023].
- [49] Arduino, "What is Arduino?". [Online]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> [Feb, 02, 2023].
- [50] Arduino Online Shop, "Arduino Mega 2560 Rev3". [Online]. Disponible en: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> [Feb, 02, 2023].
- [51] Encyclopedia Britannica (H. B. Parkes et al.), "Mexico | History, Map, Flag, Population, & Facts", 1999. [Online]. Disponible en: <http://www.britannica.com/place/Mexico> [Nov, 25, 2019].

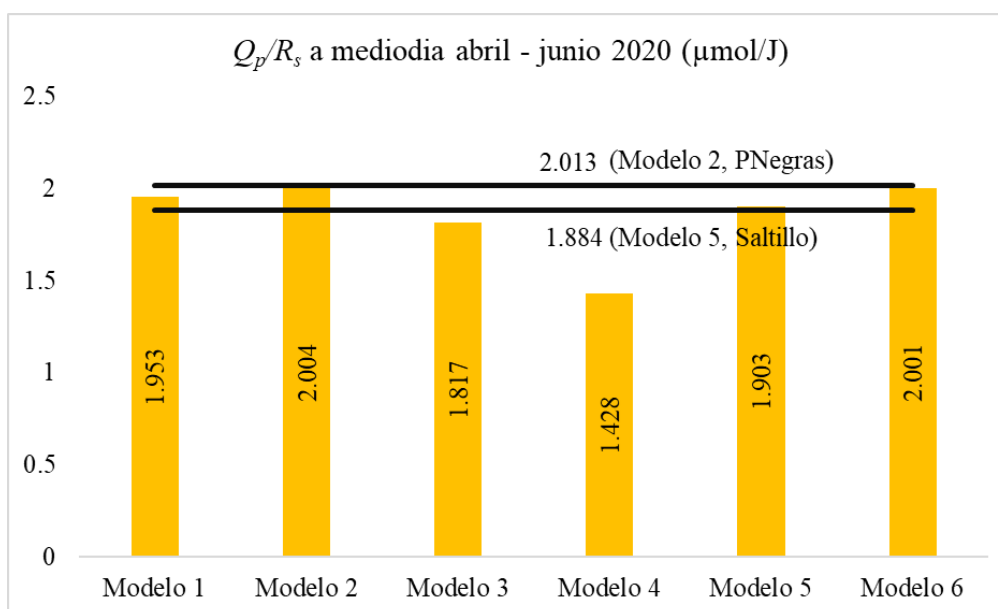
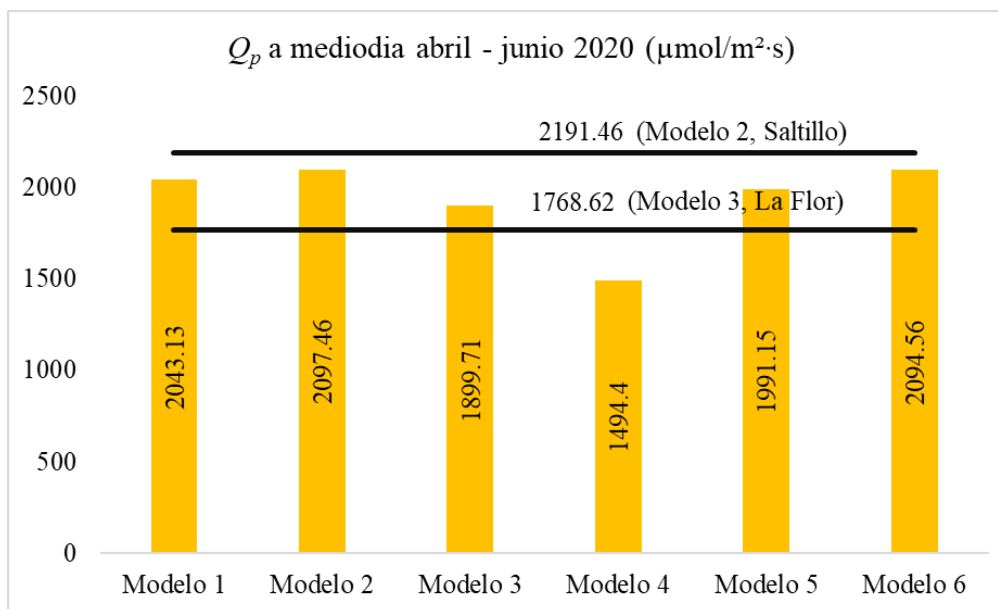
- [52] M. E. Bonine, “Atlas of Mexico”, 2da edición, Austin, Texas; Bureau of Business Research, University of Texas at Austin, 1975.
- [53] Encyclopedia Britannica, “Mesa del Norte”, 1998. [Online]. Disponible en: www.britannica.com/place/Mesa-del-Norte, [Nov, 25, 2019].
- [54] INEGI, “Informacion por entidad”. [Online]. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>, [Feb, 17, 2020].
- [55] Climate Data, “Clima:México”. [Online]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico-179/> [Dic, 20, 2022].
- [56] INEGI, “Chihuahua”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chih/default.aspx?tema=me&e=08> [Feb, 17, 2020].
- [57] INEGI, “Coahuila”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/default.aspx?tema=me&e=05> [Feb, 17, 2020].
- [58] INEGI, “Durango”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/dur/default.aspx?tema=me&e=10> [Feb, 17, 2020].
- [59] INEGI, “Zacatecas”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/zac/default.aspx?tema=me&e=32> [Feb, 17, 2020].
- [60] INEGI, “San Luis Potosí”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/default.aspx?tema=me&e=24> [Feb, 17, 2020].

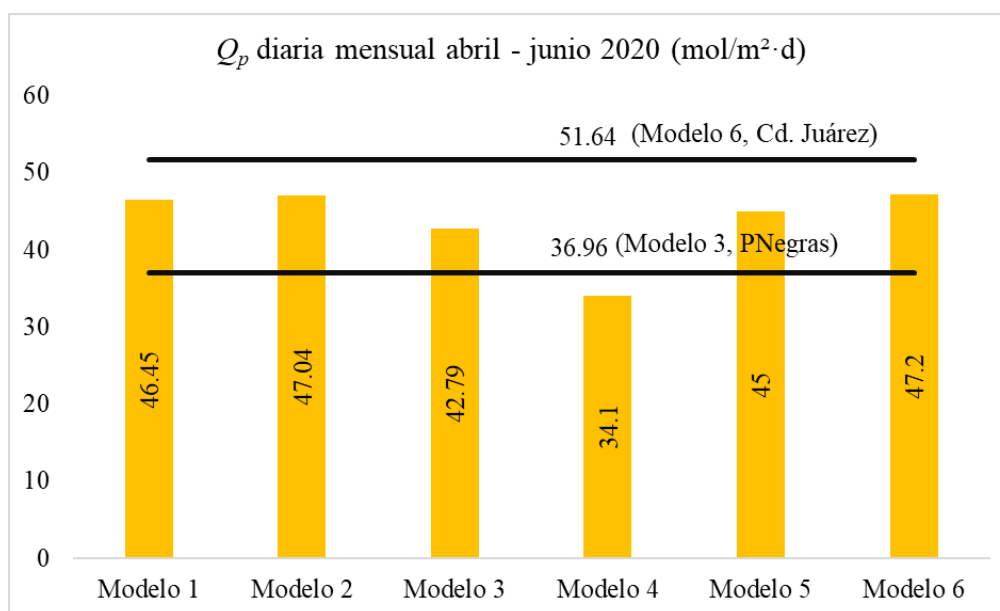
- [61] INEGI, “Nuevo León”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/default.aspx?tema=me&e=19> [Feb, 17, 2020].
- [62] INEGI, “Aguascalientes”. [Online]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/default.aspx?tema=me&e=01> [Feb, 17, 2020].
- [63] CONAGUA, “Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)”. [Online]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> [Mar, 05, 2020].
- [64] CENAPRED, (2019), *Estaciones Meteorológicas*.
- [65] INIFAP, “Mapa de estaciones”. [Online]. Disponible en: <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones/Mapa> [Mar, 06, 2020].
- [66] CICESE, “Base de datos climatológica nacional (Sistema CICLOM)”. [Online]. Disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx/> [Mar, 06, 2020].
- [67] M. M. A. Noriega-Gardea, L. F. Corral-Martínez, M. Anguiano-Morales, G. Trujillo-Schiaffino and D. P. Salas-Peimbert, “Modeling photosynthetically active radiation: A review”. *Atmósfera*, vol. 34(3), 2021, pp. 357-370.
- [68] SunEarthTools, “Calculation of sun’s position in the sky for each location on the earth at any time of day”. [Online]. Disponible en: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php [May, 20, 2020].
- [69] NMX-AA-166/1-SCFI-2013. Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas - parte 1: Especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales. Diario Oficial de la Federación, México, D. F., 18 de julio de 2013.

- [70] NMX-AA-166/2-SCFI-2015. Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. Parte 2: Especificaciones técnicas que deben cumplir el emplazamiento y exposición de los instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales. Diario Oficial de la Federación, México, D. F., 24 de agosto de 2015.
- [71] Xia X, Li Z, Wang P, Cribb M, Chen H and Zhao Y. “Analysis of photosynthetic photon flux density and its parameterization in Northern China”. Agricultural and forest meteorology, vol. 148, 2008, pp. 1101-1108.
- [72] Código Electrónica (O. M. Fernández-Alzate), “DS3231 datasheet”, 2019. [Online]. Disponible en: <http://codigoelectronica.com/blog/ds3231-datasheet> [Nov, 25, 2021].
- [73] Luis Llamas (L. Llamas), “Leer y escribir en una tarjeta sd o micro sd con Arduino”, 2016. [Online]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/tarjeta-micro-sd-arduino/> [Nov, 25, 2021].

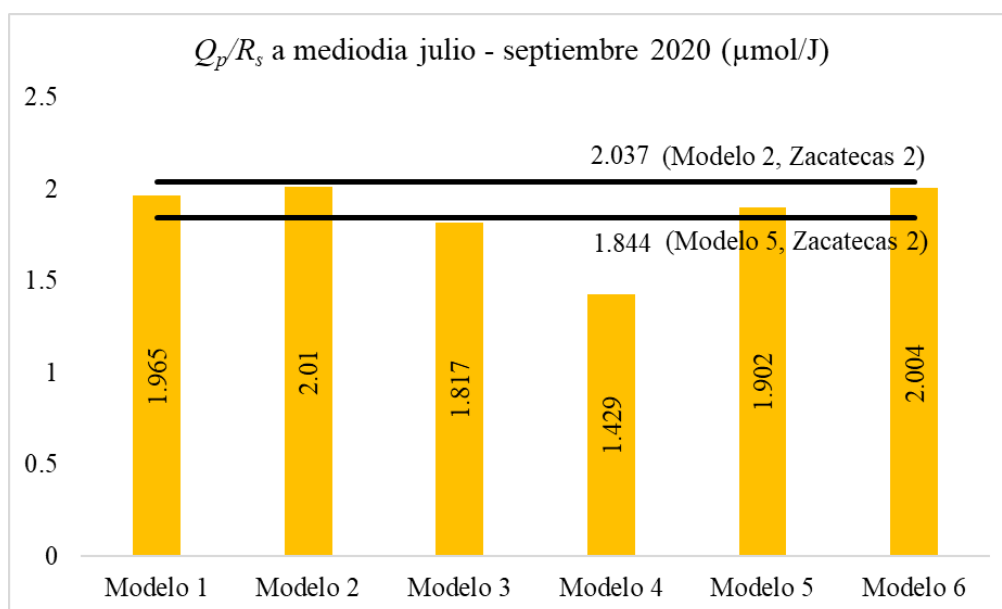
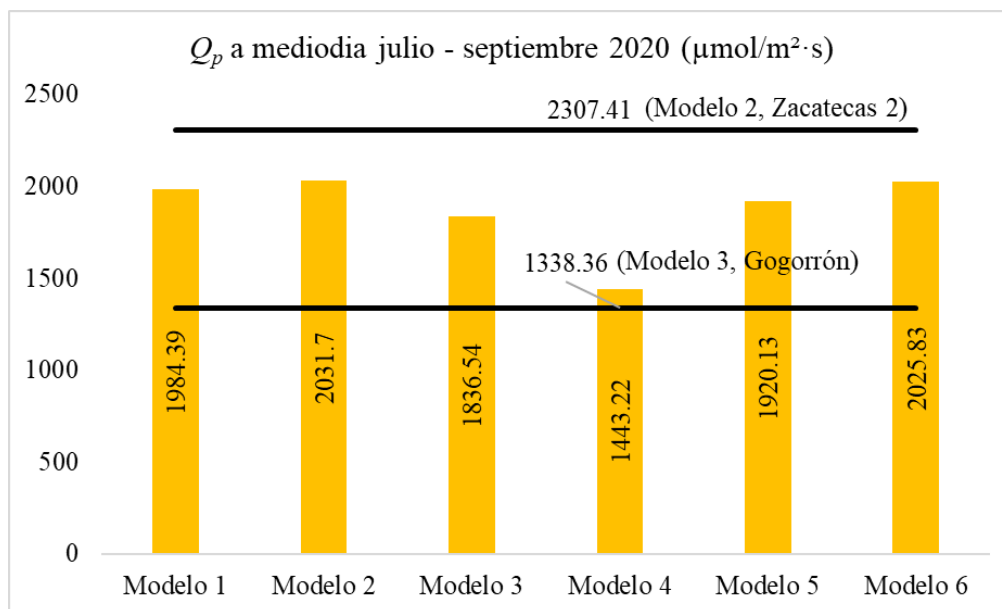
ANEXOS

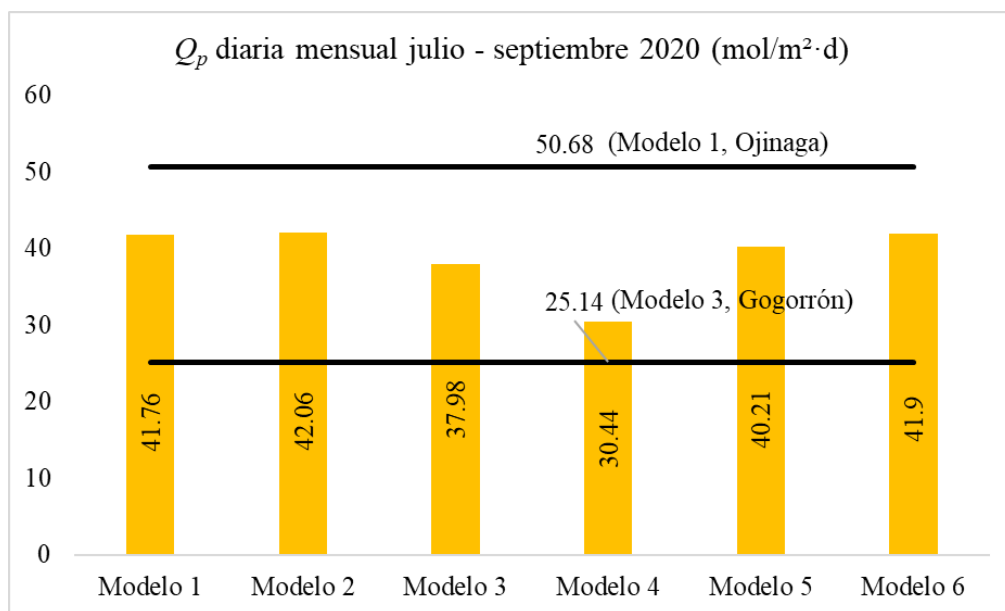
ANEXO 1

ANÁLISIS GRÁFICO DE LA RADIACIÓN EN EL TRIMESTRE ABRIL – JUNIO
DEL 2020

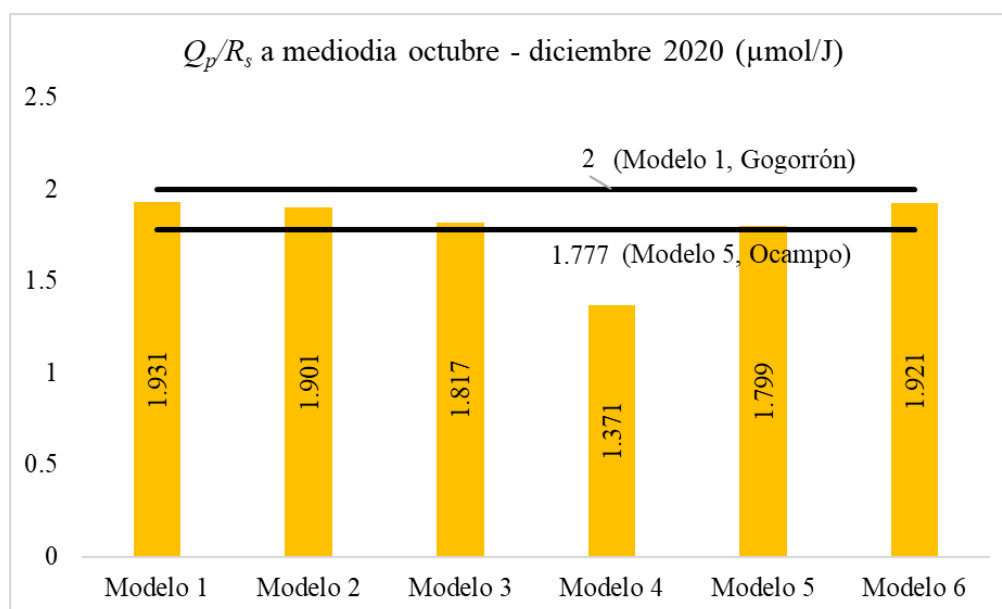
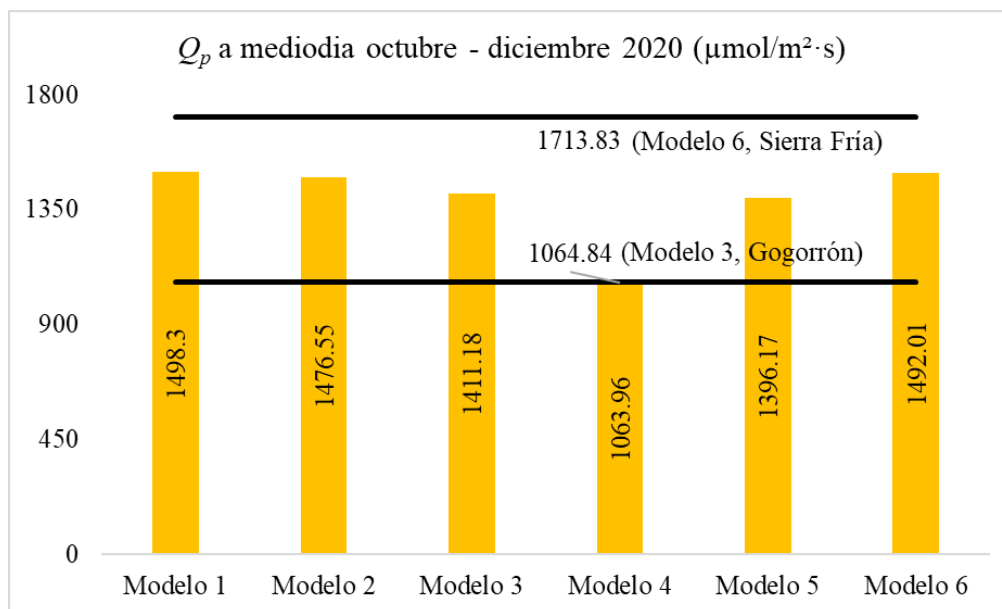


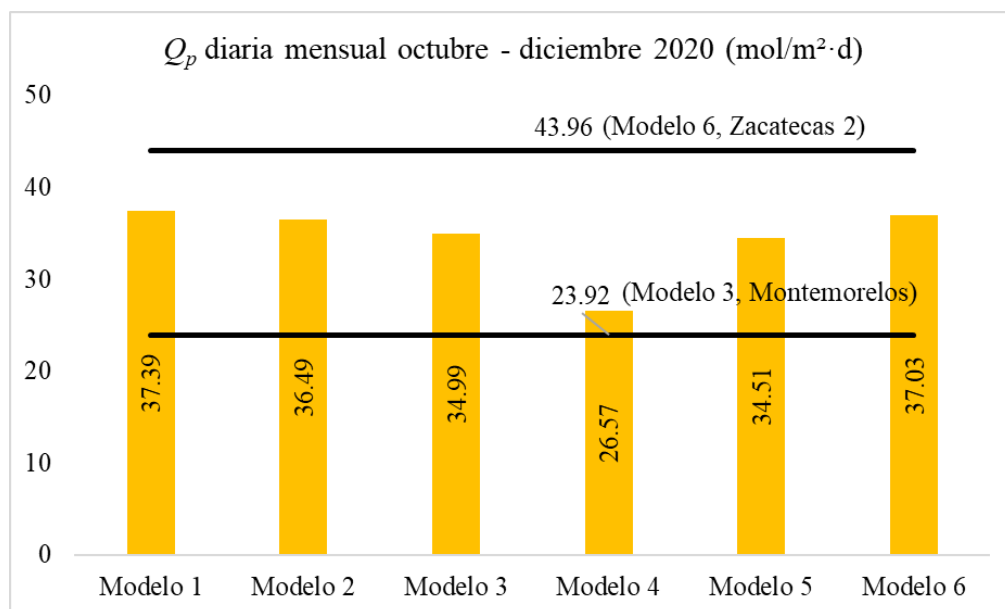
ANEXO 2

ANÁLISIS GRÁFICO DE LA RADIACIÓN EN EL TRIMESTRE JULIO –
SEPTIEMBRE DEL 2020

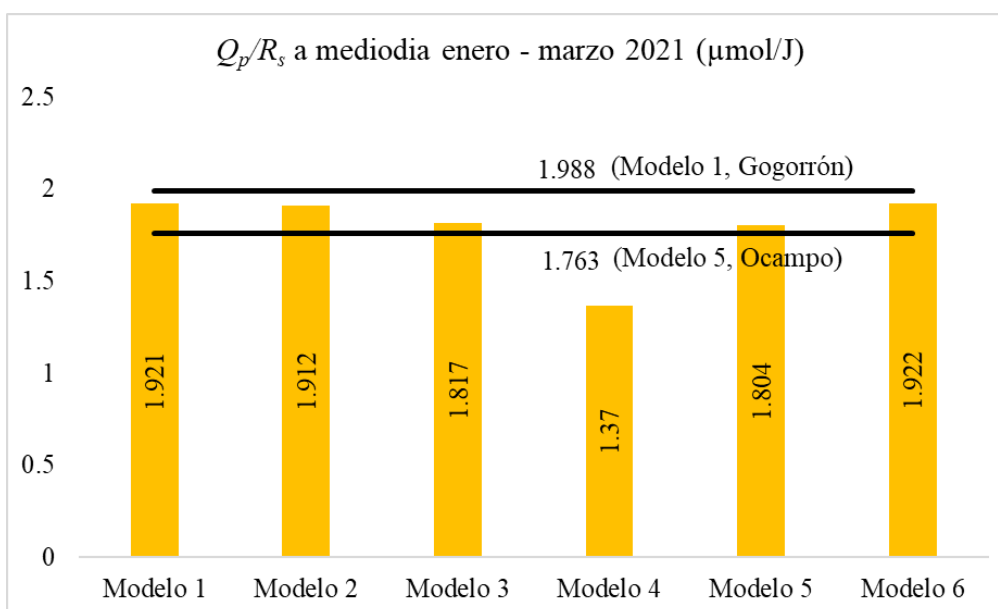
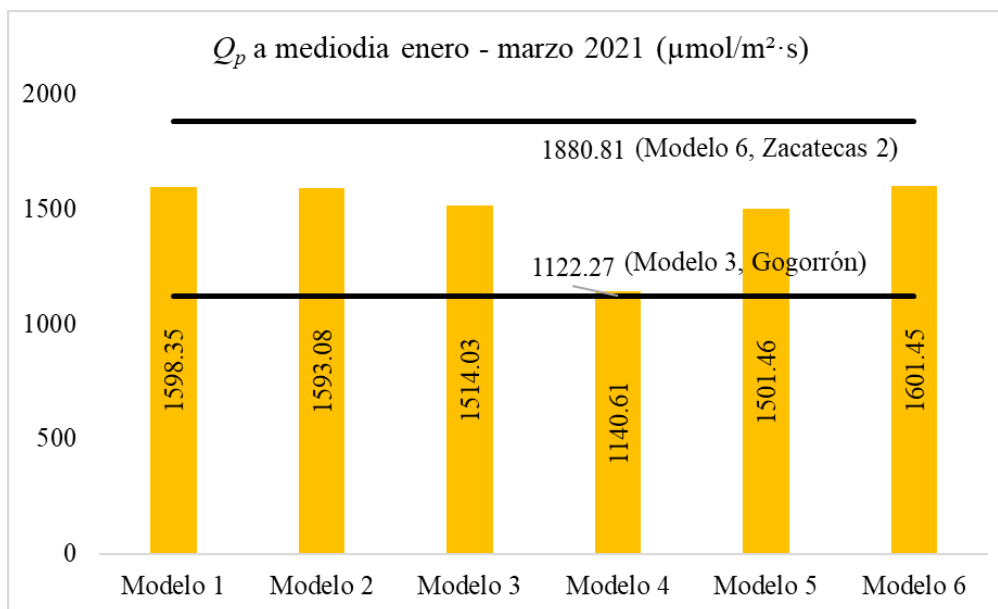


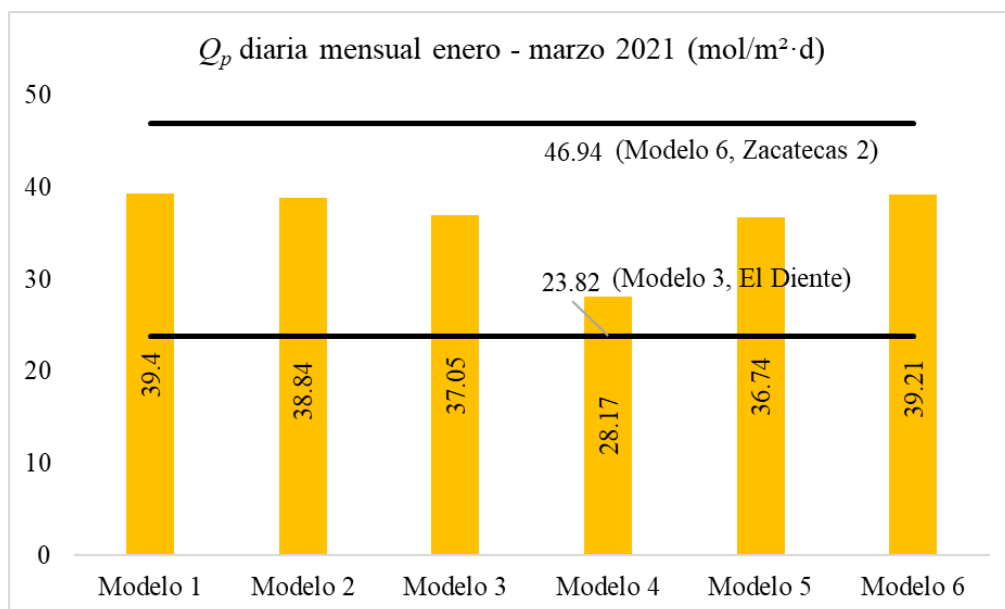
ANEXO 3

ANÁLISIS GRÁFICO DE LA RADIACIÓN EN EL TRIMESTRE OCTUBRE -
DICIEMBRE DEL 2020



ANEXO 4

ANÁLISIS GRÁFICO DE LA RADIACIÓN EN EL TRIMESTRE ENERO - MARZO
DEL 2021



ANEXO 5

ANÁLISIS GRÁFICO DE LA RADIACIÓN EN EL TRIMESTRE ABRIL - JUNIO
DEL 2021