



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

**Influencia de datos meteorológicos erróneos en  
simulación de sistemas de aprovechamiento solar**

presentada por  
**Ing. Lucila Virginia Márquez Luna**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestra en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis  
**Dr. José Jassón Flores Prieto**

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2022.



Cuernavaca, Mor., **03/agosto/2022**

No. Oficio: DIM/223/2022

Asunto Aceptación de documento de tesis

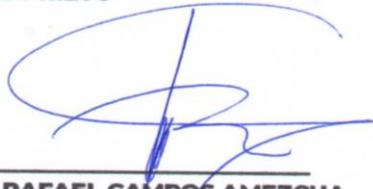
**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **LUCILA VIRGINIA MARQUEZ LUNA**, con número de control M20CE052 , de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"INFLUENCIA DE DATOS METEOROLÓGICOS ERRÓNEOS EN SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO SOLAR"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

**ATENTAMENTE**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO**  
Director De Tesis

  
\_\_\_\_\_  
**DR. MIGUEL ÁNGEL CHAGOLLA ARANDA**  
Revisor 1

  
\_\_\_\_\_  
**DR. RAFAEL CAMPOS AMEZCUA**  
Revisor 2

  
\_\_\_\_\_  
**DR. HUGO ESTRADA ESQUIVEL**  
Revisor 3

c.c.p: Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza  
c.c.p: Expediente  
MAGJ/RMA





Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

06/septiembre/2022  
SAC/140/2022  
Autorización de  
impresión de tesis

**LUCILA VIRGINIA MARQUEZ LUNA  
CANDIDATO(A) AL GRADO DE MAESTRO(A) EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA MECÁNICA  
P R E S E N T E**

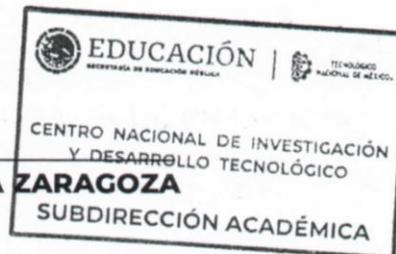
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "INFLUENCIA DE DATOS METEOROLÓGICOS ERRÓNEOS EN SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO SOLAR", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
"Educación Tecnológica al Servicio de México"

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/CHG



## Agradecimientos

*Al Tecnológico Nacional de México- Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) y a mis profesores por la formación académica a nivel maestría.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proveer el apoyo financiero.*

*Al proyecto **PRODETES17-PCL-000020** por las facilidades a las instalaciones y equipamiento.*

*A mi **director de tesis**, por su mentoría en el desarrollo de este proyecto.*

*A mi **comité revisor**, por sus observaciones y consejos.*

## Dedicatoria

*Para **Naty** y **Héctor**, por apoyarme a continuar con este sueño.*

## RESUMEN

En este trabajo se estudia la incertidumbre de evaluación termo-económica de un sistema de calentamiento solar utilizando bases de datos erróneas de irradiancia global de una estación meteorológica automática, *EMA*. El estudio considera un calentador de agua con colectores de placa plana de escala industrial ubicado en Xochitepec, Mor., México. La incertidumbre se determina haciendo un comparativo de la energía térmica útil solar anual, la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación de la inversión, con bases de datos crudas y corregidas de irradiancia global. La base de datos corregida se obtiene ordenando la base de datos cruda respecto a un vector de datos patrón de tiempo. Los datos faltantes y fuera de intervalo se filtran contrastándolos con modelos de irradiancia extraterrestre y considerando el ángulo zenit. Los datos erróneos se corrigen con un modelo de irradiancia optimizado para la zona de estudio. La energía térmica útil solar se determina, construyendo y verificando una plataforma de simulación transitoria basada en componentes. La base de datos cruda se compone de 433467 registros, del 01 de junio del 2020 al 31 de mayo del 2021 de 00:00 a 23:59 *h* con pasos de tiempo de un minuto; es de observar que presentó un considerable 71.0% de datos erróneos, 374025 registros. El 39.3% de datos erróneos fue por error de respuesta al coseno del sensor, el 17.5% por datos faltantes, el 10.7% por datos fuera del límite inferior y el 3.5% por datos fuera de límite superior. En sistemas de calentamiento solar de agua, una incertidumbre de la irradiancia del 71.0% afecta un 55.0% la energía térmica útil solar, y esta a su vez, afecta un 64.3% la tasa interna de retorno y hasta un 33.9% el periodo de recuperación de la inversión. Con la corrección de la base de datos, el calor solar se incrementó 24.8 *MWh*, equivalentes a 130 días de calor solar, la tasa interna de retorno aumentó 9.0% y el periodo de recuperación de la inversión disminuyó 2.1 años. Para la ciudad de Monterrey, el estudio mostró una incertidumbre de la irradiancia del 80.0% que afecta un 4.7% la energía térmica útil solar, y esta a su vez, afecta un 11.1% la tasa interna de retorno y un 4.5% el periodo de recuperación de la inversión. Los resultados muestran que el efecto de datos de irradiancia erróneos de estaciones meteorológicas es considerable en el desempeño termo-económico de un sistema de calentamiento solar de agua, y puede llegar a limitar proyectos viables. El tratamiento de datos de irradiancia puede utilizarse como una

alternativa para disminuir el efecto de datos erróneos en la evaluación de escenarios de inversión de sistemas de aprovechamiento solar.

## **Contenido**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Revisión bibliográfica.....	5
Estándares aplicables .....	5
Evaluación del recurso solar .....	5
Control de calidad de bases de datos de radiación solar .....	6
Modelos teóricos de radiación solar.....	6
Evaluación termo-económica de sistemas de calentamiento solar de agua.....	7
Evaluación del recurso solar y control de calidad en bases de datos solarimétricas en México. ....	8
Conclusión de la revisión bibliográfica.....	8
1.3 Objetivos y alcances .....	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos .....	9
Alcances.....	9
1.4 Estructura de tesis y difusión del trabajo .....	10
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA .....	12
2.1 Metodología teórico-experimental.....	13
Modelo físico del calentador solar .....	15
Modelo matemático de la incertidumbre de la evaluación termo-económica .....	16
Estrategia experimental.....	20
2.2 Características del calentador solar y localización .....	23
Calentador solar con almacenamiento .....	23
Localización del sistema .....	24
CAPÍTULO 3. PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN.....	26
3.1 Plataforma de corrección de bases de datos de irradiancia .....	27
Subrutina A) Ordenamiento .....	28
Subrutina B) Análisis de confiabilidad .....	28
Subrutina C) Calibración y selección del modelo de corrección de irradiancia.....	29
Subrutina D) Corrección de base de datos de irradiancia .....	31

3.2 Plataforma de evaluación térmica y validación .....	32
Configuración de la plataforma térmica.....	33
Validación y verificación de la plataforma térmica .....	34
Subrutina E) Incertidumbre de la evaluación térmica .....	35
3.3 Plataforma de evaluación económica y verificación.....	36
Configuración de la plataforma económica .....	37
Comparación de la plataforma de evaluación económica .....	38
Subrutina F) Incertidumbre en la evaluación económica .....	38
CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....	39
4.1 Confiabilidad, corrección de la base de datos e incertidumbre de la evaluación del recurso solar en Xochitepec, Mor. ....	40
Confiabilidad de la base de datos de irradiancia .....	40
Corrección de base de datos de irradiancia .....	42
Incertidumbre en la evaluación del recurso solar.....	46
4.3 Incertidumbre de la evaluación termo-económica del calentador solar de agua en Xochitepec, Mor. ...	49
Incertidumbre de la evaluación térmica .....	49
Incertidumbre de la evaluación económica del sistema .....	51
4.4 Incertidumbre de la evaluación termo-económica del calentador solar de agua en Monterrey, NL. ....	52
Selección de la ciudad.....	52
Confiabilidad de la base de datos de irradiancia de Monterrey .....	53
Corrección de la base de datos y recurso solar de Monterrey .....	53
Incertidumbre de la evaluación termo-económica del sistema .....	54
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....	56
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Recomendación para trabajos futuros.....	59
APÉNDICE 1. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	60
A1.1 Evaluación económica del sistema en Xochitepec, Morelos. ....	60
A1.2 Evaluación económica del sistema en Monterrey, NL.....	62
REFERENCIAS .....	64

## Lista de figuras

<b>Figura 1.1</b> Constancias recibidas en la difusión del trabajo de tesis: (izq.) Participación en el Taller de Cómputo Evolutivo Aplicado a Modelos Computacionales orientados a internet de las cosas y ciudades inteligentes y (der.) Participación en la n la 8va. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada.	11
<b>Figura 2.1</b> Metodología general del proyecto.	14
<b>Figura 2.2</b> Modelo físico.	15
<b>Figura 2.3</b> Estrategia de monitoreo de variables experimentales.	20
<b>Figura 2.4</b> Fotografía de los sensores que componen estación meteorológica.	21
<b>Figura 2.5</b> Base de datos de mediciones en campo.	22
<b>Figura 2.6</b> Esquema del sistema de calentamiento de agua.	23
<b>Figura 2.7</b> Campo de colectores de agua.	24
<b>Figura 2.8</b> Ubicación del sistema en estudio, a) Ubicación geográfica del municipio de Xochitepec, b) Fotografía aérea del laboratorio. (Google Maps)	25
<b>Figura 2.9</b> Promedios mensuales de la temperatura ambiente y humedad relativa para la zona de estudio.	25
<b>Figura 3.1</b> Diagrama de flujo de la plataforma para corrección de bases de datos de irradiancia.	27
<b>Figura 3.2</b> Representación del proceso de ordenamiento de los datos.	28
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de flujo de la plataforma para la evaluación térmica del sistema.	32
<b>Figura 3.4</b> Plataforma de evaluación térmica del sistema.	33
<b>Figura 3.5</b> Resultados de la validación y la verificación de la plataforma de evaluación térmica.	35
<b>Figura 3.6</b> Diagrama de flujo de la plataforma para la evaluación económica del sistema.	36
<b>Figura 3.7</b> Plataforma de evaluación económica.	37
<b>Figura 4.1</b> Datos erróneos de la base de datos de Xochitepec, Mor.	41

<b>Figura 4.2</b> Comparativo de los datos de irradiancia medidos con las estimaciones de los modelos (M1-6) del 01 de junio del 2020.	43
<b>Figura 4.3</b> Comparativa de la evaluación del recurso solar crudo y corregido.	47
<b>Figura 4.4</b> Diferencia del recurso solar evaluado con la base de datos cruda y corregida, también se presenta el recurso solar con la base de datos correspondiente <i>TMY</i> de <i>Meteonorm 8</i> .	48
<b>Figura 4.5</b> Comparativo de la evaluación térmica anual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos.	49
<b>Figura 4.6</b> Comparativo de la evaluación térmica mensual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos.	50
<b>Figura 4.7</b> Comparativo de la evaluación económica del sistema de calentamiento de agua con datos crudos y corregidos.	51
<b>Figura 4.8</b> Producto Interno Bruto por Entidad Federativa en 2020. (INEGI).	52
<b>Figura 4.9</b> Datos erróneos de la base de datos de Monterrey.	53
<b>Figura 4.10</b> Diferencia del recurso solar en Monterrey con la base de datos cruda y corregida.	54
<b>Figura 4.11</b> Comparativo de la evaluación térmica anual del sistema de calentamiento solar de agua en Monterrey con datos de irradiancia crudos y corregidos.	55
<b>Figura 4.12</b> Comparativo de la evaluación económica del sistema de calentamiento de agua en Monterrey con datos crudos y corregidos.	55

## **Lista de tablas**

<b>Tabla 2.1</b> Instrumentación del sistema de monitoreo.	21
<b>Tabla 2.2</b> Características de los componentes del sistema.	24
<b>Tabla 3.1</b> Filtros para identificación de datos erróneos.	29
<b>Tabla 3.2</b> Modelos de irradiancia.	30
<b>Tabla 4.1</b> Confiabilidad de la base de datos cruda.	41
<b>Tabla 4.2</b> Comparativo del desempeño de los modelos de irradiancia.	43
<b>Tabla 4.3</b> Resultado de la corrección de las bases de datos de irradiancia.	44
<b>Tabla A1.1</b> Cotización del sistema de calentamiento solar de agua.	60
<b>Tabla A1.2</b> Evaluación económica del calentador en Xochitepec con datos crudos.	60
<b>Tabla A1.3</b> Evaluación económica del calentador en Xochitepec con datos corregidos.	61
<b>Tabla A1.4</b> Evaluación económica del calentador en Monterrey con datos crudos.	62
<b>Tabla A1.5</b> Evaluación económica del calentador en Monterrey con datos corregidos.	63

## Nomenclatura

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$a_0$	Coeficiente de eficiencia de intercepción de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	-
$a_1$	Coeficiente de eficiencia de inclinación de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	$W/m^2 K$
$a_2$	Coeficiente de eficiencia de curvatura de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	$W/m^2 K$
$A$	Área de captación por colector de agua	$m^2$
$A_{sg}$	Área total del campo de colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	$m^2$
$A_{dg}$	Área total del campo de colectores solar de agua de placa plana de vidrio doble	$m^2$
$a, b$ y $c$	Coeficientes de los modelos de radiación	-
$Azimut$	Ángulo azimut	$^{\circ}$
$b_0$	Coeficiente de eficiencia de intercepción de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio doble	-
$b_1$	Coeficiente de eficiencia de inclinación de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio doble	$W/m^2 K$
$b_2$	Coeficiente de eficiencia de curvatura de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio doble	$W/m^2 K$
$C_l$	Costo del litro de gas LP	$\$/l$
$C_{kWh}$	Costo del $kWh$ de gas LP	$\$$
$cp_{tk}$	Calor específico a presión constante del agua	$kJ/kg K$
$E_0$	Irradiancia extraterrestre	$W/m^2$
$E_a$	Error de la validación	$\%$
$E_b$	Error de la verificación	$\%$
$E_R$	Error relativo	$\%$
$F$	Flujo de efectivo anual	$\$$

$F_m$	Flujo másico de agua	kg/h
$F_{p,max}$	Flujo máximo de la bomba	kg/h
$G$	Irradiancia global	W/m <sup>2</sup>
$G_{med}$	Valor de la irradiancia medida	W/m <sup>2</sup>
$G_{est}$	Valor de la irradiancia estimada con el modelo	W/m <sup>2</sup>
$h$	Altura del tanque de almacenamiento	m
$H_{amb}$	Humedad ambiente	°C
$HR$	Humedad relativa	°C
$I$	Recurso solar (Irradiación)	kWh/m <sup>2</sup>
$I_{nv}$	Valor de la inversión inicial del proyecto	\$
$j$	Periodo del proyecto	-
$L_{at}$	Latitud	°
$L_{loc}$	Longitud local	°
$L_{ref}$	Longitud de referencia	°
$m_{tk}$	Masa de agua del tanque de almacenamiento térmico	kg
$MAPE$	Error Porcentual Absoluto Medio	%
$n$	Número de años de evaluación del proyecto	-
$N$	Número de observaciones	-
$P_c$	Poder calorífico del gas LP	kWh/l
$P_{pump}$	Potencia de la bomba	kW
$PR$	Plazo de recuperación de la inversión	años
$Q_{dg}$	Energía térmica de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio doble	kWh

$Q_{G,sg}$	Energía incidente sobre los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	<i>kWh</i>
$Q_{G,dg}$	Energía incidente sobre los colectores solares de agua de placa plana de vidrio doble	<i>kWh</i>
$Q_{sg}$	Energía térmica de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	<i>kWh</i>
$Q_{tk}$	Energía térmica del tanque de almacenamiento	<i>kWh</i>
$Q_u$	Energía térmica útil del sistema	<i>kWh</i>
$Q_{u-AS}$	Energía térmica útil del sistema de la literatura	<i>kWh</i>
$Q_{u-exp}$	Energía térmica útil del sistema experimental	<i>kWh</i>
$Q_{u-sim}$	Energía térmica útil del sistema simulada	<i>kWh</i>
<i>RMSE</i>	Error cuadrático medio	-
<i>Slope</i>	Ángulo de inclinación	°
$\Delta T$	Diferencia de temperatura entre la $T_{mx}$ y $T_{mn}$	°C
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	°C
$T_{in,s}$	Temperatura de entrada a los colectores solares de agua	°C
$T_{INT}$	Temperatura de salida integrada	°C
$T_{INT-exp}$	Temperatura de salida integrada de la simulación	°C
$T_{INT-sim}$	Temperatura de salida integrada experimental	°C
$T_{INT-AS}$	Temperatura de salida integrada de la literatura	°C
$T_{mx}$	Temperatura máxima	°C
$T_{mn}$	Temperatura mínima	°C
$T_{tka}$	Temperatura en la parte superior del tanque de almacenamiento térmico	°C
$T_{tkb}$	Temperatura en la parte media del tanque de almacenamiento térmico	°C
$T_{tke}$	Temperatura en la parte inferior del tanque de almacenamiento térmico	°C

$T_{out,dg}$	Temperatura de salida de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio doble	°C
$T_{out,s}$	Temperatura de salida de los colectores solares de agua	°C
$T_{out,sg}$	Temperatura de salida de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo	°C
$T_{out,s-AS}$	Temperatura de salida de los colectores solares de agua verificación	°C
$T_{out,s-exp}$	Temperatura de salida de los colectores solares de agua experimental	°C
$T_{out,s-sim}$	Temperatura de salida de los colectores solares de agua simulada	°C
$T_p$	Temperatura promedio	°C
$TR$	Relación de temperatura entre $T_{mx}$ y $T_{mn}$	°C
$TIR$	Tasa interna de retorno	%
$U_I$	Incertidumbre del recurso solar	%
$U_{PR}$	Incertidumbre de la energía térmica útil	%
$U_{Qu}$	Incertidumbre de la energía térmica útil	%
$U_{TIR}$	Incertidumbre de la energía térmica útil	%
$U_{ik}$	Energía térmica perdida del tanque de almacenamiento	kWh
$V$	Capacidad de almacenamiento del tanque térmico	$m^3$
$VAN$	Valor actual neto	\$
$Z$	Ángulo zenit	°

*Nota: En el texto, los símbolos con subíndice "c" indican que se emplearon datos de irradiancia corregida en los cálculos.*

## **Acrónimos**

<i>DEC</i>	Datos afectados por el error de respuesta al coseno del piranómetro
<i>DFA</i>	Datos faltantes
<i>DFLI</i>	Datos fuera del límite inferior
<i>DFLS</i>	Datos fuera del límite superior
<i>EMA</i>	Estaciones Meteorológicas Automáticas
<i>NA</i>	Dato no disponible
<i>PI</i>	Punto de integración
<i>SMN</i>	Servicio Meteorológico Nacional
<i>TMY</i>	Typical Meteorological Year
<i>WMO</i>	World Meteorological Organization

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta la motivación del estudio, la revisión bibliográfica que considera principalmente artículos de revistas y de congresos, además de la normativa aplicable. La revisión bibliográfica clasifica los trabajos analizados en las siguientes categorías: estándares aplicables, evaluación del recurso solar, control de calidad de bases de datos de radiación solar, modelos teóricos de radiación solar, evaluación termo-económica de sistemas de calentamiento solar de agua, evaluación del recurso solar y control de calidad en bases de datos de radiación solar en México. En esta sección también se presentan los objetivos, alcances y se describen los documentos que se elaboraron para la difusión de la investigación.

## **1.1 Motivación**

En los últimos años, la industria solar experimenta un crecimiento nunca visto, las tecnologías de energía solar fotovoltaica y solar térmica se están implementando a un ritmo acelerado en todo el mundo [1]. El rendimiento de los sistemas de aprovechamiento solar, en una ubicación determinada, depende de la insolación disponible, así como de otros parámetros meteorológicos, como lo son, la temperatura y el viento [2]. La información confiable sobre el recurso solar es un insumo crítico para la planificación exitosa de proyectos solares [3], [4], [5] y [6]. Las fuentes principales de información de irradiancia son mapas de radiación solar, bases de datos por medio de software y bases de datos de mediciones en sitio. Los mapas de radiación solar se enfocan principalmente en la irradiancia global. La metodología de estos trabajos incluye el uso de modelos matemáticos como la ecuación de Reddy, la ecuación de Angstrom, el modelo físico *DIM* y el modelo *CSR*, así como datos meteorológicos, nubosidad y horas de insolación mayormente proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional, *SMN*. Sin embargo, los mapas de radiación solar aún no consideran la orografía del país, y el tratamiento de las bases de datos presenta pocos reportes, ocasionando que la validez de los datos interpolados sea cuestionable [7]. Además, los resultados entre diferentes autores presentan, en general, diferencias del 20%. Las diferencias en los resultados son debido a la naturaleza empírica del método utilizado y a la falta de sitios de medición en superficie para calibrar los modelos [8]. Por otro lado, *Meteonorm* representa una referencia meteorológica por software para aplicaciones de energía solar en países como México y regiones de todo el mundo [9]. *Meteonorm* consta de varias bases de datos climáticos de más de 8000 estaciones en todo el mundo, con ello proporciona valores horarios de la radiación global, de la temperatura y de otros parámetros meteorológicos que se estiman mediante algoritmos de cálculo incluidos en el programa [7]. No obstante, la certidumbre de los datos de la plataforma es limitada [10]. Usualmente, la medición en sitio de la radiación solar en la superficie terrestre se realiza mediante instrumentos llamados piranómetros instalados en el lugar de interés [11]. La medición se considera la forma más confiable de evaluar el recurso solar ya que determina el flujo de energía incidente en una ubicación en cuestión [4]. Actualmente, las mediciones se realizan en una gran cantidad de observatorios meteorológicos alrededor del mundo. Sin embargo, las mediciones de radiación solar son de difícil acceso debido a los altos costos en instrumentación, mantenimiento y requisitos de

calibración de los equipos de medición [6]. Como resultado del incremento exponencial en la aplicación de la tecnología solar, las bases de datos con mediciones del recurso solar disponible presentan cada vez mayor demanda.

Actualmente, gran cantidad de bases de datos de irradiancia están disponible vía internet. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los datos no han sido debidamente tratados y pueden contener errores. [12]. Los principales errores son debido a cuestiones ambientales, como capas de arena, polvo, nieve o hielo en el domo, mal ajuste en la superficie receptora, humedad dentro del domo [13] y a efectos de la orografía del lugar [14]. Con lo anterior, y para reducir incertidumbres en las bases de datos, las mediciones de irradiación se revisan en dos etapas: control técnico y control de calidad. El control técnico, considera la revisión, mantenimiento y calibración de los sensores y equipos. El control de calidad considera la identificación de los datos dudosos y su corrección mediante modelos teóricos de radiación solar. Los procedimientos de control de calidad son guiados por principios físicos que determinan las relaciones entre los parámetros medidos además de análisis estadístico [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] y [19]. La corrección de los datos dudosos se ha realizado empleando modelos teóricos de radiación solar. Los modelos teóricos son ecuaciones para la estimación de la radiación solar usando datos de variables normalmente disponibles en la mayoría de las estaciones meteorológicas [4], [20], [21] y [22]. En el caso de México, a partir de los años setenta, los datos de radiación solar son mayormente determinados con la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas, *EMA*, del *SMN* y, a partir del 2015, también de la Red Solarimétrica Mexicana [23] y [24]. En la evaluación del recurso solar, los estudios de confiabilidad las *EMAS* en México muestran que es limitada. En diferentes trabajos se ha observado que, en la primera década de funcionamiento de las *EMAS* instaladas en México se presentan considerables derivas e incertidumbres, que han dado lugar al estudio de la confiabilidad de las bases de datos en nuestro país [8], [18], [19] y [25]. Los errores por datos faltantes y datos fuera de intervalo son los que mayormente resaltan llegando a ser hasta del 45.0%, que representan incertidumbres en la evaluación del recurso solar de hasta del 63.0%. La incertidumbre de las bases de datos afecta la evaluación del escenario económico, energético y ambiental de los proyectos de aprovechamiento solar.

A partir del análisis precedente, se puede resumir que la confiabilidad de las bases de datos provenientes de las *EMAS* en México es incipiente, lo que afecta considerablemente la evaluación del recurso solar y limita la capacidad de realizar proyectos productivos. En sistemas de calentamiento solar, una incertidumbre de la radiación solar del 10.0% afecta un 2.0% en el parámetro financiero ahorro del ciclo de vida, *LCS* [3]. Como se mencionó anteriormente, la medición en sitio de las variables meteorológicas representa el medio más confiable de evaluar el desempeño de un sistema de aprovechamiento solar. No obstante, en México, la incertidumbre de los datos de estaciones meteorológicas debido a las irregularidades en la calibración y mantenimiento aún es desconocida. Hasta el momento, la influencia de la incertidumbre de los datos de radiación solar solamente se ha estudiado para el parámetro de *LCS*. No obstante, el parámetro de *LCS* está mayormente relacionado con el valor de la inversión inicial y no presenta sensibilidad frente a la incertidumbre de las bases de datos de radiación solar. La incertidumbre de las bases de datos de irradiancia puede reflejarse de manera considerable en la incertidumbre en la evaluación termo-económica de un sistema de calentamiento solar en términos de la energía térmica útil y en otros parámetros económicos diferentes al *LCS*. Por ello, los estudios paramétricos del efecto de datos de irradiancia erróneos de estaciones meteorológicas en la evaluación de escenarios de inversión de proyectos de aprovechamiento solar pueden dar mayor certidumbre al desempeño termo económico de sistemas de calentamiento solar, en términos de la energía térmica útil,  $Q_u$ , la tasa interna de retorno, *TIR* y el periodo de recuperación de la inversión, *PR*.

## **1.2 Revisión bibliográfica**

En la revisión bibliográfica se presenta el estado del arte de la evaluación del recurso solar y control de calidad en bases de datos de irradiancia en México. También, se analizan los estándares aplicables, la evaluación del recurso solar, control de calidad a bases de datos de radiación solar, modelos teóricos de radiación solar y evaluación de sistemas de calentamiento solar a nivel mundial.

### ***Estándares aplicables***

Los estándares de medición de variables meteorológicas, pruebas de sistemas de calentamiento solar y estimación de incertidumbre son los temas que se consideraron primordiales en la revisión de estándares aplicables. Actualmente, existen estándares para la medición de irradiancia solar, nacionales e internacionales, que establecen las especificaciones técnicas requeridas de los instrumentos de medición y los lineamientos de instalación, mantenimiento y calibración de los equipos [26] y [27]. Por otra parte, los estándares nacionales para evaluar el desempeño de sistemas de calentamiento solar de agua especifican los instrumentos a utilizar, los métodos de prueba y los cálculos para determinar la eficiencia térmica y la energía útil de estos sistemas [28] y [29]. Así mismo, existen guías que establecen el modelo matemático a seguir para la estimación de incertidumbre de las mediciones [30]. Sin embargo, a pesar de que existen estándares para la medición de la irradiancia solar, en la revisión literaria no se encontraron guías ni estándares para el tratamiento de las bases de datos de irradiancia.

### ***Evaluación del recurso solar***

Actualmente existen diversas fuentes de información de irradiancia como lo son bases de datos de estaciones meteorológicas, mapas de radiación solar y bases de datos por software. Recientemente, los mapas de radiación solar son derivados de datos de satélite [5] y [31]. Los datos de estaciones meteorológicas son considerados la fuente con menor incertidumbre y comúnmente se utilizan para la validación de los mapas de radiación solar y modelos teóricos, [5], [6] y [31]. Los resultados de las validaciones dependen de la resolución de las imágenes y el espacio temporal entre datos. Como fuente de información de irradiancia, las

bases de datos de *Meteonorm* es la más utilizada, tanto en la investigación como en la industria, Sin embargo, estudios recientes muestran que la incertidumbre de *Meteonorm* puede llegar a ser hasta del 20% [10]. Así, los datos derivados de estaciones meteorológicas son considerados la principal fuente de información de irradiancia con mayor credibilidad, o menor incertidumbre.

### ***Control de calidad de bases de datos de radiación solar***

Los procedimientos de control de calidad en las bases de datos de radiación solar surgen debido a la necesidad de evaluar la confiabilidad de los datos y marcar aquellos datos sospechosos [13]. El análisis de la revisión bibliográfica anterior permitió observar que en la última década los estudios sobre el control de calidad en bases de datos de radiación solar han tenido un mayor auge [14], [15], [16] y [17]. La variable de estudio principal en los trabajos del estado del arte fue la irradiancia global,  $G$ , que se presenta en el 87% de los estudios revisados [2], [4], [12], [14], [15], [16] y [17]. Las principales pruebas de control de calidad en bases de datos son límites físicos posibles considerando la irradiancia extraterrestre, condiciones de cielo claro y alta nubosidad [12], [13], [14], [15] y [16]. A partir del 2011, las pruebas de control de calidad incluyeron revisiones por periodos buscando picos o saltos entre observaciones [2] y [17]. También, se consideran pruebas de consistencia espacial, donde los resultados de las mediciones son comparados con los datos de estaciones vecinas tomando en cuenta los efectos de la orografía del lugar [14]. Con lo anterior se observa que existe interés considerable en la corrección de bases de datos de irradiancia global debido a la necesidad de incrementar su confiabilidad. Sin embargo, los procedimientos de control de calidad aún no se establecen como un requerimiento previo a su uso en la evaluación de proyectos de aplicaciones de la tecnología para el aprovechamiento solar.

### ***Modelos teóricos de radiación solar***

La revisión de estudios sobre la evaluación de la radiación solar mediante modelos teóricos se centró en modelos teóricos basados en variables meteorológicas. Los modelos teóricos son de gran utilidad en lugares donde los datos de radiación solar no están disponibles [20]. En general, el parámetro estadístico comúnmente utilizado para la evaluación de desempeño de

estos modelos es el error medio cuadrático, *RMSE* [20], [21], [22], [32], [33] y [34]. Así, los modelos de radiación solar con mayor aceptabilidad son los basados en la temperatura ambiente con valores de *RMSE* de 2.046 -2.973  $MJ/m^2/d$  [21] y [22]. Los modelos basados en temperatura son los que muestran menor incertidumbre en la estimación del recurso solar y pueden ser utilizados en el control de calidad de las bases de datos, así como también en el tratamiento correctivo.

### ***Evaluación termo-económica de sistemas de calentamiento solar de agua***

La evaluación térmica de sistemas de calentamiento solar se realiza estimando la energía útil diaria,  $Q_u$ , mediante el método de análisis de calorimetría de flujo [19], [35] y [36]. El software comercial para análisis térmico de sistemas de calentamiento solar mayormente empleado es *TRNSYS* [37] y [38]. Los parámetros estadísticos para la evaluación de desempeño de la plataforma de simulación comúnmente empleados son el *RMSE* y el *MAE* [38]. Los indicadores financieros para la evaluación económica de sistemas de aprovechamiento solar más utilizados en la industria son el plazo de recuperación de la inversión, *PR* y la tasa de interna de retorno, *TIR* [37] y [39]. El criterio de aceptación más utilizado para el *PR* es de dos a tres años [39]. Sin embargo, los estudios sobre la influencia de la incertidumbre de datos de radiación solar en la evaluación de sistemas de calentamiento solar sólo representan el 28.0% de los trabajos revisados [3] y [36]. En los estudios de escenarios de inversión, las variables estudiadas hasta el momento son el ahorro del ciclo de vida, *LCS* y el grado de eficiencia energética, *CTP*. Sin embargo, el *LCS* es mayormente afectado por el costo de la inversión inicial y el efecto de la incertidumbre de los datos de irradiación solar es poco considerable en el *LCS*, por lo que un estudio de la sensibilidad de otro parámetro económico es conveniente. En general, los estudios reportados sobre la influencia de la incertidumbre de los datos de irradiancia sobre parámetros como la  $Q_u$ , la *TIR* y el *PR*, que representan los parámetros de evaluación termo-económica de mayor interés en la industria son escasos.

***Evaluación del recurso solar y control de calidad en bases de datos solarimétricas en México.***

En México, la fuente más confiable de datos para la evaluación del recurso solar son las bases de datos de irradiancia solar de estaciones meteorológicas en comparación con los mapas de radiación solar y bases de datos vía software [7] y [8]. La base de datos del *SMN* representa la red de estaciones meteorológicas más grande del país con datos de 189 ubicaciones [40]. En los últimos años, otras organizaciones se han interesado por establecer nuevas redes solarimétricas y aplicar controles de calidad con el objetivo de ofrecer información de irradiancia fiable para ser utilizada en la evaluación del recurso solar [24] y [41]. Sin embargo, estudios recientes muestran que las bases de datos del 74.0% de las estaciones meteorológicas del *SMN* no se consideran óptimas para su uso [25]. Las bases de datos llegan a presentar porcentajes de datos faltantes y fuera de intervalo de 6.9% lo cual representa incertidumbres en la evaluación del recurso de hasta 21.2% [18] y [19]. Los estudios sobre la evaluación de la calidad de bases de datos meteorológicas aún son escasos e incipientes, y el grado de incertidumbre que implica su uso en el desempeño de sistemas de calentamiento solar no se ha estudiado.

***Conclusión de la revisión bibliográfica***

Los datos derivados de estaciones meteorológicas son considerados la principal fuente de información de irradiancia en comparación con otras alternativas debido a que cuentan con menor incertidumbre. Existe un alto interés en la corrección de datos de irradiancia global debido a la necesidad de asegurar la confiabilidad de los datos. Los modelos basados en temperatura pueden ser ampliamente usados en la corrección de bases de datos de irradiancia. Sin embargo, aún no se han establecido procedimientos estándares que aseguren la aplicación de procedimientos de control de calidad en bases de datos de irradiancia. Así mismo, los estudios sobre la evaluación de la calidad de bases de datos meteorológicas aún son escasos e incipientes, y no se ha estudiado el grado de incertidumbre que deriva en los escenarios del desempeño de sistemas de calentamiento solar.

## **1.3 Objetivos y alcances**

### *Objetivo general*

Estudiar la incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar que se produce por la utilización de bases de datos erróneas de irradiancia, de una *EMA*.

### *Objetivos específicos*

- Construir una base de datos de mediciones de irradiancia con piranómetro para un sitio ubicado en el municipio de Xochitepec, Morelos.
- Desarrollar y validar una plataforma de simulación de sistemas de calentamiento solar de agua de placa plana que permita determinar la energía térmica útil del sistema,  $Q_u$ , la tasa interna de retorno, *TIR*, y el plazo de recuperación de la inversión, *PR*, para un tiempo de inversión especificado.
- Determinar la incertidumbre en la evaluación del costo energético y económico debido a datos de irradiancia faltantes y fuera de intervalo.

### *Alcances*

El sistema de estudio es un calentador de agua con colectores de placa plana de escala industrial ubicado en Xochitepec, Mor., México. El estudio evalúa el nivel de incertidumbre energética y económica debido al efecto de datos de irradiancia erróneos. Una vez calibradas la herramienta de evaluación, se estudia un sistema de calentamiento solar en una segunda ciudad con diferente clima, que es representativo para el uso de calentamiento solar en México.

## **1.4 Estructura de tesis y difusión del trabajo**

En el **Capítulo 2** se presentan la metodología teórico-experimental del estudio, que comprende el modelado físico del calentador solar, el modelado matemático termo-económico y la estrategia experimental del proyecto. Posteriormente, en el **Capítulo 3** se presenta el desarrollo de la plataforma de corrección de bases de datos de irradiancia con la que se realiza el ordenamiento, análisis de confiabilidad de la base de datos de irradiancia, selección de modelos de corrección y la corrección de la base de datos de irradiancia. También, la plataforma de evaluación térmica del sistema de calentamiento solar de agua con la que se determina la  $Q_u$ , así como la plataforma de evaluación económica para el cálculo de la  $TIR$ , y el  $PR$ , por una parte, considerando datos de irradiancia crudas y por otra, con datos corregidos. Además, se presentan los ejercicios de prueba realizados para la validación del código numérico implementado. En el **Capítulo 4** se presentan los resultados obtenidos de la confiabilidad de la base de datos, la selección del modelo de corrección, la corrección de la base de datos irradiancia y la evaluación del nivel de incertidumbre de los resultados debido al efecto de datos irradiancia erróneos mediante el comparativo desempeño termo-económico del sistema de calentamiento solar con datos crudos y corregidos. En el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones obtenidas del presente trabajo de tesis. En el **Apéndice 1** se presentan los resultados de la evaluación económica del sistema con datos de irradiancia crudos y corregidos.

En difusión del proyecto se presentó el trabajo "*Incertidumbre en bases de datos de radiación solar en ciudades con alto potencial de aplicaciones*", de manera oral en el marco del Taller de Cómputo Evolutivo Aplicado a Modelos Computacionales orientados a internet de las cosas y ciudades inteligentes, llevado a cabo en Cuernavaca, Morelos., el 27 de octubre de 2021. También, se presentó un artículo de congreso con arbitraje, titulado "*Identificación de la incertidumbre en una matriz de datos de radiación solar de Xochitepec, Morelos*" en la *8va. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, llevado a cabo en Cuernavaca, Morelos., el 26 de mayo de 2022. En la **Figura 1.1** se muestran las constancias recibidas por la difusión del proyecto.



## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA**

En este capítulo se presentan la metodología teórico-experimental para determinar la incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar que se produce por la utilización de bases de datos erróneas de irradiancia, de una EMA.

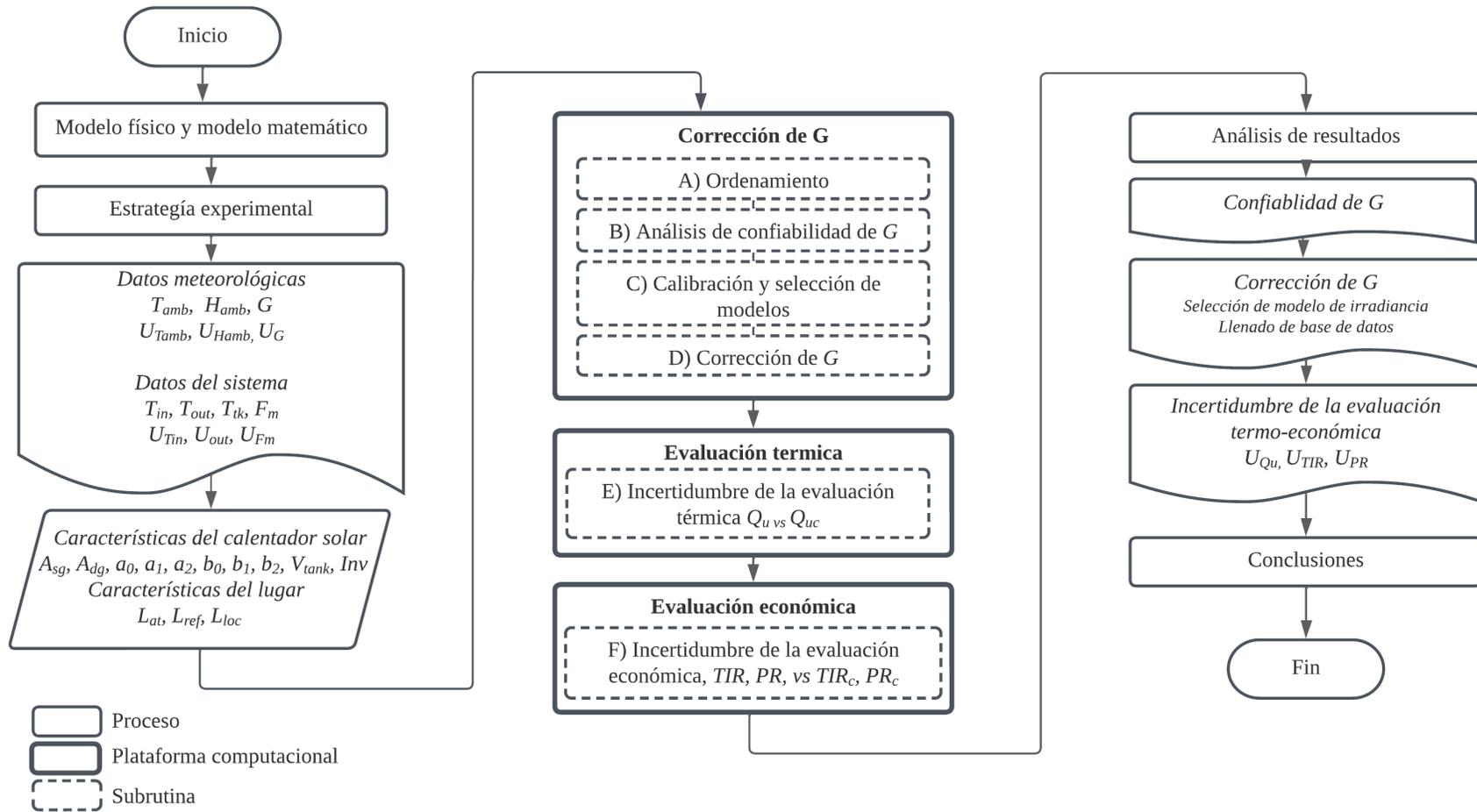
## **2.1 Metodología teórico-experimental**

El estudio de la incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar utilizando bases de datos erróneas de irradiancia de una EMA, consiste en hacer un comparativo de la energía térmica útil del sistema,  $Q_u$ , la tasa interna de retorno,  $TIR$ , y el plazo de recuperación de la inversión,  $PR$ , que se calcula con bases de datos crudas y corregidas de irradiancia global. La metodología se divide en tres etapas.

Primero, se establece el modelo físico del calentador solar, el modelo matemático para el cálculo de la incertidumbre de la evaluación termo-económica, la estrategia experimental para la obtención de la base de datos de variables meteorológicas y del sistema, las características del sistema de calentamiento solar y la localización bajo estudio.

Posteriormente, se considera el desarrollo de las plataformas para la solución del modelo matemático de la incertidumbre de la evaluación termo-económica. En primera instancia, la plataforma de corrección de bases de datos de irradiancia nos permite ordenar la base de datos, identificar y clasificar y corregir los datos erróneos mediante la selección y aplicación de modelos teóricos de irradiancia. También, la plataforma de evaluación térmica permite simular del sistema de calentamiento solar de agua y determinar la energía térmica útil del sistema considerando datos medidos de irradiancia. Así como la plataforma de evaluación económica, que permite estimar los ahorros anuales al implementar el sistema de calentamiento solar y determinar la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación de la inversión del proyecto. Las plataformas se validan previamente para su uso.

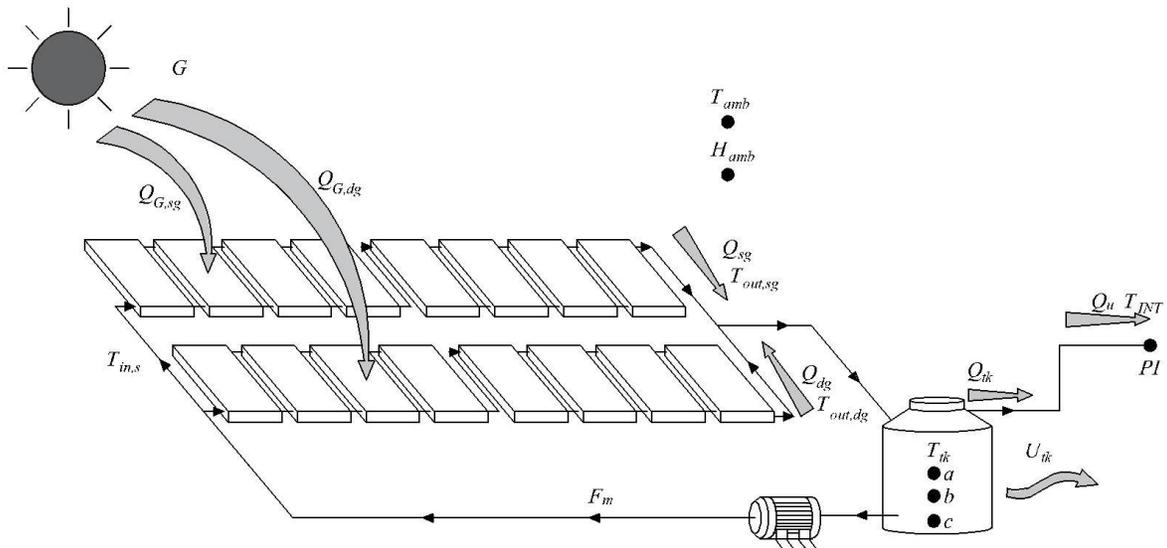
Finalmente, se realiza el análisis de resultados de la confiabilidad, la corrección de la base de datos irradiancia y la evaluación del nivel de incertidumbre de la evaluación termo-económica del sistema debido al efecto de datos irradiancia erróneos mediante el comparativo desempeño termo-económico del sistema de calentamiento solar con datos crudos y corregidos. En la **Figura 2.1** se esquematiza la metodología propuesta.



**Figura 1.1** Metodología general del proyecto.

**Modelo físico del calentador solar**

En la **Figura 2.2** se muestra que el sistema de calentamiento solar de agua absorbe la irradiancia global  $G$ , en los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo y de vidrio doble, a razón de la energía incidente sobre los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo y vidrio doble,  $Q_{G,sg}$  y  $Q_{G,dg}$ , respectivamente. Los colectores de calentamiento solar de agua de vidrio sencillo y vidrio doble,  $sg$  y  $dg$ , calientan el agua que circula por sus tuberías a la razón de  $Q_{sg}$  y  $Q_{dg}$ , respectivamente. El agua caliente sale del sistema y se almacena en el tanque térmico,  $Q_{tk}$ . La bomba hidráulica recircula el agua del sistema de colectores permitiendo el transporte de energía de los colectores al tanque de almacenamiento. La energía térmica útil es la energía entregada por el tanque de almacenamiento, que se utiliza en el punto de integración,  $PI$ , en algún proceso a razón de  $Q_u$ .



**Figura 2.2** Modelo físico.

### **Modelo matemático de la incertidumbre de la evaluación termo-económica**

El modelo matemático para la estimación de la incertidumbre de la evaluación termo-económica del sistema de calentamiento solar de agua se describe a continuación. La incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar se determina con la diferencia porcentual del comparativo del rendimiento energético y económico considerando bases de datos de irradiancia crudas y corregidas. La incertidumbre en la evaluación térmica  $U_{Qu}$ , se determina con la **Ecuación 1**. La incertidumbre en la evaluación económica del periodo de recuperación de la inversión  $U_{PR}$  y la tasa interna de retorno  $U_{TIR}$ , se determinan con la **Ecuación 2 y 3**, respectivamente.

$$U_{Qu} = \left(1 - \frac{Q_{uc}}{Q_u}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$U_{PR} = \left(1 - \frac{PR_c}{PR}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$U_{TIR} = \left(1 - \frac{TIR_c}{TIR}\right) \times 100 \quad (3)$$

La **Ecuación 4** determina la energía térmica útil anual del sistema con datos crudos  $Q_u$ . La **Ecuación 5** determina la energía térmica útil anual del sistema con datos corregidos  $Q_{uc}$ . La **Ecuación 6** determina el periodo de recuperación de la inversión de la evaluación térmica con datos crudos  $PR$ . La **Ecuación 7** determina el periodo de recuperación de la inversión de la evaluación térmica con datos corregidos  $PR_c$ . La **Ecuación 8** determina la tasa interna de retorno de la evaluación térmica con datos crudos  $TIR$ . La **Ecuación 9** determina la tasa interna de retorno de la evaluación térmica con datos corregidos  $TIR_c$ .

$$Q_u = Q_{sg} + Q_{dg} + Q_{tk} + U_{tk} \quad (4)$$

$$Q_{uc} = Q_{sgc} + Q_{dgc} + Q_{tk} + U_{tk} \quad (5)$$

$$VAN = 0 = I_{nv} + \sum_{j=1}^n \frac{F}{(1 + TIR)^j} \quad (6)$$

$$VAN_c = 0 = I_{nv} + \sum_{j=1}^n \frac{F_c}{(1 + TIR_c)^j} \quad (7)$$

$$PR = \frac{I_{nv}}{F} \quad (8)$$

$$PR_c = \frac{I_{nv}}{F_c} \quad (9)$$

donde  $Q_{sg}$  y  $Q_{dg}$  es la energía térmica de los colectores solares de agua de placa plana de vidrio sencillo y vidrio doble,  $Q_{tk}$  es la energía térmica del tanque de almacenamiento,  $U_{tk}$  es el coeficiente de pérdidas del tanque de almacenamiento térmico,  $VAN$  es el valor actual neto,  $I_{nv}$  es el valor de la inversión inicial del proyecto,  $F$  es el flujo de efectivo anual,  $F_c$  es el flujo de efectivo anual con datos corregidos y  $n$  es el número de años de evaluación del proyecto.

El flujo de efectivo anual  $F$  se estima considerando los ahorros anuales por la implementación del proyecto y se determina con la **Ecuación 10**. El flujo de efectivo anual con datos corregidos  $F_c$  se determina con la **Ecuación 11**.

$$F = Q_u \cdot C_{kWh} \quad (10)$$

$$F_c = Q_{uc} \cdot C_{kWh} \quad (11)$$

donde  $C_{kWh}$  es el costo del  $kWh$  de gas LP, y se determina con la **Ecuación 12**, donde  $P_c$  es el poder calorífico del gas LP que es  $7.25 kWh/l$  y el  $C_l$  es el costo del litro de gas LP en Xochitepec, Mor., que es de \$13.43 MXN.

$$C_{kWh} = \frac{C_l}{P_c} \quad (12)$$

La **Ecuación 13** determina la energía térmica a la que los colectores solares de agua de vidrio sencillo calientan el agua que circula por sus tuberías  $Q_{sg}$ , en el caso de los colectores de doble vidrioado, la energía térmica  $Q_{dg}$ , se determina con la **Ecuación 14**. Por otra parte, la **Ecuación 15** y **16**, determinan  $Q_{sg}$  y  $Q_{dg}$  con datos corregidos de irradiancia solar global. La **Ecuación 17** determina la energía del tanque térmico  $Q_{tk}$ , y la **Ecuación 18** permite determinar el coeficiente de pérdidas del tanque de almacenamiento térmico  $U_{tk}$ .

$$Q_{sg} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ a_0 - a_1 \left[ \frac{(T_{in,s} + T_{out,sg})}{2} - T_{amb} \right] - a_2 \left[ \frac{\left( \frac{(T_{in,s} + T_{out,sg})}{2} - T_{amb} \right)^2}{G} \right] \right\} Q_{G,sg} dt \quad (13)$$

$$Q_{dg} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ b_0 - b_1 \left[ \frac{(T_{in,s} + T_{out,dg})}{2} - T_{amb} \right] - b_2 \left[ \frac{\left( \frac{(T_{in,s} + T_{out,dg})}{2} - T_{amb} \right)^2}{G} \right] \right\} Q_{G,dg} dt \quad (14)$$

$$Q_{sgc} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ a_0 - a_1 \left[ \frac{(T_{in,s} + T_{out,sg})}{2} - T_{amb} \right] - a_2 \left[ \frac{\left( \frac{(T_{in,s} + T_{out,sg})}{2} - T_{amb} \right)^2}{G_c} \right] \right\} Q_{G,sgc} dt \quad (15)$$

$$Q_{dgc} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ b_0 - b_1 \left[ \frac{(T_{in,s} + T_{out,dg})}{2} - T_{amb} \right] - b_2 \left[ \frac{\left( \frac{(T_{in,s} + T_{out,dg})}{2} - T_{amb} \right)^2}{G_c} \right] \right\} Q_{G,dgc} dt \quad (16)$$

$$Q_{tk} = m_{tk} c_{p_{tk}} (T_{tk_a} - T_{tk_c}) \quad (17)$$

$$U_{tk} = \frac{m_{tk} c_{p_{tk}} (T_{tk_a} - T_{tk_c})}{T \left[ A_{st} \left( \frac{((T_{tk_a} - T_{amb}) - (T_{tk_c} - T_{amb}))}{\ln((T_{tk_a} - T_{amb}) - (T_{tk_c} - T_{amb}))} \right) \right]} \quad (18)$$

donde  $a_0, a_1, a_2$  son los coeficientes de la ecuación de la eficiencia de los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo,  $b_0, b_1, b_2$ , son los coeficientes de eficiencia de los colectores solares de agua del tipo placa plana de doble vidriado,  $T_{in,s}$  es la temperatura de entrada a los colectores solares de agua,  $T_{out,sg}$  es la temperatura de salida de los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo,  $T_{out,dg}$  es la temperatura de salida de los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio doble,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,  $G$  es la irradiancia solar global cruda que incide sobre el campo de colectores,  $G_c$  es la irradiancia solar global corregida,  $m_{tk}$  es la masa de agua del tanque de almacenamiento,  $c_{p_{tk}}$  es el calor específico del agua,  $T_{tk_a}$  y  $T_{tk_c}$  es la temperatura del tanque de almacenamiento en el nodo a y c, respectivamente.

La **Ecuaciones 19 y 20** permiten determinar la energía incidente sobre los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo y vidrio doble,  $Q_{G,sg}$  y  $Q_{G,dg}$ , respectivamente. La **Ecuaciones 21 y 22** determinan la energía incidente sobre los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo y vidrio doble con datos corregidos de irradiancia solar global,  $Q_{G,sg_c}$  y  $Q_{G,dg_c}$ , respectivamente.

$$Q_{G,sg} = \int_{t_1}^{t_2} A_{sg} G dt \quad (19)$$

$$Q_{G,dg} = \int_{t_1}^{t_2} A_{dg} G dt \quad (20)$$

$$Q_{G,sg_c} = \int_{t_1}^{t_2} A_{sg} G_c dt \quad (21)$$

$$Q_{G,dg_c} = \int_{t_1}^{t_2} A_{dg} G_c dt \quad (22)$$

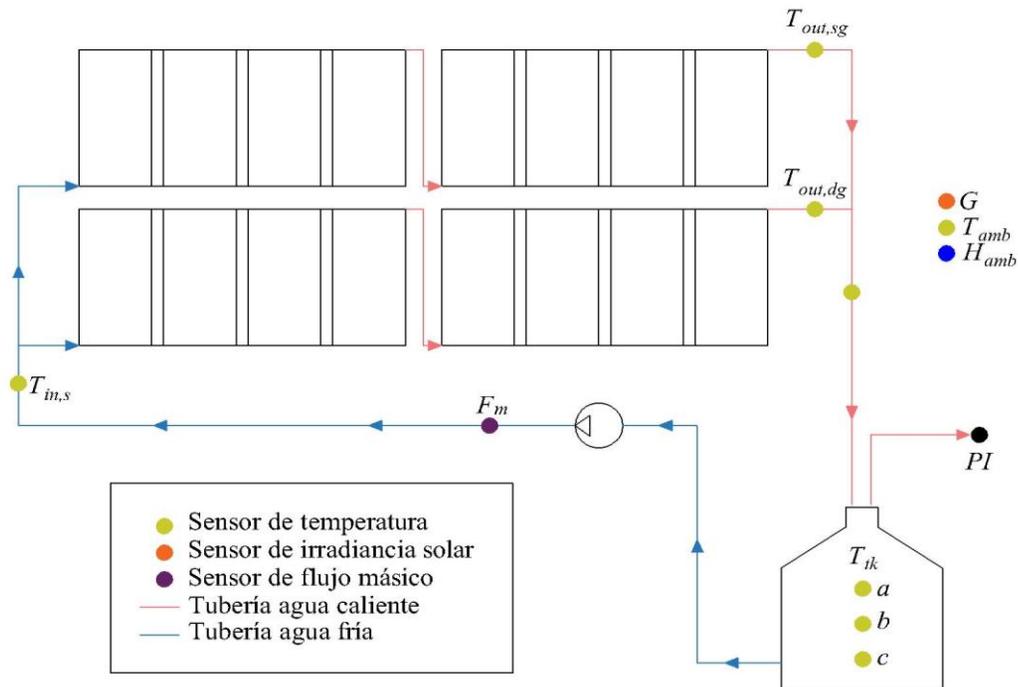
donde  $A_{sg}$  y  $A_{dg}$  es el área total del campo de colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo y doble vidriado, respectivamente.

### Estrategia experimental

La estrategia experimental del proyecto permite la obtención de la base de datos de variables meteorológicas y del sistema. La estrategia comprende la estrategia de monitoreo, instrumentación y la construcción de la base de datos.

### Estrategia de monitoreo

La estrategia de monitoreo de las variables experimentales se describe en la **Figura 2.3**. Las variables monitoreadas son las meteorológicas y las del sistema de calentamiento solar de agua.



**Figura 2.3** Estrategia de monitoreo de variables experimentales.

Las variables meteorológicas son la temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , la humedad relativa ambiente,  $H_{amb}$ , y la irradiación solar global,  $G$ . La **Figura 2.4** es una fotografía de los sensores que componen la estación meteorológica. Las variables del sistema son la temperatura de entrada de los colectores solares de agua,  $T_{in,s}$ , la temperatura de salida de los colectores solares de agua,  $T_{out,s}$ , la temperatura de salida de los colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo,  $T_{out,sg}$ , la temperatura de salida de los colectores solares de agua del tipo placa plana de

vidrio doble,  $T_{out,dg}$ , la temperatura inicial, media y final del tanque de almacenamiento térmico,  $T_{tka}$ ,  $T_{tkb}$ , y  $T_{tkc}$ , y el flujo másico de agua,  $F_m$ .



**Figura 2.4** Fotografía de los sensores que componen estación meteorológica.

### *Instrumentación*

Los sensores involucrados en el monitoreo de las variables son ocho sensores de temperatura, uno de irradiancia solar global y uno de flujo de agua, las características se enlistan en la **Tabla 2.1**.

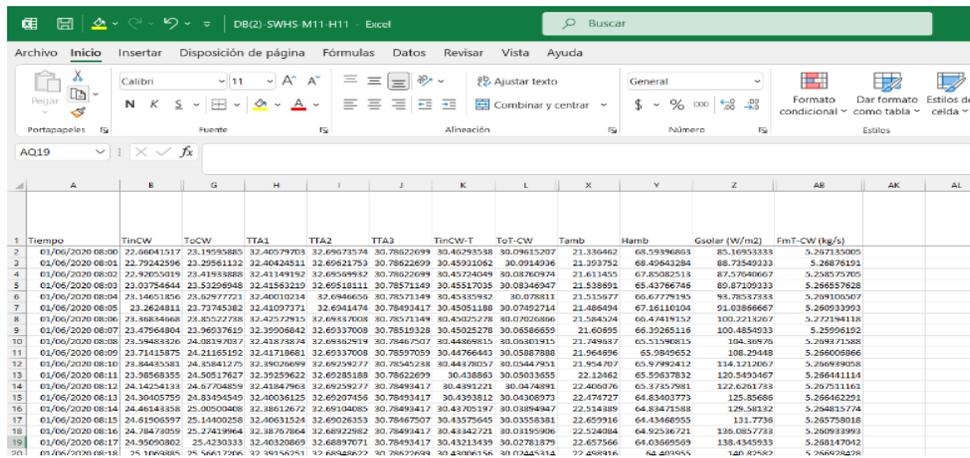
**Tabla 2.1** Instrumentación del sistema de monitoreo.

<b>Instrumento</b>	<b>Señal</b>	<b>Incertidumbre</b>	<b>Imagen</b>
<b>Sensor de temperatura RTD PT-1000</b>	Resistencia	$\pm 1.0\%$	
<b>Sensor de temperatura y humedad relativa TBvechi Transmisor modelo FG6010</b>	Voltaje	$\pm 0.1\%$	

<b>Sensor de flujo de agua</b> <b>Omega modelo FTB1423</b>	Frecuencia	$\pm 0.1$	
<b>Sensor de irradiancia solar global</b> <b>Witich&amp;Visser modelo GS-WV</b>	Voltaje	$\pm 3.0\%$	

Construcción de base de datos experimental

La base de datos experimental del sistema de calentamiento solar de agua en Xochitepec, Morelos es de 01 junio 2020 a 31 mayo 2021 (12 meses) con frecuencia de muestreo y almacenamiento de un minuto. Las variables de interés son  $G$ ,  $T_{amb}$ ,  $H_{amb}$ ,  $T_{in,s}$ ,  $T_{out,s}$ ,  $T_{out,sg}$ ,  $T_{out,dg}$ ,  $T_{tka}$ ,  $T_{tkb}$ ,  $T_{tkc}$  y  $F_m$ . Las lecturas del sistema de monitoreo se almacenan en archivo en formato .xls, en forma de hojas de cálculo, en la **Figura 2.5** se muestra la base de datos construida.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
01/06/2020 08:00	22.46641517	23.19354853	32.40579703	32.49673154	30.78622699	30.40293338	30.09613207	21.336462	68.58396803	85.10933333	5.267333065								
01/06/2020 08:01	22.79242596	23.29561132	32.40424511	32.65821751	30.78622699	30.45931052	30.0914936	21.393752	68.49642284	88.73549333	5.26876191								
01/06/2020 08:02	22.92055919	23.41933888	32.41149192	32.69599982	30.78622699	30.45724049	30.08760974	21.413455	67.85082513	87.57640667	5.258575705								
01/06/2020 08:03	23.03784644	23.52299948	32.41552129	32.69516111	30.78571449	30.45517035	30.08346347	21.538891	65.43796746	89.87109233	5.268557628								
01/06/2020 08:04	23.14631836	23.62977721	32.4010214	32.69486659	30.78571449	30.45353982	30.0798111	21.512477	60.67778193	88.76537858	5.269100567								
01/06/2020 08:05	23.2624811	23.73745382	32.41077371	32.6941474	30.78493417	30.45051188	30.07492714	21.486494	67.16110104	91.03866667	5.26933993								
01/06/2020 08:06	23.36884668	23.80527788	32.42577915	32.69487008	30.78371149	30.45025278	30.07026866	21.584524	60.47419152	100.2215267	5.2723194118								
01/06/2020 08:07	23.47564804	23.96937619	32.29508482	32.69337008	30.78519328	30.45025278	30.05866559	21.608995	66.30265116	100.4854933	5.255991532								
01/06/2020 08:08	23.58484826	24.08197027	32.41878874	32.69486659	30.78467507	30.44868615	30.05031915	21.749487	65.51596815	104.808670	5.269871588								
01/06/2020 08:09	23.71415875	24.21165192	32.41718681	32.69337008	30.78597059	30.44766443	30.05887888	21.964496	65.0949652	108.29448	5.268008966								
01/06/2020 08:10	23.84445381	24.33841279	32.39028699	32.69229277	30.78545238	30.44879057	30.03447903	21.954707	65.97992412	114.1212067	5.268988058								
01/06/2020 08:11	23.98568355	24.50517627	32.39259622	32.69238518	30.78622699	30.438665	30.05031855	22.12462	65.59637832	120.5493467	5.268441114								
01/06/2020 08:12	24.14254113	24.67704859	32.41847968	32.69229277	30.78493417	30.4391221	30.0474891	22.400976	65.37857981	122.6201788	5.269251161								
01/06/2020 08:13	24.30405759	24.83494549	32.40036125	32.69207456	30.78493417	30.4393812	30.04368973	22.474727	64.83403773	125.85686	5.268462291								
01/06/2020 08:14	24.46141838	25.00504068	32.38612672	32.69194065	30.78493417	30.43705197	30.03894847	22.534309	64.8342588	129.38152	5.268431774								
01/06/2020 08:15	24.61905977	25.14400258	32.40631524	32.69026353	30.78467507	30.43575645	30.03558381	22.659916	64.43468955	131.7736	5.265758018								
01/06/2020 08:16	24.78473059	25.27419964	32.38767864	32.68922892	30.78493417	30.43342721	30.03195906	22.524984	64.92536721	136.0857783	5.269893999								
01/06/2020 08:17	24.95609862	25.4230333	32.40320869	32.68897071	30.78493417	30.43211439	30.02781879	22.657566	64.03695569	138.4345533	5.268147042								
01/06/2020 08:18	25.14698885	25.56637206	32.39156751	32.68842677	30.78622699	30.43006154	30.02445114	22.468414	64.4201955	140.82582	5.266629428								

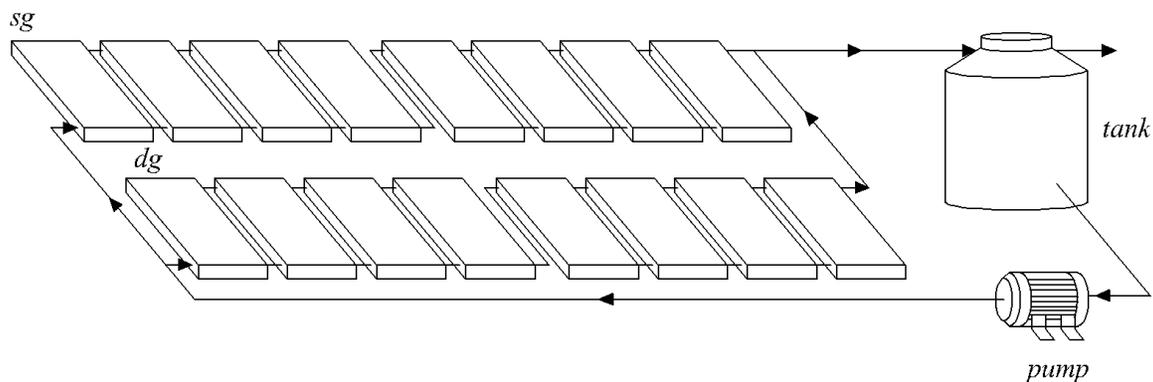
Figura 2.5 Base de datos de mediciones en campo.

## 2.2 Características del calentador solar y localización

En lo que respecta a la selección del caso y zona de estudio, se consideró el sistema de calentamiento de agua ubicado en Xochitepec, Mor., el sistema se eligió por ser un sistema que opera de manera continua y que cuenta con monitoreo continuo de las variables de operación, así como por estar ubicado en un clima representativo del país.

### *Calentador solar con almacenamiento*

El sistema de calentamiento solar de agua con almacenamiento térmico, cuenta con ocho colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio sencillo, *sg*, de  $18.56\text{ m}^2$  de área neta, ocho colectores solares de agua del tipo placa plana de vidrio doble, *dg*, de  $18.56\text{ m}^2$  de área neta, dispuestos en un arreglo serie paralelo. El tanque de almacenamiento de agua, *storage*, cuenta con una capacidad de  $2.5\text{ m}^3$  y está conectado a una bomba de agua, *pump*, de  $0.37\text{ kW}$  que recircula el agua del tanque de almacenamiento térmico al campo de colectores solares. En la **Figura 2.6** se muestra un esquema general de la configuración del sistema con sus componentes del sistema, en la **Figura 2.7** se muestra una fotografía del campo de colectores de agua y en la **Tabla 2.2** se enlistan las características de los componentes.



**Figura 2.6** Esquema del sistema de calentamiento de agua.



Figura 2.7 Campo de colectores de agua.

Tabla 1.2 Características de los componentes del sistema.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>Número de colectores</i>	8	<i>Número de colectores</i>	8
<i>A</i>	2.326 m <sup>2</sup>	<i>A</i>	2.326 m <sup>2</sup>
<i>A<sub>sg</sub></i>	18.6 m <sup>2</sup>	<i>A<sub>dg</sub></i>	18.6 m <sup>2</sup>
<i>a<sub>0</sub></i>	0.7468	<i>b<sub>0</sub></i>	0.6738
<i>a<sub>1</sub></i>	3.42 W/m <sup>2</sup> K	<i>b<sub>1</sub></i>	2.0513 W/m <sup>2</sup> K
<i>a<sub>2</sub></i>	0.013 W/m <sup>2</sup> K	<i>b<sub>2</sub></i>	0.0010 W/m <sup>2</sup> K
<i>Azimut</i>	0.0°	<i>Azimut</i>	0.0°
<i>Slope</i>	18.0°	<i>Slope</i>	18.0°
<i>h</i>	1.6 m	<i>F<sub>p,max</sub></i>	780 kg/h
<i>V</i>	2.5 m <sup>3</sup>	<i>P<sub>pump</sub></i>	0.37 kW
<i>m<sub>ik</sub></i>	2500 kg	<i>c<sub>ptk</sub></i>	4.18 kJ/kg K

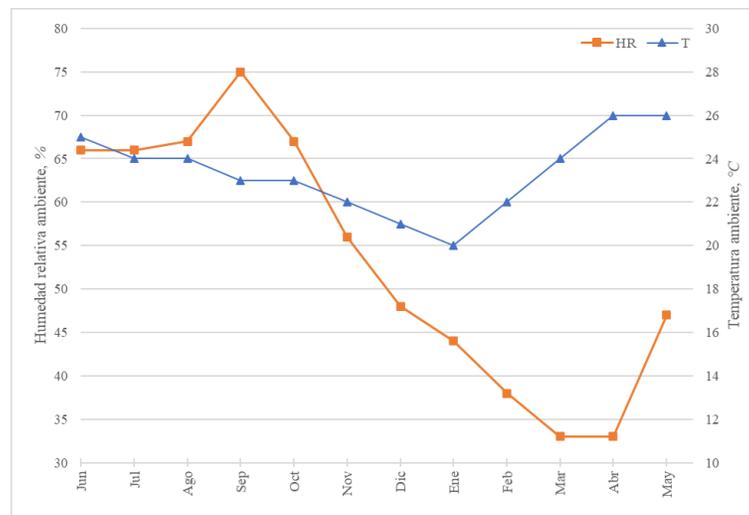
### Localización del sistema

El sistema de referencia se encuentra en el Parque Científico y Tecnológico de Morelos de Xochitepec, Morelos, Méx., ubicado en latitud,  $L_{at}$ , 18° 74' 70'' N y longitud,  $L_{loc}$ , 99° 24' 25'' O. En la **Figura 2.8** se muestra la localización del sistema de referencia.



**Figura 2.8** Ubicación del sistema en estudio, a) Ubicación geográfica del municipio de Xochitepec, b) Fotografía aérea del laboratorio. (Google Maps).

El clima de la región de estudio es Cálido Subhúmedo, este tipo de clima cubre  $561\,125.87\text{ km}^2$  equivalente al 28% del territorio mexicano, por lo que es uno de los climas más representativos [42]. La temperatura ambiente promedio anual es de  $27.4^\circ\text{C}$ . La humedad relativa ambiente medida promedio anual es del 50.7%. En la **Figura 2.9**, se muestra los promedios mensuales de temperatura y humedad relativa [43]. Los valores más altos de temperatura son en los meses de abril y mayo con  $26^\circ\text{C}$ , y el valor más bajo es en enero con  $20^\circ\text{C}$ . El valor más alto de humedad relativa es en septiembre con 75% y los valores más bajos son en mayo y abril con 31%.



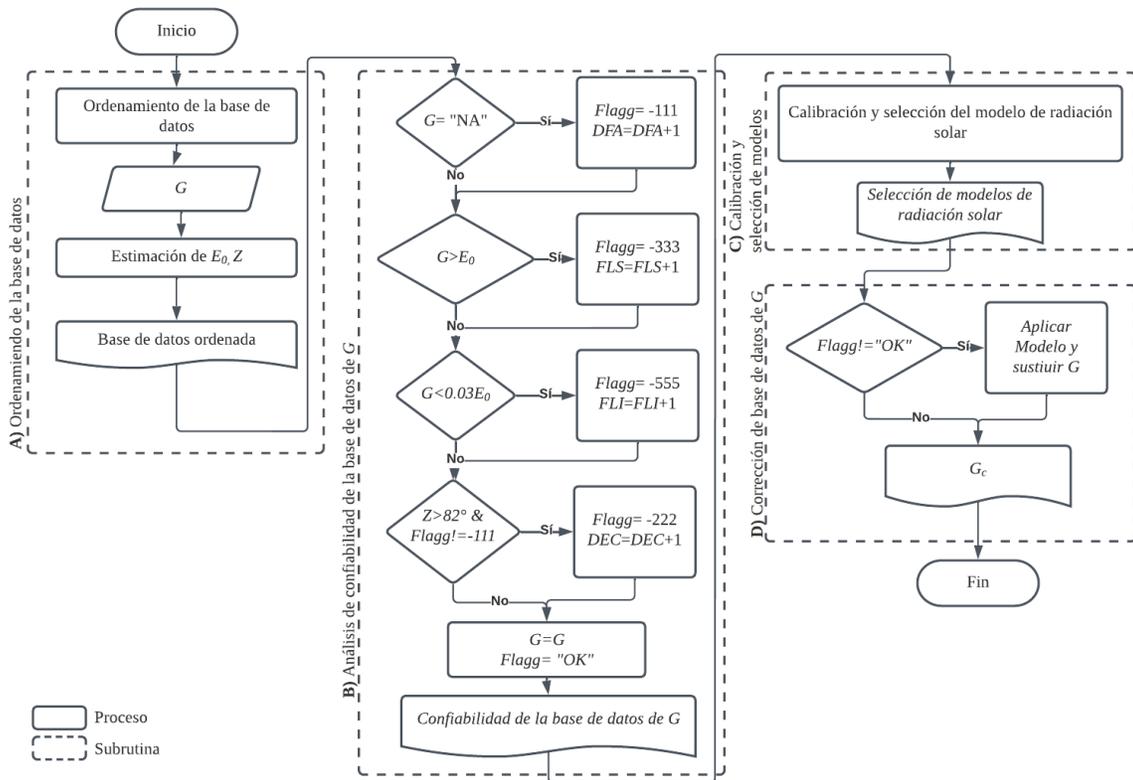
**Figura 2.9** Promedios mensuales de la temperatura ambiente y humedad relativa para la zona de estudio.

## **CAPÍTULO 3. PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN**

En este capítulo se presenta el desarrollo de las plataformas computacionales utilizadas para la corrección de bases de datos de irradiancia y la evaluación termo-económica del sistema de calentamiento solar de agua con datos crudos y corregidos.

### 3.1 Plataforma de corrección de bases de datos de irradiancia

En la **Figura 3.1** se muestra el diagrama de flujo de la plataforma de corrección de bases de datos de irradiancia. La corrección de bases de datos de irradiancia se basa en los trabajos [18] y [19]. La estrategia comprende las subrutinas: A) Ordenamiento, B) Análisis de confiabilidad de la base de datos de irradiancia, C) Calibración y selección de modelos de corrección y D) Corrección de la base de datos de irradiancia. El ordenamiento, análisis de confiabilidad, selección de modelos de corrección y corrección de datos erróneos se realiza en la plataforma *RStudio* [44]. Una vez corregida la base de datos, se evalúa el recurso solar anual con los datos crudos, datos corregidos y con datos tipo *TMY* para comprobar si la plataforma es adecuada para el tratamiento de datos.



**Figura 3.1** Diagrama de flujo de la plataforma para corrección de bases de datos de irradiancia.

### **Subrutina A) Ordenamiento**

La base de datos es una serie temporal que se obtiene de forma ordenada en función del tiempo, sin embargo, cuando existe pérdida de información por diversas causas como fallas en el suministro eléctrico, desconexión del sensor, etc., la serie temporal se ve afectada. En la subrutina A) Ordenamiento, se lee la matriz de datos cruda con los datos de tiempo y los valores de irradiancia. Después, se genera un vector de tiempo patrón de 525600 con los pasos de tiempo de un minuto, correspondiente al número de registros de un año. La matriz ordenada se genera al unir la matriz cruda y el vector patrón tomando como referencia el tiempo. Para ellos, los datos de tiempo, tanto de la matriz cruda como del vector patrón, deben corresponder a la misma clase de datos y formato. Si los datos de tiempo de ambas columnas son iguales, los registros de irradiancia son almacenados en la columna “G” en su respectiva fila. Si no existe el mismo registro de tiempo en la matriz cruda, el dato de irradiancia es llenado con un “NA”, significando que el datos no está disponible. La **Figura 3.2** muestra una representación del proceso de ordenamiento de la base de datos.

Matriz cruda			Vector patrón		=	Matriz ordenada	
Tiempo	G		Tiempo			Tiempo	G
01/06/2022 10:45	692.79	+	01/06/2022 10:45		=	01/06/2022 10:45	692.79
02/06/2022 10:48	699.99		02/06/2022 10:46			02/06/2022 10:46	NA
03/06/2022 10:50	700.02		03/06/2022 10:47			03/06/2022 10:47	NA
			02/06/2022 10:48			02/06/2022 10:48	699.99
			03/06/2022 10:49			03/06/2022 10:49	NA
			03/06/2022 10:50			03/06/2022 10:50	700.02

**Figura 3.2** Representación del proceso de ordenamiento de los datos.

### **Subrutina B) Análisis de confiabilidad**

En la subrutina B) Análisis de confiabilidad, los datos se comparan con cuatro filtros para identificar los datos erróneos y se les asigna un código para clasificarlos según al tipo de error. En la **Tabla 3.1** se muestra el identificador para cada tipo de error. En este caso, el -111 representa el espacio de datos faltantes, *DFA*, el -222 los datos afectados por el error de respuesta

al coseno del piranómetro, *DEC*, el -333 los datos fuera del límite superior, *DFLS*, y el -555 los datos fuera del límite inferior, *DFLI*.

**Tabla 3.1** Filtros para identificación de datos erróneos.

Filtro	Criterio de identificación	Descripción	Código
<b>F1</b> Dato faltante ( <i>DFA</i> )	$G = \text{"NA"}$	El dato correspondiente a la fecha y hora no se registró.	-111
<b>F2</b> Irradiancia solar extraterrestre ( <i>DFLS</i> )	$G > E_0$	Los datos medidos de irradiancia global no deben ser superiores a la irradiancia solar extraterrestre.	-333
<b>F3</b> Irradiancia mínima ( <i>DFLI</i> )	$G < 0.03E_0$	Los datos medidos de irradiancia global no deben ser menores al 3% de la irradiancia solar extraterrestre.	-555
<b>F4</b> Ángulo zenit ( <i>DEC</i> )	$Z > 82^\circ$	Los datos como <i>DFLS</i> o <i>DFLI</i> cuando la altitud solar es mayor a $82^\circ$ se atribuyen al error por respuesta al coseno de los piranómetros.	-222

Para este estudio los valores de irradiancia extraterrestre se estiman mediante la **Ecuación 23** y el ángulo zenit se determina con la **Ecuación 24**.

$$E_0 = G \left( 1 + 0.033 \frac{360n}{365} \right) \cos Z \quad (23)$$

$$\cos Z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (24)$$

Donde  $G$  es la irradiancia global,  $n$  es el número de día del año,  $Z$  es el ángulo zenit,  $\phi$  es la latitud,  $\delta$  es la declinación solar y  $\omega$  es el ángulo solar.

### ***Subrutina C) Calibración y selección del modelo de corrección de irradiancia***

En la subrutina C) implica las actividades de calibración y selección del modelo de corrección de irradiancia.

Inicialmente, se plantean modelos de irradiancia tomados de la literatura para seleccionar el modelo que mejor se adapte a la ciudad de estudio. Los modelos seleccionados están basados en variables meteorológicas debido a que se cuenta con datos de temperatura ambiente, humedad

ambiente e irradiancia solar extraterrestre. Los modelos seleccionados fueron: modelo **M1** de Hargreaves y Allen [21], los modelos **M2-5** de Adaramola [20] y el modelo **M6** propuesto por Álvarez-Sánchez [19], ver la **Tabla 3.2**. El modelo **M1**, se basa en la temperaturas máximas y mínimas. La ecuación asume que la diferencia en la temperatura máxima y mínima está directamente relacionada con la fracción de radiación extraterrestre recibida a nivel del suelo. Sin embargo, existen factores distintos a la radiación solar que pueden influir en la diferencia de temperatura; estos factores incluyen: nubosidad, humedad, latitud, elevación, topografía o proximidad a una gran masa de agua. La ecuación está pensada principalmente para su aplicación en pasos de tiempo de cálculo mensuales [21]. Los modelos **M2-5** son expresiones de correlación que se basan en parámetros meteorológicos comunes como la humedad relativa, temperatura promedio y la relación entre la temperatura máxima y mínima. Si bien, son datos que comúnmente se registran en estaciones meteorológicas, también pueden llegar a presentar errores o datos faltantes [20]. El modelo **M6**, está basado completamente en datos de irradiancia extraterrestre [19].

**Tabla 3.2** Modelos de irradiancia.

Modelo	Ecuación	Descripción
<b>M1</b> Hargreaves y Allen, (2003)	$\frac{G}{E_0} = a(\Delta T)^{0.5}$ $\Delta T = T_{mx} - T_{mn}$	<i>G</i> es la irradiancia solar global <i>E</i> <sub>0</sub> es la irradiancia solar extraterrestre $\Delta T$ es el diferencial de temperatura <i>T</i> <sub>mx</sub> es la temperatura máxima <i>T</i> <sub>mn</sub> es la temperatura mínima
<b>M2</b> Adaramola, (2012), a)	$\frac{G}{E_0} = a + b \left( \frac{HR}{100} \right)$	<i>HR</i> es la humedad relativa
<b>M3</b> Adaramola, (2012), b)	$\frac{G}{E_0} = a + b(T_p)$	<i>T</i> <sub>p</sub> es la temperatura promedio <i>TR</i> es la relación de <i>T</i> <sub>mx</sub> y <i>T</i> <sub>mn</sub>
<b>M4</b> Adaramola, (2012), c)	$\frac{G}{E_0} = a + b(TR)$ $TR = T_{mx}/T_{mn}$	<i>a</i> , <i>b</i> y <i>c</i> son constantes <i>Z</i> es el ángulo zenit
<b>M5</b> Adaramola, (2012), d)	$\frac{G}{E_0} = a + b(TR) \left( \frac{HR}{100} \right)$	
<b>M6</b> Álvarez-Sánchez, (2017)	$G = a(E_0)^2 + b(E_0) + c$	

La calibración de modelos consiste en adaptar los modelos a la ciudad de estudio, encontrando los valores de las constantes para cada modelo. Los constantes se obtienen mediante regresiones con datos meteorológicos y mediciones de irradiancia que pasaron el análisis de confiabilidad

(filtros de la **Tabla 3.1**). Los datos que se tomaron como referencia para calibrar los modelos fueron los datos del mes de junio 2021 por presentar un comportamiento aceptable (0.0% de datos faltantes, 5.0% de datos fuera de límite inferior, 4.0% de datos fuera de límite superior y 45.0% de datos con error por respuesta al coseno). Las regresiones se resuelven con la herramienta *Curve Fitting* de *Matlab* [45].

La selección del modelo de corrección de irradiancia se basa en evaluar desempeño del modelo para estimar la irradiancia en la ciudad de estudio. El desempeño de los modelos de la **Tabla 3.2** se evalúa y compara usando los parámetros de error estadístico como el *MAPE* y el *RMSE* con las **Ecuaciones 25** y **26**, respectivamente. El modelo seleccionado es el que presenta menores valores de *MAPE* y *RMSE*.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum 100 \cdot \left| \left( \frac{G_{med} - G_{est}}{G_{med}} \right) \right| \% \quad (25)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum (G_{med} - G_{est})^2 \right]^{0.5} \quad (26)$$

Donde  $G_{med}$  es el valor de la irradiancia medida,  $G_{est}$  es el valor de la irradiancia estimada con el modelo y  $N$  es el número de observaciones.

#### ***Subrutina D) Corrección de base de datos de irradiancia***

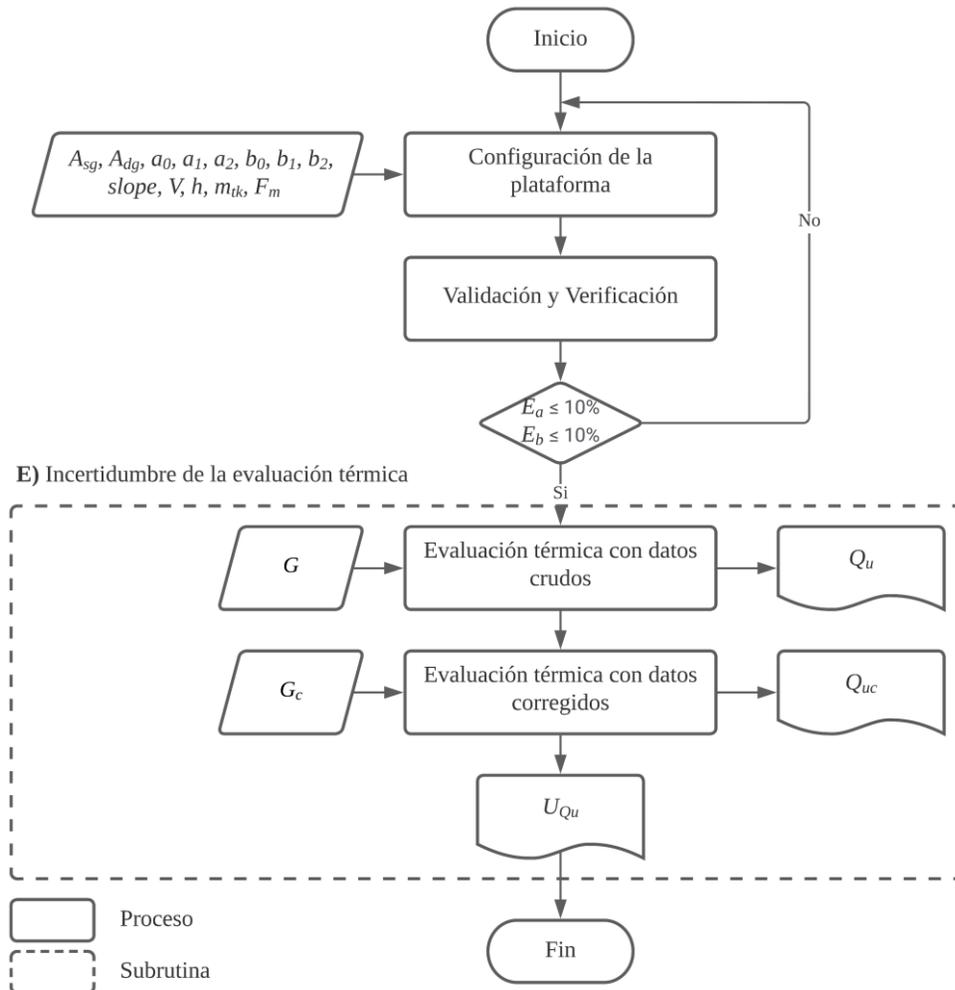
En la subrutina D), se realiza la corrección de los datos identificados como erróneos en la Subrutina B), marcados con los siguientes códigos:

- -111 (datos faltantes, *DFA*)
- -333 (datos fuera de límite superior, *DFLS*)
- -555 (datos fuera de límite inferior, *DFLI*)
- -222 (datos por error de respuesta al coseno, *DEC*)

Para la corrección de los datos se utiliza el modelo seleccionado derivado de la Subrutina C). Una vez corregidos los datos erróneos, la plataforma almacena la base de datos en un archivo delimitado por comas (.csv) para que pueda ser leído en otras plataformas.

### 3.2 Plataforma de evaluación térmica y validación

En la **Figura 3.3** se muestra el diagrama de flujo de la plataforma de evaluación térmica. El diagrama de flujo muestra el procedimiento para la determinar de incertidumbre de la evaluación térmica. La configuración de la plataforma se realiza en *TRNSYS*. La plataforma se valida con datos experimentales del sistema de calentamiento solar de agua en Xochitepec y la verificación se realiza comparando los resultados del trabajo de [38], para comprobar si la plataforma es adecuada para la evaluación térmica del sistema. Una vez que la plataforma es validada, se determina la incertidumbre de la evaluación térmica del sistema, comparando los resultados de  $Q_u$  y  $Q_{uc}$ , derivados de la evaluación térmica del sistema considerando datos de irradiancia crudos y corregidos, respectivamente.



**Figura 3.3** Diagrama de flujo de la plataforma para la evaluación térmica del sistema.

### Configuración de la plataforma térmica

El esquema de la herramienta computacional desarrollada se muestra en la **Figura 3.4**. La energía térmica útil,  $Q_u$  y  $Q_{uc}$  se determina mediante simulación dinámica basada en componentes con *TRNSYS*. Primero, la base de datos de irradiancia se lee mediante el *Type9e*, estos datos simulan el flujo de irradiancia sobre el campo de colectores de agua (*Type1c*). El arreglo se realiza con ocho colectores de vidrio sencillo en serie y ocho colectores de vidrio doble en serie. Los campos de colectores de vidrio sencillo y doble calientan el agua que circula por sus tuberías. El *Type11c* se emplea para la unión de flujo de ambos campos de colectores y la salida se conecta al tanque de almacenamiento (*Type60h*). El agua del tanque de almacenamiento se recircula mediante la bomba hidráulica (*Type3b*), el agua entra nuevamente a los campos de colectores mediante un divisor de flujo (*Type11e*). Los resultados de la energía térmica y las temperaturas de salida se grafican y se almacenan en un archivo de texto con el *Type65c*. La simulación es de un periodo anual con un horario de 9:00-18:00 h con pasos de tiempo de un minuto. La energía térmica útil es la energía integrada anual. El *Type11c*, *Type60h* y *Type3b* se configuran con los datos de la **Tabla 2**.

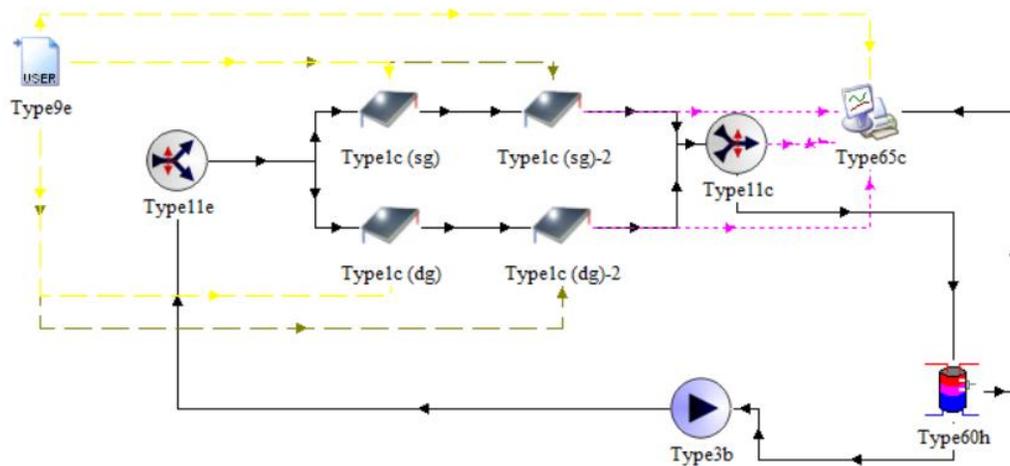


Figura 3.4 Plataforma de evaluación térmica del sistema.

### **Validación y verificación de la plataforma térmica**

La plataforma se valida con datos experimentales del sistema de calentamiento solar de agua en Xochitepec y la verificación se realiza comparando los resultados de [38] para comprobar si la plataforma es adecuada para la evaluación térmica del sistema. En ambos casos, los datos son del día 17 de octubre del 2021 de 11:00 a 16:00 *h*. El estudio de Álvarez-Sánchez [38] se considera para la verificación porque realiza una evaluación anual de la energía útil del calentador solar de agua de Xochitepec. La energía útil anual se determina mediante simulaciones dinámicas basadas en componentes utilizando *TRNSYS*.

El parámetro de evaluación es el error relativo absoluto. El criterio de aceptación de la plataforma es que el error de la validación  $E_a$  y de la verificación  $E_b$ , no sea mayor al 10%.

$$E_a \leq 10\%$$

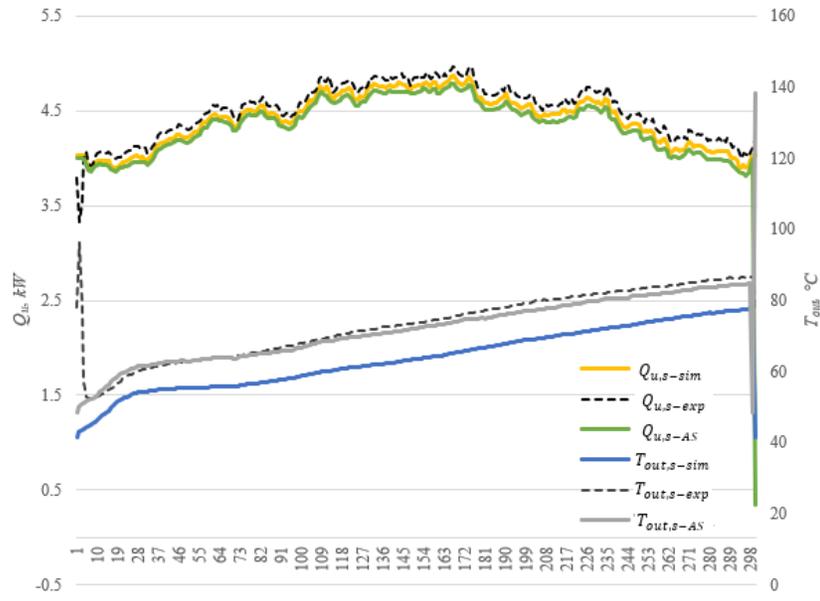
$$E_b \leq 10\%$$

Donde  $E_a$  se determina con la **Ecuación 27** y  $E_b$  con la **Ecuación 28**.

$$E_a = \frac{|Q_{u-sim} - Q_{u-exp}|}{Q_{u-exp}} \cdot 100 \quad (27)$$

$$E_b = \frac{|Q_{u-sim} - Q_{u-AS}|}{Q_{u-AS}} \cdot 100 \quad (28)$$

En la **Figura 3.5** se muestra el comparativo de la simulación contra datos experimentales y los resultados de [38]. La energía térmica del sistema simulada  $Q_{u-sim}$  fue de 1322.8 *kWh*, con datos experimentales  $Q_{u-exp}$  se estimó de 1349.8 *kWh*, y los datos de la literatura  $Q_{u-AS}$  fue de 1299.8 *kWh*, lo cual representa un error relativo del 2.0% y 1.8%, respectivamente. Lo anterior muestra que la plataforma es adecuada para la simulación del sistema.



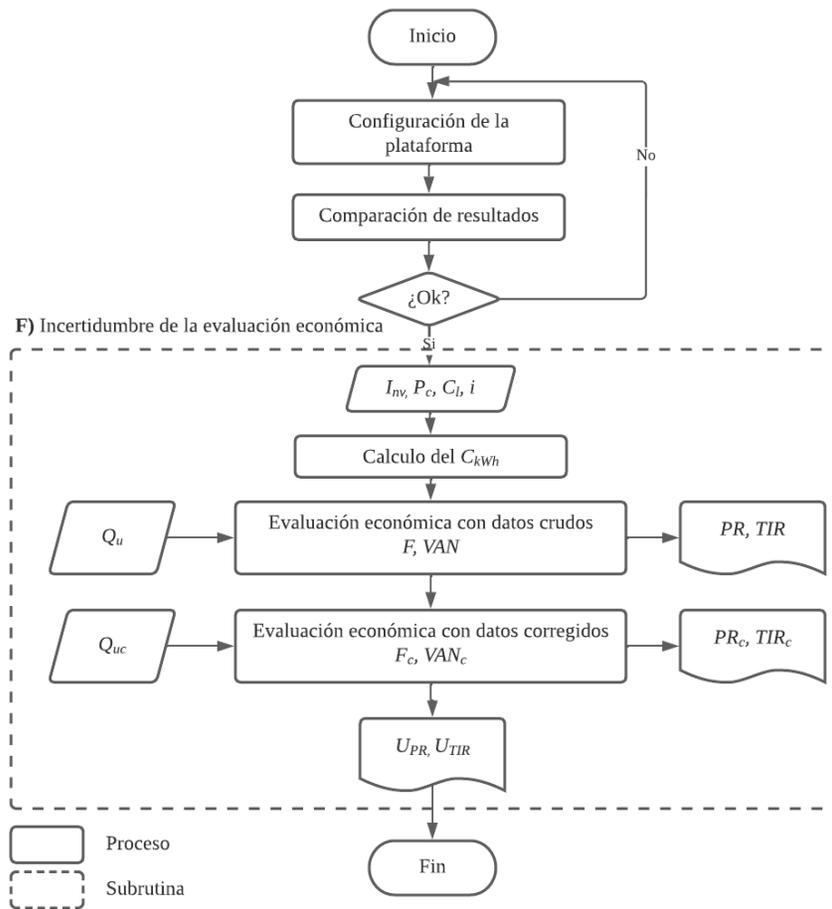
**Figura 3.5** Resultados de la validación y la verificación de la plataforma de evaluación térmica.

### **Subrutina E) Incertidumbre de la evaluación térmica**

En la **subrutina E)** se determina la incertidumbre de la evaluación térmica del sistema, comparando los resultados de la energía térmica del sistema con datos crudos,  $Q_u$ , y la energía térmica del sistema con datos corregidos,  $Q_{uc}$ . Para ello, se realizan dos simulaciones anuales con la plataforma térmica previamente validada y verificada. Primero se realiza una simulación considerando como datos de entrada la base de datos de irradiancia crudos con la que se determina  $Q_u$ . Posteriormente, se realiza otra simulación anual con la base de datos de irradiancia corregida con la que se determina  $Q_{uc}$ . Posteriormente, se realiza el comparativo de  $Q_u$  y  $Q_{uc}$  con la **Ecuación 1** con lo que se determina la incertidumbre de la evaluación térmica del sistema.

### 3.3 Plataforma de evaluación económica y verificación

En la **Figura 3.6** se muestra el diagrama de flujo de la plataforma para la evaluación económica del sistema. La plataforma comprende las actividades de configuración de la plataforma, comparación de resultados y la subrutina F) Incertidumbre de la evaluación económica. La configuración de la plataforma se realiza con las **Ecuaciones 6-12** y se realizan pruebas para la comparación de resultados con el trabajo de [46]. Una vez que el funcionamiento de la plataforma es adecuado se determina la incertidumbre de la evaluación térmica del sistema con la Subrutina F).



**Figura 3.6** Diagrama de flujo de la plataforma para la evaluación económica del sistema.



### ***Comparación de la plataforma de evaluación económica***

La plataforma económica se verificó con el trabajo de [46]. La comparación se realizó replicando el ejercicio y estimando los valores de  $PR$  y  $TIR$  entre ambas plataformas. El parámetro de evaluación de la plataforma fue el error relativo absoluto. los cuales presentaron diferencia de 0.2% y 1.0%, con ello se considera que la plataforma funciona adecuadamente.

### ***Subrutina F) Incertidumbre en la evaluación económica***

La incertidumbre en la evaluación económica del sistema se determina con la **subrutina F)**. Primero, la evaluación económica del sistema se realiza con los valores de la energía térmica útil del sistema cruda y corregida,  $Q_u$  y  $Q_{u_c}$ , para obtener la  $TIR$ ,  $PR$ ,  $TIR_c$  y  $PR_c$ , respectivamente. Los valores de  $F$  y  $F_c$  se estiman de acuerdo a los ahorros en gastos de gas  $LP$  percibidos por la implementación del sistema de calentamiento de agua. Finalmente, los resultados de la evaluación económica se comparan y se determina la  $U_{TIR}$  y  $U_{PR}$  con las **Ecuaciones 2 y 3**, respectivamente.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados de la confiabilidad de la base de datos cruda de irradiancia, la corrección de la base de datos, la incertidumbre de la evaluación del recurso solar y la incertidumbre de la evaluación termo-económica del calentador solar de agua en Xochitepec, Morelos. También, se presenta el análisis de incertidumbre en la evaluación termo-económica un calentador solar de agua en Monterrey, NL.

## **4.1 Confiabilidad, corrección de la base de datos e incertidumbre de la evaluación del recurso solar en Xochitepec, Mor.**

La base de datos cruda de irradiancia de Xochitepec, Morelos, presentó 71.0% de datos erróneos (datos faltantes, fuera de intervalo y por error de respuesta al coseno del sensor). El modelo de Álvarez-Sánchez se utilizó para la corrección de la base de datos por presentar valores de *RMSE* y *MAPE* de  $178.16 \text{ W/m}^2$  y 0.09%, respecto a una base de datos de Xochitepec con datos aceptables. La estrategia de corrección permitió obtener una base de datos anual de irradiancia corregida para su uso. Se observa que, la evaluación anual del recurso solar gana una incertidumbre de 46.7%, si se emplea la base de datos cruda. En las secciones *Confiabilidad de la base de datos de irradiancia*, *Corrección de base de datos de irradiancia* e *Incertidumbre en la evaluación del recurso solar* se describen los resultados.

### ***Confiabilidad de la base de datos de irradiancia***

En la **Figura 4.1** se muestran los datos erróneos a lo largo del periodo de estudio clasificados por su tipo. En la **Tabla 4.1** se muestra los porcentajes de cada tipo de error por mes y del total anual. La base de datos presentó un total de datos erróneos de 374025 registros, equivalente al 71.0%. Del total de datos, el 39.3% son por error de respuesta al coseno del sensor, el 17.5% por datos faltantes, el 10.7% por datos fuera del límite inferior y el 3.5% por datos fuera de límite superior. Los errores que más se presentaron fueron por error de coseno del sensor y por datos faltantes, que juntos representaban el 56.8% del total de datos.

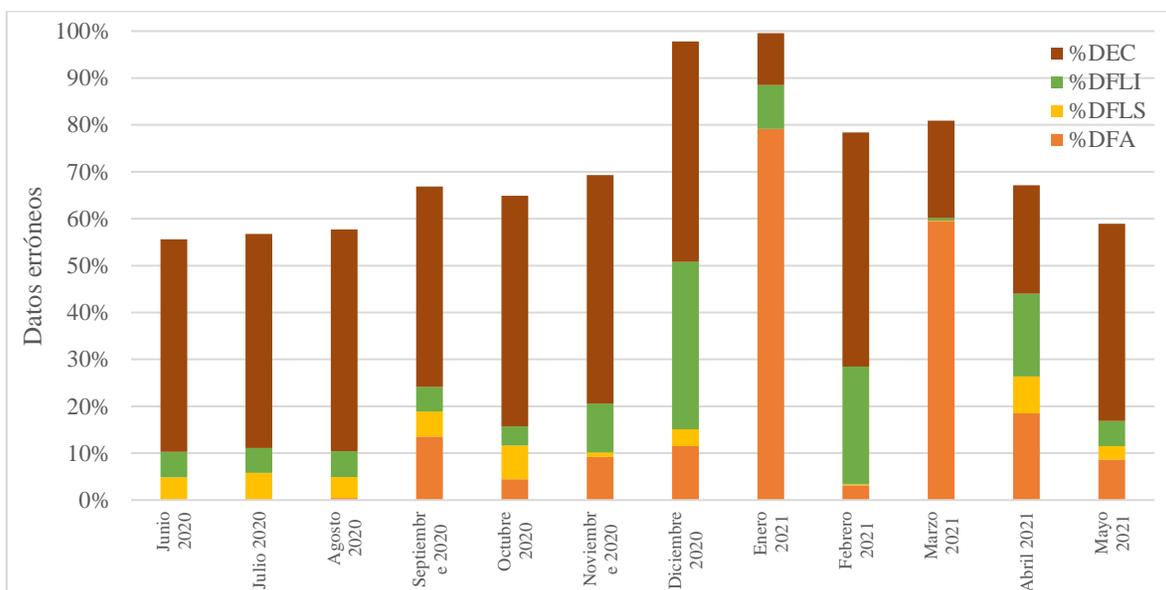
Aproximadamente, del 42.0-49.0% de los datos de cada mes fueron marcados como error por respuesta a coseno, esto se debe a que estos datos pertenecen al periodo nocturno y presentaban valores diferentes de  $0 \text{ W/m}^2$ . Este comportamiento se debe a la incertidumbre del sensor cuando el ángulo zenit es  $>82^\circ$  (entre el ocaso y el alba). Los meses de abril 2021, marzo 2021 y enero 2021 presentaron porcentajes menores con 22.0%, 21.0% y 11.0%, respectivamente, esto fue por el porcentaje alto de datos faltantes.

Los datos faltantes fueron 92133, equivalente a que la *EMA* estuviera fuera de funcionamiento 64 días. Los meses con más datos faltantes fueron enero 2021, marzo 2021, abril 2021, septiembre 2020 y diciembre 2020 con 79.0%, 60.0%, 22.0%, 15.0% y 11.0%, respectivamente.

La causa de la pérdida de los datos se debe a que el monitoreo fue pausado por actividades de mantenimiento en la planta.

Los meses que presentaron un porcentaje alto de datos fuera de límite inferior fueron diciembre 2020, febrero 2021, abril 2021 y noviembre 2020, con 36.0%, 25.0%, 10.0% y 10.0%. Los datos identificados por este error normalmente eran valores negativos incluso en periodos diurnos. La causa de este problema fue la desconexión del sensor.

Los datos identificados como fuera del límite superior se mantuvieron al margen del 5.0% en 9 de 12 meses analizados. Los meses que presentaron mayor porcentaje de datos fuera de límite superior fueron abril 2021, octubre 2020 y julio 2020 y con 8.0%, 7.0% y 6.0%, respectivamente.



**Figura 4.1** Datos erróneos de la base de datos de Xochitepec, Mor.

**Tabla 4.1** Confiabilidad de la base de datos cruda.

Mes	F1 (DFA)	F2 (DFLS)	F3 (DFLI)	F4 (DEC)	Total (mensual)
<b>Junio 2020</b>	0%	5%	5.4%	45%	56%
<b>Julio 2020</b>	0%	6%	5.3%	46%	57%
<b>Agosto 2020</b>	0%	4%	5.5%	47%	58%

<b>Septiembre 2020</b>	14%	5%	5.2%	43%	67%
<b>Octubre 2020</b>	4%	7%	4.1%	49%	65%
<b>Noviembre 2020</b>	9%	1%	10.4%	49%	69%
<b>Diciembre 2020</b>	11%	4%	35.7%	47%	98%
<b>Enero 2021</b>	79%	0%	9.4%	11%	100%
<b>Febrero 2021</b>	3%	0%	25.1%	50%	78%
<b>Marzo 2021</b>	60%	0%	0.5%	21%	81%
<b>Abril 2021</b>	18%	8%	17.6%	23%	67%
<b>Mayo 2021</b>	9%	3%	5.4%	42%	59%
<b>Total (anual)</b>	<b>18%</b>	<b>4%</b>	<b>10.7%</b>	<b>39%</b>	<b>71%</b>

### *Corrección de base de datos de irradiancia*

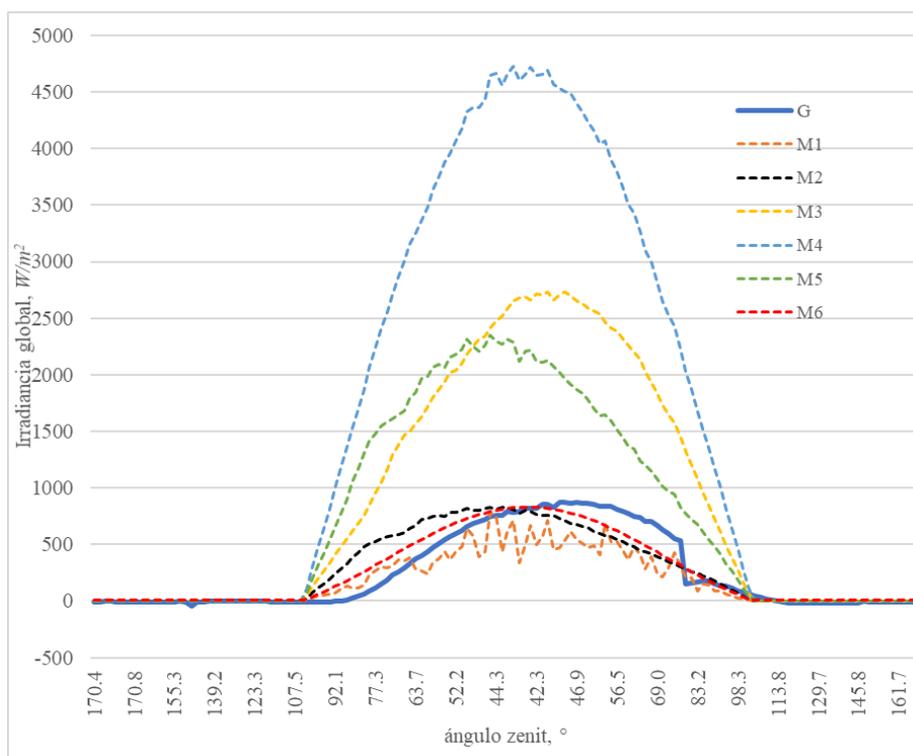
La corrección de la base de datos de irradiancia implica la selección del modelo de irradiancia y el llenado de base de datos.

#### *Selección del modelo de irradiancia*

En la **Tabla 4.2** se muestran el comparativo para la selección de modelos de irradiancia. La irradiancia se estimó con los seis modelos y se comparó con una base de datos mensual con datos aceptables en términos del *RMSE* y *MAPE*. El modelo con mayor precisión fue el modelo **M6** propuesto por Álvarez-Sánchez con valores de *RMSE* y *MAPE* de  $178.16 \text{ W/m}^2$  y  $0.09\%$ . También, en la **Figura 4.2** se muestra un comparativo de la irradiancia experimental *G* contra las estimaciones realizadas por los modelos teóricos para el día 01 de junio del 2022, donde se observa que el modelo **M6** es adecuado para estimar la irradiancia en Xochitepec, Morelos. El modelo **M6** fue el seleccionado debido a que para su aplicación se requieren datos de irradiancia solar extraterrestre y con los cuales se cuentan.

**Tabla 4.2** Comparativo del desempeño de los modelos de irradiancia.

Modelo	RMSE ( $W/m^2$ )	MAPE (%)
<b>M1</b> Hargreaves y Allen, (2003)	180.46	0.09
<b>M2</b> Adaramola, (2012), a)	213.80	0.09
<b>M3</b> Adaramola, (2012), b)	861.39	0.28
<b>M4</b> Adaramola, (2012), c)	1707.87	0.53
<b>M5</b> Adaramola, (2012), d)	788.28	0.23
<b>M6</b> Álvarez-Sánchez, (2017)	178.16	0.09

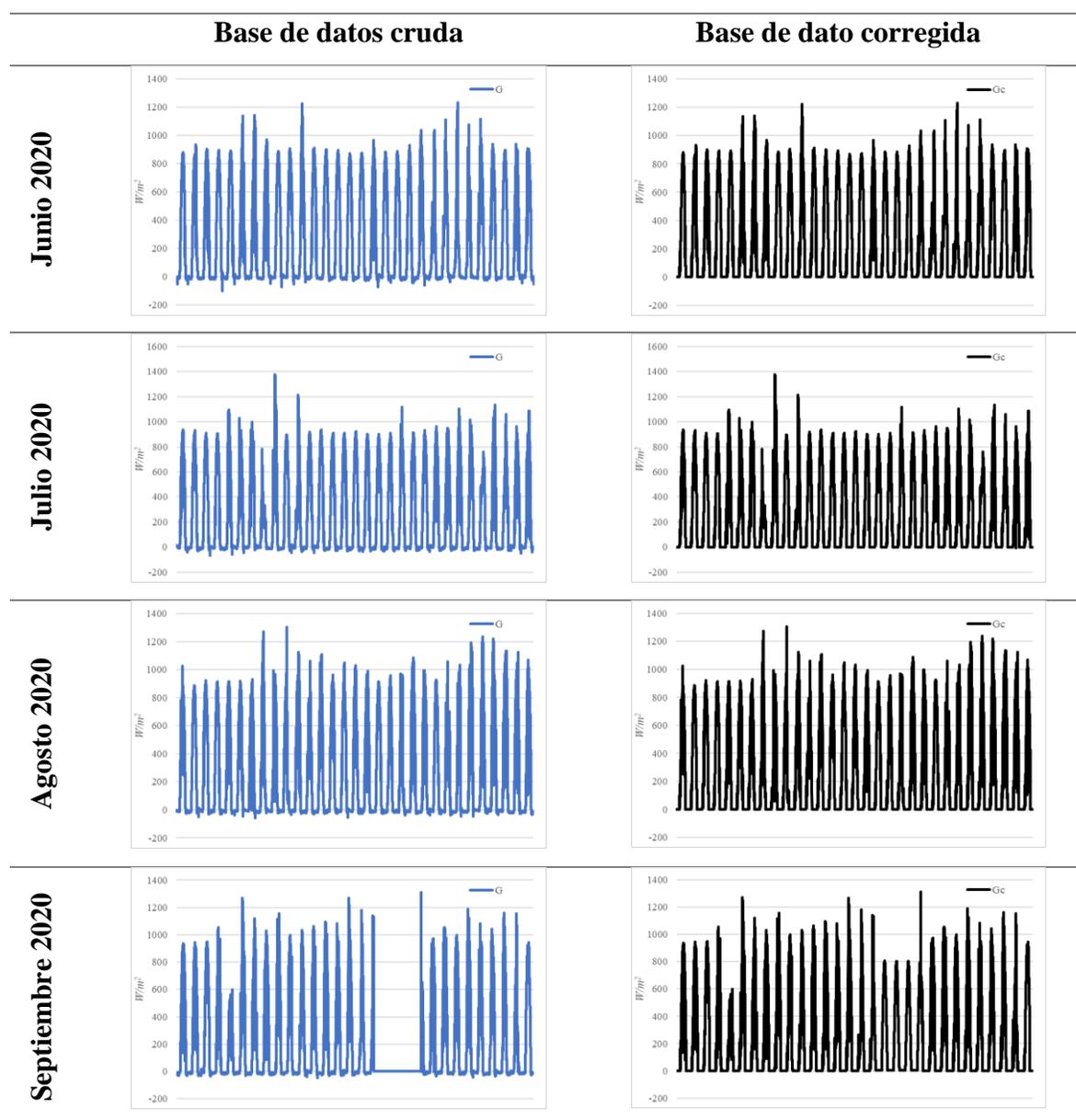


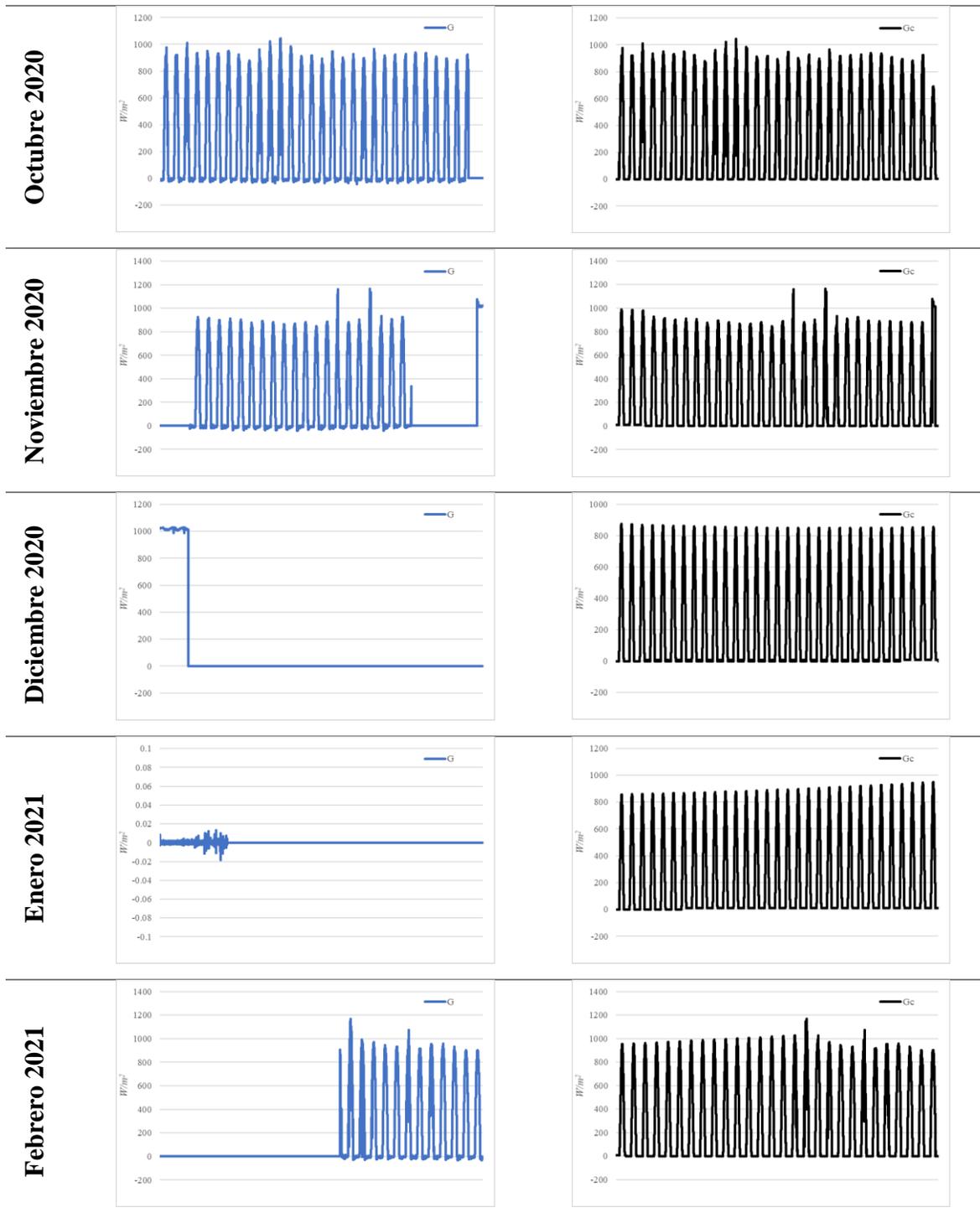
**Figura 4.2** Comparativo de los datos de irradiancia medidos con las estimaciones de los modelos (M1-6) del 01 de junio del 2020.

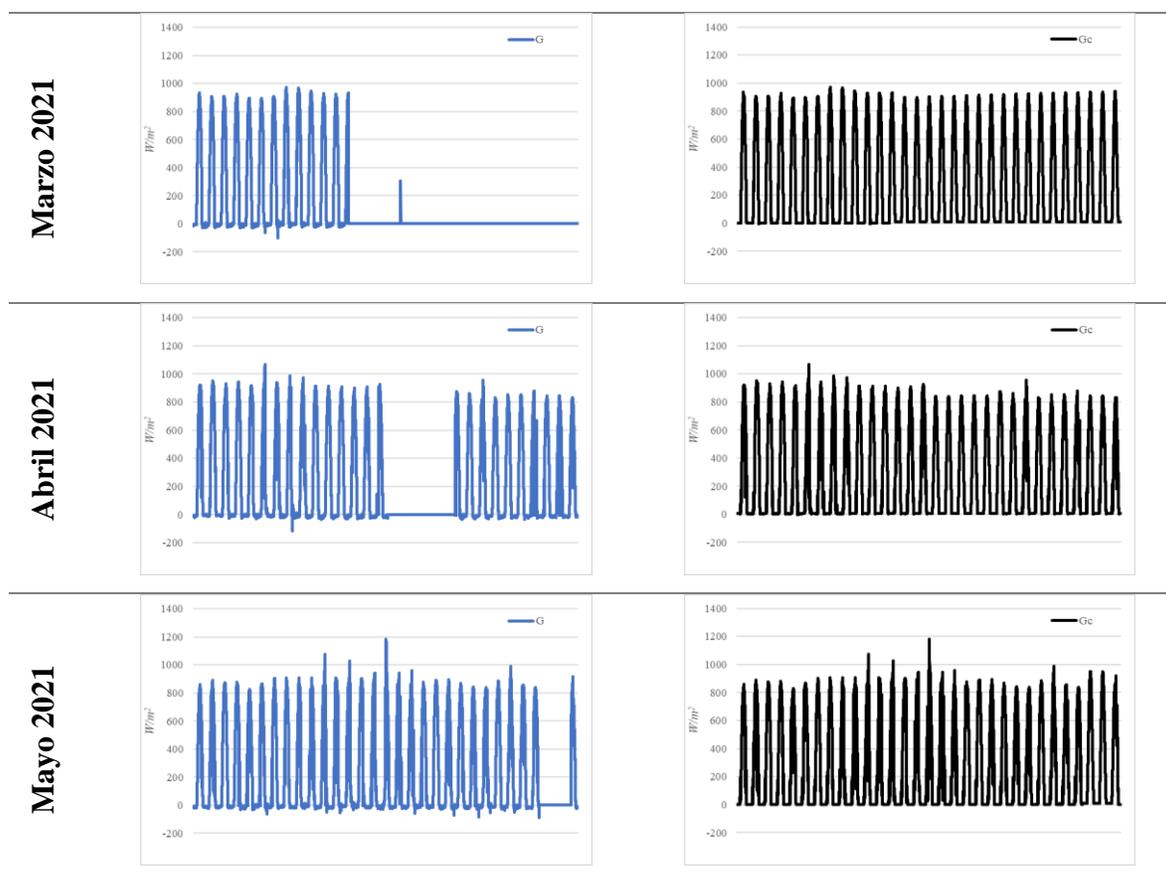
*Llenado de base de datos de irradiancia*

La corrección de base de datos de irradiancia se realizó con el modelo **M6** propuesto por Álvarez-Sánchez por ser un modelo preciso y por requerir únicamente datos de radiación extraterrestre. En la **Tabla 4.3** se muestra el resultado de la corrección para cada mes, en el que se compara la base de datos cruda contra la base de datos corregida. La estrategia de corrección permitió mitigar los datos erróneos identificados en la base de datos cruda y obtener una base de datos anual de irradiancia ordenada, filtrada y corregida para su uso.

**Tabla 4.3** Resultado de la corrección de las bases de datos de irradiancia.







### *Incertidumbre en la evaluación del recurso solar*

En la **Figura 4.3** se muestra la comparativa de la evaluación del recurso solar con la base de datos cruda,  $I$ , y corregida,  $I_c$ , así como la incertidumbre,  $U_I$ . El recurso solar anual con datos crudos fue de  $1.5 \text{ MW/m}^2$ , mientras que al emplear la estrategia de corrección fue de  $2.2 \text{ MW/m}^2$ , representando una incertidumbre de 46.7%.

Los meses con menor incertidumbre en el recurso solar fueron junio, julio, agosto y octubre 2020, con 3.1%, 3.2%, 5.1% y 5.7%, respectivamente. En los cuatro casos, las bases de datos crudas, presentaron 0.0-4.0% de datos faltantes, 4.1-5.5% de datos fuera de límite inferior, 4.0-7.0% de datos fuera de límite superior y 45.0-49.0% de datos con error por respuesta al coseno. Por lo que podría decirse que este sería un comportamiento aceptable en la base de datos cruda para que la incertidumbre en la evaluación del recurso no exceda el 6.0%.

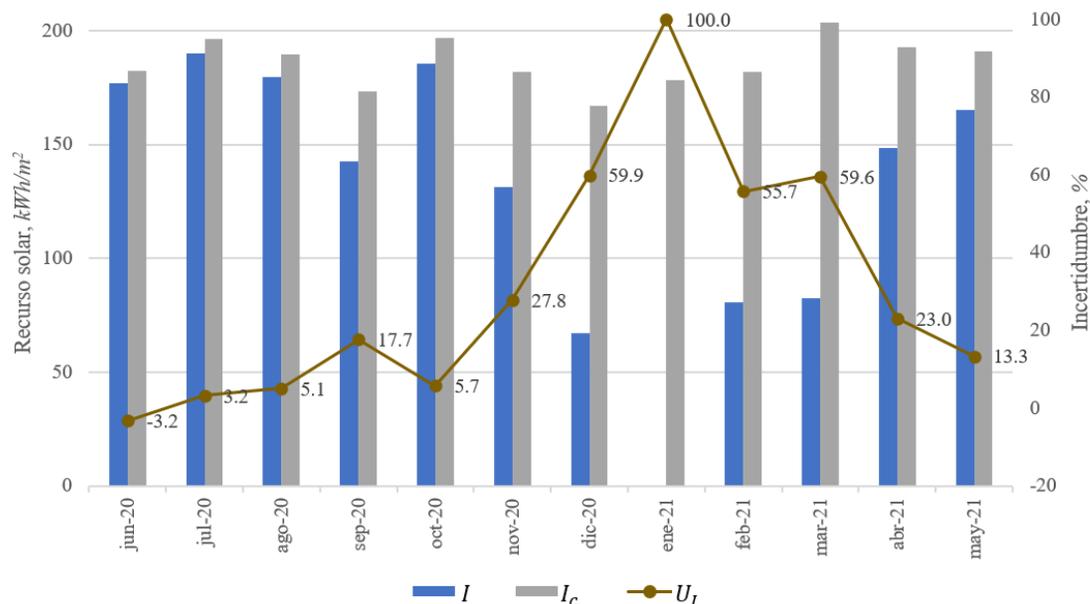
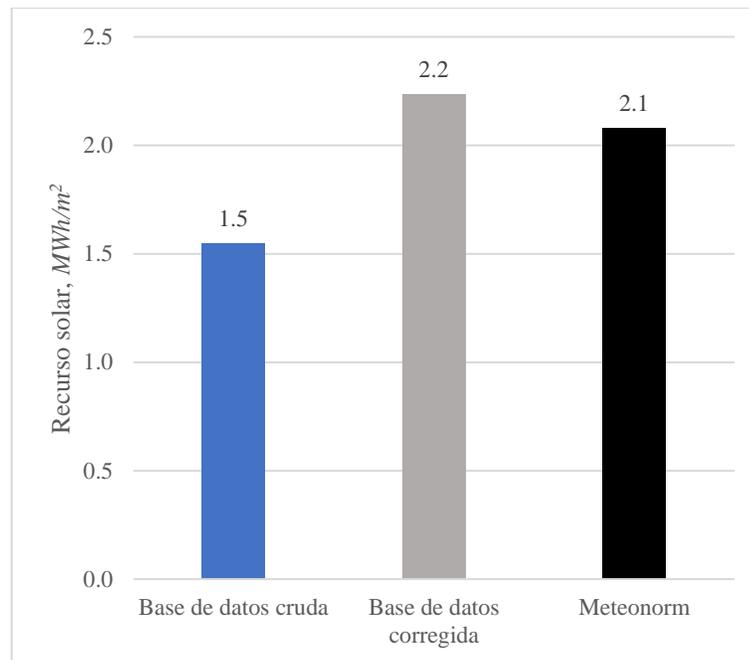


Figura 4.3 Comparativa de la evaluación del recurso solar crudo y corregido.

Los meses con mayor incertidumbre en el recurso solar fueron enero 2021, diciembre 2020, marzo 2021, febrero 2021, noviembre 2020, abril 2021, septiembre 2021 y mayo 2021 con 100%, 59.9%, 59.6%, 55.7%, 27.8%, 23.0%, 17.7% y 13.3%, respectivamente. Al revisar el análisis de confiabilidad de la base de datos cruda se observa que, el porcentaje de datos faltantes y datos fuera de límite superan el 8.0% en estos meses. Enero 2020 presentó 79.0% de datos faltantes, diciembre 2020 presentó 36.0% de datos fuera de límite inferior y 11.0% de datos faltantes, marzo 2021 presentó 60.0% de datos faltantes, febrero 2021 presentó 25.0% de datos fuera de límite inferior, noviembre 2020 presentó 10.0% de datos fuera de límite inferior y 9.0% de datos faltantes, abril 2021 presentó 18% de datos faltantes, 18% de datos fuera de límite inferior y 8.0% de datos fuera de límite superior, septiembre 2020 presentó 15.0% de datos faltantes y 5.0% de datos fuera de límite inferior y mayo 2021 presentó 9.0% de datos faltantes y 5.4% de datos fuera de límite inferior. Por ello, se puede decir que, los datos faltantes y fuera de límite inferior son los que más afectan la incertidumbre en la evaluación del recurso solar.

Como se mencionó en la sección **Subrutina C)**, el estudio consideró como referencia los datos del mes de junio 2021 para calibrar la estrategia de corrección por ser datos que presentaban un bajo porcentaje de datos erróneos. Los resultados de *Selección de modelo de corrección de*

*irradiancia*, la estrategia de corrección mostró ser adecuada para estimar la irradiancia en Xochitepec, Morelos. Adicionalmente, los resultados del recurso solar anual con datos crudos y datos corregidos, se contrastaron con el recurso solar anual con datos *TMY* de *Meteonorm 8* [9]. En la **Figura 4.4** se muestra el recurso solar evaluado con la base de datos cruda y corregida, y con datos del *TMY* de *Meteonorm 8*. El recurso anual con datos corregidos es de  $2.2 \text{ MW/m}^2$  y con datos tipo *TMY*, fue de  $2.1 \text{ MW/m}^2$ . El recurso solar evaluado con la matriz de datos corregida únicamente presentó una diferencia experimental del 6.9% respecto al recurso evaluado con la matriz de datos *TMY* de *Meteonorm 8*.



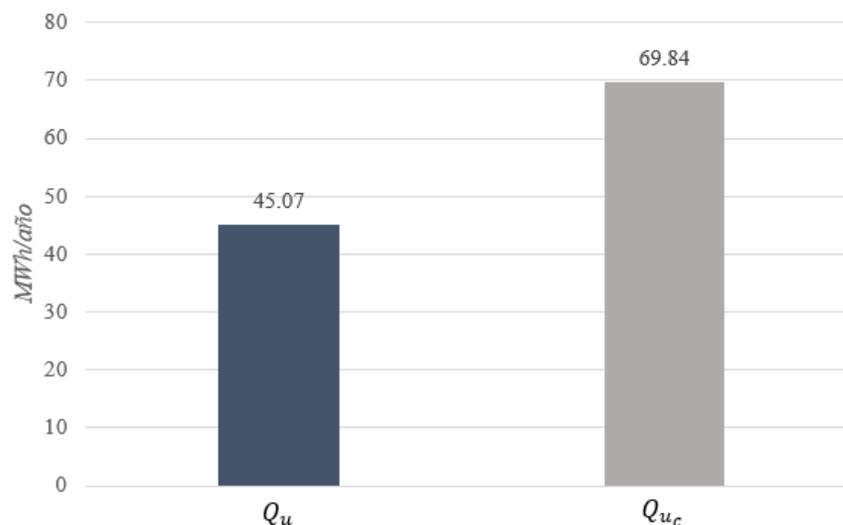
**Figura 2.** Diferencia del recurso solar evaluado con la base de datos cruda y corregida, también se presenta el recurso solar con la base de datos correspondiente *TMY* de *Meteonorm 8*.

## 4.2 Incertidumbre de la evaluación termo-económica del calentador solar de agua en Xochitepec, Mor.

En sistemas de calentamiento solar de agua, una incertidumbre de la irradiancia del 71.0% afecta 46.7% la evaluación anual del recurso solar, 55.0% la energía térmica útil solar anual, y esta a su vez, afecta un 64.3% la tasa interna de retorno y hasta un 33.9% el periodo de recuperación de la inversión del proyecto. En las secciones *Incertidumbre de la evaluación térmica* e *Incertidumbre de la evaluación económica* se describen los resultados.

### *Incertidumbre de la evaluación térmica*

En la **Figura 4.5** se muestra el comparativo de la evaluación térmica anual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos. Se observa que la incertidumbre de la base de datos de 71.0% aporta una incertidumbre a la energía térmica útil solar anual  $U_{Q_u}$  de 55.0% debido a que la  $Q_u$  anual fue de 45.07 *MWh*, mientras que la  $Q_{u_c}$  anual fue de 69.84 *MWh*. En la **Figura 4.6** se muestra el comparativo de la evaluación térmica mensual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos.

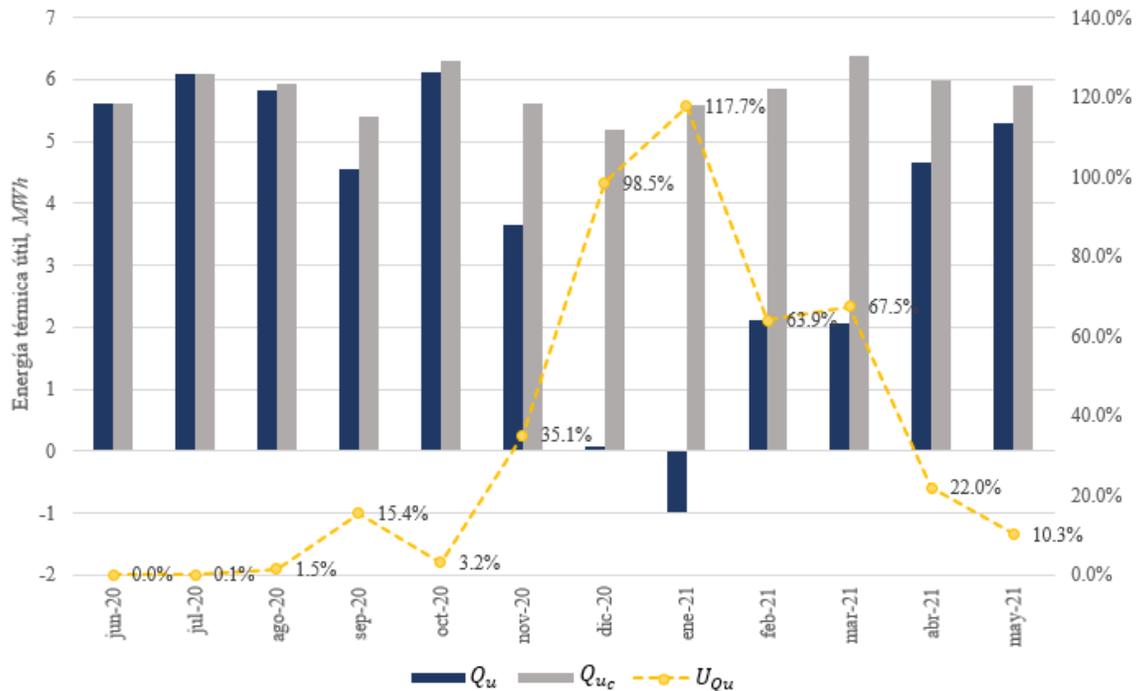


**Figura 4.5** Comparativo de la evaluación térmica anual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos.

Los meses con menor incertidumbre en la evaluación térmica fueron junio, julio, agosto y octubre 2020 con 0.0%, 0.1%, 1.5% y 3.2%, respectivamente. En estos meses, la incertidumbre en el recurso solar no superó el 5.7% debido a que los datos faltantes y fuera de intervalo se mantuvo por debajo del 8.0%.

Los meses con mayor incertidumbre en la evaluación térmica del sistema fueron enero 2021, diciembre 2020, marzo 2021, febrero 2021, noviembre 2020, abril 2021, septiembre 2020 y mayo 2021 con 117.7%, 98.5%, 67.5%, 63.9%, 35.1%, 22.0%, 15.4% y 10.3%, respectivamente. Esto se debe a la considerable incertidumbre observada en la evaluación del recurso solar de 13.3-100.0% a causa de datos faltantes y fuera de intervalo de la base de datos de irradiancia que se presentaron del 8.0-79.0%.

Es de observar que, la incertidumbre de la evaluación del recurso solar se propaga con mayor intensidad en la incertidumbre de la evaluación térmica del sistema, llegando a ser hasta 38.0% mayor, en meses en los que la cantidad de datos faltantes y fuera de intervalo superen el 8.0%.

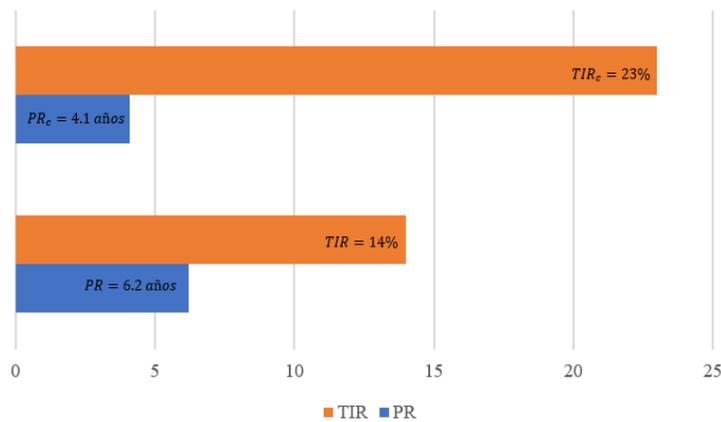


**Figura 4.6** Comparativo de la evaluación térmica mensual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos.

### Incertidumbre de la evaluación económica del sistema

En la **Figura 4.7** se muestra el comparativo de la evaluación económica anual del sistema de calentamiento solar de agua con la estimación de energía térmica derivada de datos crudos y datos corregidos. En el **Apéndice 1** se muestra el desglose de la evaluación económica del sistema con datos crudos y corregidos. La evaluación económica del calentador solar de agua, considerando la evaluación térmica con datos crudos de irradiancia, estima ahorros anuales de \$83,385.07 *MXN*, con tasa interna de retorno de 14.0% y el periodo de recuperación de la inversión de 6.2 años. Por otra parte, considerando la evaluación térmica con datos corregidos, los ahorros anuales son de \$129,200.25 *MXN*, con tasa interna de retorno de 23.0% y el periodo de recuperación de la inversión de 4.1 años. La incertidumbre en la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación de la inversión es de 64.3% y 33.9%, respectivamente.

El efecto de datos de irradiancia erróneos de estaciones meteorológicas puede llegar a limitar proyectos viables, ya que la incertidumbre en el desempeño termo-económico de un sistema es considerable. Se observa que, al utilizar la estrategia de corrección, los ahorros anuales incrementan \$45,815.18 *MXN*, la tasa interna de retorno incrementa 9.0% y el periodo de recuperación de la inversión se reduce 2.1 años. El tratamiento de datos de radiación puede utilizarse como una alternativa en la evaluación de escenarios de inversión de sistemas de aprovechamiento solar.



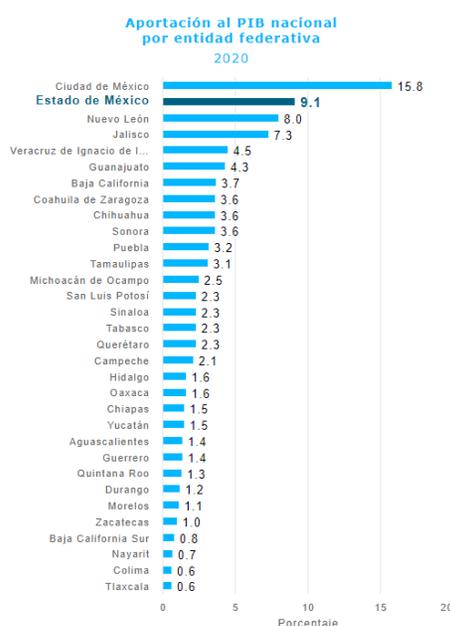
**Figura 4.7** Comparativo de la evaluación económica del sistema de calentamiento de agua con datos crudos y corregidos.

### 4.3 Incertidumbre de la evaluación termo-económica del calentador solar de agua en Monterrey, NL.

Con el objetivo de estudiar la incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar por utilizar datos erróneos de irradiancia en una ciudad distinta con clima representativo para el uso de calentamiento solar en México, se consideró la ciudad de Monterrey, NL. A continuación, se describe la selección de la ciudad, el análisis de confiabilidad de la base de datos, la corrección de los datos de irradiancia y la incertidumbre de la evaluación termo-económica del sistema de la segunda ciudad.

#### *Selección de la ciudad*

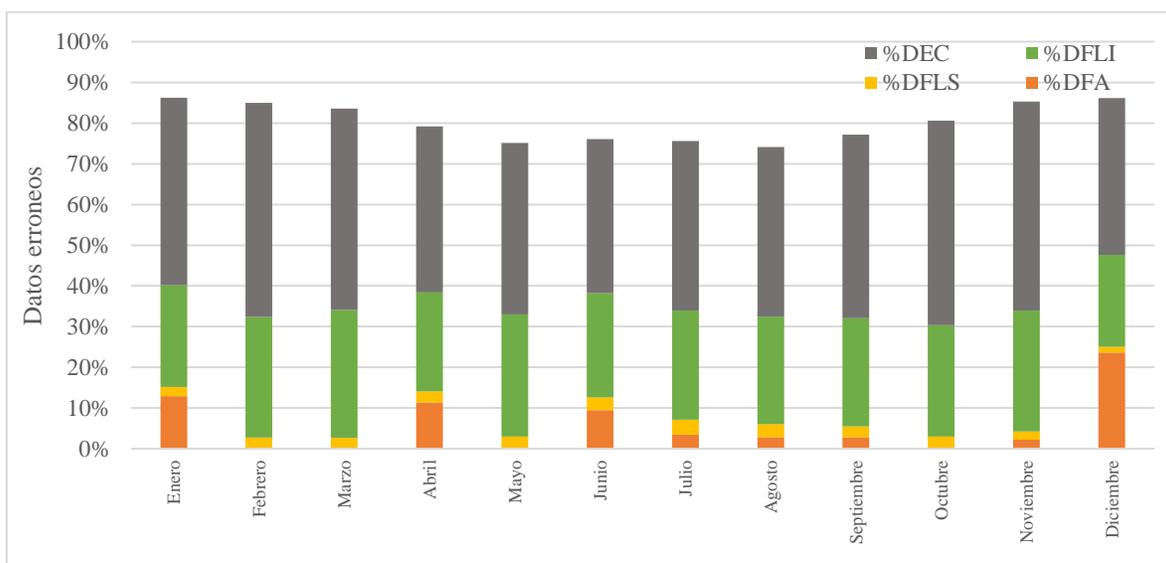
Monterrey, Nuevo León presenta clima seco como el 32.0% del territorio mexicano [42], con temperatura promedio anual de 20.0°C, máxima de 32.0°C y mínima de 5.0°C. En la **Figura 4.8** se muestra que Nuevo León es uno de las tres entidades que más contribuyen al Producto Interno Bruto nacional, con 8.0% debido a su alta actividad industrial [47]. El análisis de la incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar por utilizar bases de datos erróneas de irradiancia, se realiza para Monterrey, Nuevo León por ser un clima representativo de México y es una zona con potencial industrial para el calentamiento solar.



**Figura 4.8** Producto Interno Bruto por Entidad Federativa en 2020. (INEGI).

### **Confiabilidad de la base de datos de irradiancia de Monterrey**

La base de datos de irradiancia cruda es de 01 de enero al 31 de diciembre del 2016 de 00:00 a 23:50 *h* con pasos de tiempo de 10 *min*. En la **Figura 4.9** se muestran datos erróneos identificados por tipo. La base de datos se conformó con un total de datos erróneos de 42214, equivalente al 80.0%, el 44.7% son por error de coseno del sensor, el 27.1% por datos fuera del límite inferior, el 5.8% por datos faltantes, y el 2.7% por datos fuera de límite superior. Los meses con más errores fueron enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre con un promedio de 85% de datos erróneos. Se observa que los tipos de errores que más afectaron esta base de datos fueron el error por respuesta al coseno del sensor y los datos fuera de límite inferior, los cuales se presentaron porque la base de datos presentaba un desfase de 44 registros y los datos nocturnos estaban registrados como -1. La base de datos presentó un bajo porcentaje de datos faltantes.

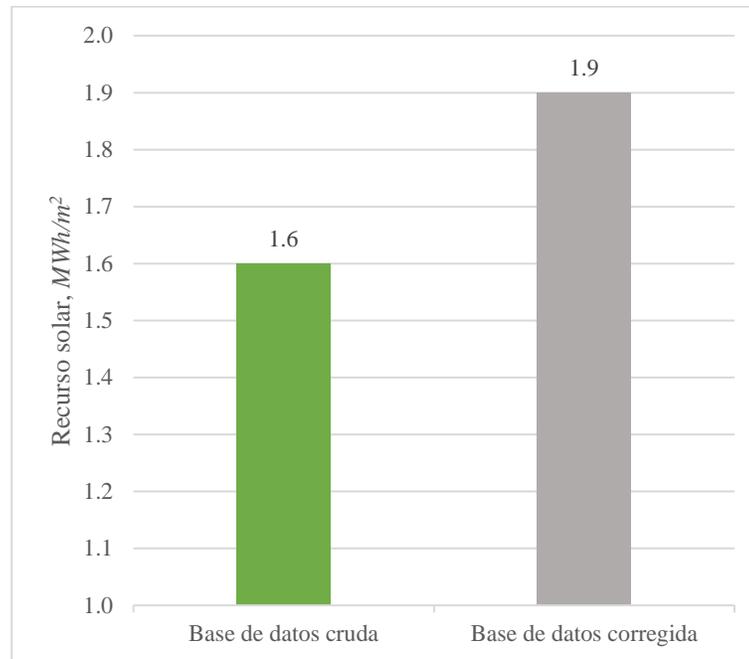


**Figura 4.9** Datos erróneos de la base de datos de Monterrey.

### **Corrección de la base de datos y recurso solar de Monterrey**

La corrección de base de datos de irradiancia se realizó con el modelo **M6** propuesto por [19]. En la **Figura 4.10** se muestra el recurso solar evaluado con la base de datos cruda y corregida.

El recurso solar anual con datos crudos fue de  $1.6 \text{ MW/m}^2$ , mientras que al emplear la estrategia de corrección fue de  $1.9 \text{ MW/m}^2$ , representando una diferencia de 18.8%.

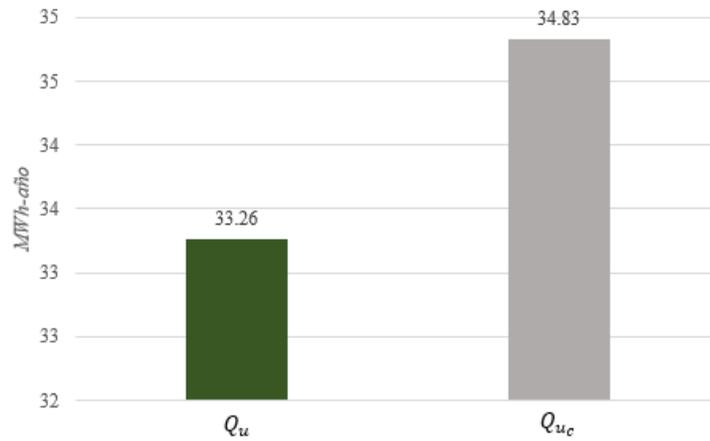


**Figura 4.10** Diferencia del recurso solar en Monterrey con la base de datos cruda y corregida.

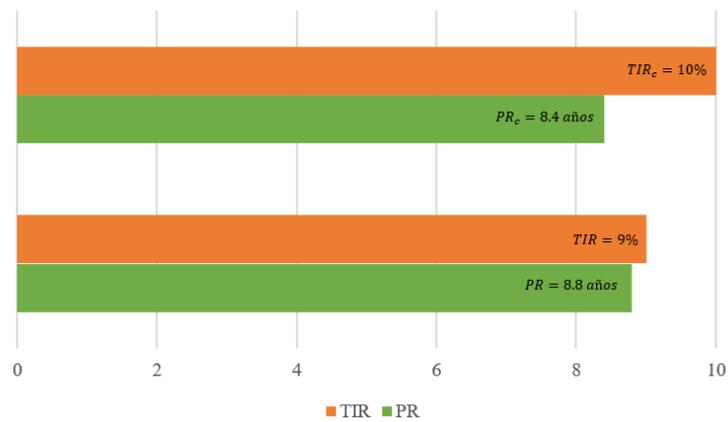
#### ***Incertidumbre de la evaluación termo-económica del sistema***

En un sistema de calentamiento solar de agua para Monterrey, una incertidumbre de la irradiancia solar del 80.0% afecta un 4.7% la energía térmica útil solar, y esta a su vez, afecta un 11.1% la tasa interna de retorno y hasta un 4.5% el periodo de recuperación de la inversión. En la **Figura 4.11** se muestra el comparativo de la evaluación térmica anual del sistema de calentamiento solar de agua con datos de irradiancia crudos y corregidos para Monterrey. La energía térmica útil solar anual con datos crudos fue de  $33.3 \text{ MWh}$ , mientras que con datos corregidos fue de  $34.8 \text{ MWh}$ , lo que significa un incremento de  $1.6 \text{ MWh}$ . En la **Figura 4.12** se muestra el comparativo de la evaluación económica anual del sistema de calentamiento solar de agua en Monterrey con la estimación de energía térmica derivada de datos crudos y datos corregidos, el  $PR$ , fue de 8.8 años con una  $TIR$  de 9.0%, mientras que el  $PR_c$  fue de 8.4 años con

una  $TIR_c$  de 10.0%. Con la corrección el periodo de recuperación de la inversión se redujo 5 meses y la tasa interna de retorno se incrementó 1.0%.



**Figura 4.11** Comparativo de la evaluación térmica anual del sistema de calentamiento solar de agua en Monterrey con datos de irradiancia crudos y corregidos.



**Figura 4.12** Comparativo de la evaluación económica del sistema de calentamiento de agua en Monterrey con datos crudos y corregidos.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

En este capítulo se presentan las conclusiones del estudio de la incertidumbre de evaluación termo-económico de un sistema de calentamiento solar que utiliza bases de datos erróneas de irradiancia, de una *EMA*.

## **5.1 Conclusiones**

En sistemas de calentamiento solar de agua, una incertidumbre de la irradiancia del 71.0% afecta un 46.7% la evaluación del recurso solar, 55.0% la energía térmica útil solar, y esta a su vez, afecta un 64.3% la tasa interna de retorno y hasta un 33.9% el periodo de recuperación de la inversión.

Los resultados del trabajo de tesis permitieron validar la hipótesis de que el efecto de datos de irradiancia erróneos de estaciones meteorológicas puede tener una repercusión muy fuerte en escenarios de inversión de proyectos de aprovechamiento solar, pudiendo llegar a limitar proyectos viables.

La plataforma de corrección de bases de datos de irradiancia propuesta puede utilizarse como una alternativa mitigar el alto porcentaje de datos erróneos y obtener una base de datos anual de irradiancia óptima para su uso.

Con la corrección de la base de datos, el calor solar se incrementó 24.8 *MWh*, equivalentes 130 días de calor solar, los ahorros anuales incrementaron \$45,815.18 *MXN*, la tasa interna de retorno aumentó 9.0% y el periodo de recuperación de la inversión disminuyó 2.1 años.

Los meses con menores incertidumbres en la evaluación del recurso solar (3.0-5.1%) y en la evaluación térmica del sistema (0.0- 3.2%) presentaron 0.0% de datos faltantes, 5.0% de datos fuera de límite inferior, 4.0-6.0% de datos fuera de límite superior y 45.0-47.0% de datos con error por respuesta al coseno, por lo que se podría decir que este sería un comportamiento aceptable de una base de datos para Xochitepec.

Por otra parte, cuando los datos faltantes o fuera de intervalo superan el 5.0%, la incertidumbre en la evaluación del recurso puede incrementar entre 15.0-100.0% y en la evaluación térmica del sistema hasta 117.7%.

Para la ciudad de Monterrey el estudio mostró una incertidumbre de la irradiancia solar del 80.0% que afecta un 4.7% la energía térmica útil solar, y esta a su vez, afecta un 11.1% la tasa interna de retorno y un 4.5% el periodo de recuperación de la inversión. Con la corrección la

energía térmica útil solar incremento 1.6 *MWh*, el periodo de recuperación de la inversión se redujo 5 meses y la tasa interna de retorno se incrementó 1.0%.

## **5.2 Recomendación para trabajos futuros**

- Estudiar la incertidumbre en la evaluación termo-económica de otros sistemas de aprovechamiento solar debido a los datos erróneos de irradiancia.
- Realizar el mismo estudio para diferentes ciudades de la República Mexicana con alto potencial industrial y de calentamiento.
- Estandarizar un procedimiento para el tratamiento de bases de datos de radiación solar previo a su uso.

## APÉNDICE 1. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En la **Tabla A1.1** se muestra la cotización del sistema de calentamiento solar de agua. La inversión inicial,  $I_{nv}$ , es de \$544,559.38. El costo por es el costo del  $kWh$  de gas LP,  $C_{kWh}$ , se considera de \$1.85 el cual se determinó con los documentos *Lista de combustibles y sus poderes caloríficos* [48] y *Precios máximos vigentes del 12 al 18 de junio de 2022* [49].

**Tabla A1.1** Cotización del sistema de calentamiento solar de agua.

Unidades	Concepto	P.U.	Importe
16	Colecto solar modelo MS 2.5	\$8,515.00	\$136,240.00
16	Bases tipo tijera de armado	\$1,663.00	\$26,608.00
1	Tanque de almacenamiento térmico de 2500 litros	\$94,859.00	\$94,859.00
2	Bomba de recirculación para sistemas solar	\$13,272.00	\$26,544.00
1	Sistema de control diferencial digital	\$7,476.00	\$7,476.00
1	Instalación hidráulica y eléctrica del sistema	\$177,720.74	\$177,720.74
SUBTOTAL			\$469,447.74
IVA			\$75,111.64
$I_{nv}$			<b>\$544,559.38</b>

### A1.1 Evaluación económica del sistema en Xochitepec, Morelos.

En la **Tabla A1.2** se muestran la evaluación económica del sistema con datos crudos y en la **Tabla A1.3** la evaluación con datos corregidos para un sistema de calentamiento solar de agua en Xochitepec, Morelos.

**Tabla A1.2** Evaluación económica del calentador en Xochitepec con datos crudos.

	$Q_u$ (KWh-año)	$F$ (\$)	VAN (\$)	Flujo de caja acumulado
	0	-\$544,559.38	-\$544,559.38	<b>-\$544,559.38</b>
jun-20	<b>5618.5</b>	\$ 83,385.07	\$ 76,500.07	<b>-\$461,065.51</b>
jul-20	<b>6078.4</b>	\$ 83,385.07	\$ 70,183.55	<b>-\$377,571.64</b>
ago-20	<b>5833.8</b>	\$ 83,385.07	\$ 64,388.57	<b>-\$294,077.77</b>
sep-20	<b>4559.9</b>	\$ 83,385.07	\$ 59,072.09	<b>-\$210,583.91</b>
oct-20	<b>6105.8</b>	\$ 83,385.07	\$ 54,194.58	<b>-\$127,090.04</b>
nov-20	<b>3644.0</b>	\$ 83,385.07	\$ 49,719.79	<b>-\$43,596.17</b>

dic-20	<b>80.4</b>
ene-21	<b>-988.3</b>
feb-21	<b>2114.5</b>
mar-21	<b>2074.8</b>
abr-21	<b>4661.9</b>
may-21	<b>5289.4</b>
<i>Q<sub>u</sub> (kWh-año)</i>	<b>45073.0</b>

7	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 45,614.49	\$39,897.70
8	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 41,848.16	\$123,391.57
9	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 38,392.80	\$206,885.44
10	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 35,222.76	\$290,379.30
11	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 32,314.45	\$373,873.17
12	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 29,646.29	\$457,367.04
13	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 27,198.43	\$540,860.91
14	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 24,952.69	\$624,354.78
15	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 22,892.37	\$707,848.65
16	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 21,002.18	\$791,342.51
17	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 19,268.05	\$874,836.38
18	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 17,677.11	\$958,330.25
19	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 16,217.54	\$1,041,824.12
20	45073.01	\$ 83,385.07	\$ 14,878.47	\$1,125,317.99
		<b>PR</b>	<b>6.2</b>	<b>años</b>
		<b>TIR</b>	<b>14</b>	<b>%</b>

Tabla A1.3 Evaluación económica del calentador en Xochitepec con datos corregidos.

	<i>Q<sub>uc</sub> (KWh-mes)</i>
jun-20	<b>5619.3</b>
jul-20	<b>6086.4</b>
ago-20	<b>5924.8</b>
sep-20	<b>5392.8</b>
oct-20	<b>6307.6</b>
nov-20	<b>5612.9</b>
dic-20	<b>5191.4</b>
ene-21	<b>5591.4</b>
feb-21	<b>5864.9</b>
mar-21	<b>6375.2</b>
abr-21	<b>5974.9</b>
may-21	<b>5896.4</b>
<i>Q<sub>uc</sub> (kWh-año)</i>	<b>69838.0</b>

<i>j</i>	<i>Q<sub>u</sub></i> (KWh-año)	<i>F</i> (\$)	VAN (\$)	Flujo de caja acumulado
0	0	-\$544,559.38	-\$544,559.38	<b>-\$544,559.38</b>
1	69837.97	\$129,200.25	\$118,532.34	<b>-\$415,190.56</b>
2	69837.97	\$129,200.25	\$108,745.26	<b>-\$285,821.73</b>
3	69837.97	\$129,200.25	\$99,766.30	<b>-\$156,452.91</b>
4	69837.97	\$129,200.25	\$91,528.71	<b>-\$27,084.08</b>
5	69837.97	\$129,200.25	\$83,971.30	\$102,284.74
6	69837.97	\$129,200.25	\$77,037.89	\$231,653.56
7	69837.97	\$129,200.25	\$70,676.96	\$361,022.39
8	69837.97	\$129,200.25	\$64,841.25	\$490,391.21
9	69837.97	\$129,200.25	\$59,487.38	\$619,760.03
10	69837.97	\$129,200.25	\$54,575.58	\$749,128.86
11	69837.97	\$129,200.25	\$50,069.34	\$878,497.68
12	69837.97	\$129,200.25	\$45,935.17	\$1,007,866.50
13	69837.97	\$129,200.25	\$42,142.36	\$1,137,235.33
14	69837.97	\$129,200.25	\$38,662.72	\$1,266,604.15
15	69837.97	\$129,200.25	\$35,470.38	\$1,395,972.97
16	69837.97	\$129,200.25	\$32,541.64	\$1,525,341.80
17	69837.97	\$129,200.25	\$29,854.71	\$1,654,710.62
18	69837.97	\$129,200.25	\$27,389.64	\$1,784,079.44

19	69837.97	\$129,200.25	\$25,128.11	\$1,913,448.27
20	69837.97	\$129,200.25	\$23,053.32	\$2,042,817.09
		<b>PR<sub>c</sub></b>	<b>4.1</b>	<b>años</b>
		<b>TIR<sub>c</sub></b>	<b>23</b>	<b>%</b>

## A1.2 Evaluación económica del sistema en Monterrey, NL.

En la **Tabla A1.4** se muestran la evaluación económica del sistema con datos crudos y en la **Tabla A1.5** la evaluación con datos corregidos para un sistema de calentamiento solar de agua en Monterrey, NL.

**Tabla A1.4** Evaluación económica del calentador en Monterrey con datos crudos.

$j$	$Q_u$ (KWh-año)	$F$ (\$)	VAN (\$)	Flujo de caja acumulado
	<b>33269.7</b>			
0	0	-\$544,559.38	-\$544,559.38	-\$544,559.38
1	33269.86	\$61,629.55	\$56,540.87	-\$480,024.16
2	33269.86	\$61,629.55	\$51,872.36	-\$415,488.93
3	33269.86	\$61,629.55	\$47,589.32	-\$350,953.71
4	33269.86	\$61,629.55	\$43,659.93	-\$286,418.49
5	33269.86	\$61,629.55	\$40,054.98	-\$221,883.27
6	33269.86	\$61,629.55	\$36,747.69	-\$157,348.04
7	33269.86	\$61,629.55	\$33,713.48	-\$92,812.82
8	33269.86	\$61,629.55	\$30,929.79	-\$28,277.60
9	33269.86	\$61,629.55	\$28,375.96	\$36,257.62
10	33269.86	\$61,629.55	\$26,032.99	\$100,792.84
11	33269.86	\$61,629.55	\$23,883.48	\$165,328.07
12	33269.86	\$61,629.55	\$21,911.45	\$229,863.29
13	33269.86	\$61,629.55	\$20,102.24	\$294,398.51
14	33269.86	\$61,629.55	\$18,442.43	\$358,933.73
15	33269.86	\$61,629.55	\$16,919.66	\$423,468.96
16	33269.86	\$61,629.55	\$15,522.62	\$488,004.18
17	33269.86	\$61,629.55	\$14,240.94	\$552,539.40
18	33269.86	\$61,629.55	\$13,065.08	\$617,074.62
19	33269.86	\$61,629.55	\$11,986.31	\$681,609.85
20	33269.86	\$61,629.55	\$10,996.62	\$746,145.07
		<b>PR</b>	<b>8.4</b>	<b>años</b>
		<b>TIR</b>	<b>10</b>	<b>%</b>

Tabla A1.5 Evaluación económica del calentador en Monterrey con datos corregidos.

$j$	$Q_u$ (KWh-año)	$F$ (\$)	VAN (\$)	Flujo de caja acumulado
	<b>34838.4</b>			
0	0	-\$544,559.38	-\$544,559.38	<b>-\$544,559.38</b>
1	34838.45	\$64,535.22	\$59,206.63	<b>-\$482,929.83</b>
2	34838.45	\$64,535.22	\$54,318.01	<b>-\$421,300.28</b>
3	34838.45	\$64,535.22	\$49,833.03	<b>-\$359,670.72</b>
4	34838.45	\$64,535.22	\$45,718.38	<b>-\$298,041.17</b>
5	34838.45	\$64,535.22	\$41,943.47	<b>-\$236,411.62</b>
6	34838.45	\$64,535.22	\$38,480.24	<b>-\$174,782.07</b>
7	34838.45	\$64,535.22	\$35,302.98	<b>-\$113,152.52</b>
8	34838.45	\$64,535.22	\$32,388.05	<b>-\$51,522.97</b>
9	34838.45	\$64,535.22	\$29,713.81	\$10,106.59
10	34838.45	\$64,535.22	\$27,260.38	\$71,736.14
11	34838.45	\$64,535.22	\$25,009.52	\$133,365.69
12	34838.45	\$64,535.22	\$22,944.51	\$194,995.24
13	34838.45	\$64,535.22	\$21,050.01	\$256,624.79
14	34838.45	\$64,535.22	\$19,311.94	\$318,254.34
15	34838.45	\$64,535.22	\$17,717.37	\$379,883.90
16	34838.45	\$64,535.22	\$16,254.47	\$441,513.45
17	34838.45	\$64,535.22	\$14,912.36	\$503,143.00
18	34838.45	\$64,535.22	\$13,681.06	\$564,772.55
19	34838.45	\$64,535.22	\$12,551.43	\$626,402.10
20	34838.45	\$64,535.22	\$11,515.08	\$688,031.65
		<b>PR</b>	<b>8.8</b>	<b>años</b>
		<b>TIR</b>	<b>9</b>	<b>%</b>

## REFERENCIAS

- [1] IRENA, “Renewable capacity statistics 2020”, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, Rep. ISBN 978-92-9260-239-0, 2020.
- [2] D. Ciolkosz, “SASRAD: An hourly-timestep solar radiation database for South Africa”, *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 20, no. 1, pp. 25-34, 2009, doi:10.17159/2413-3051/2009/v20i1a3299
- [3] S. Colle, S. L. De Abreu y R. Rütther, “Uncertainty in economical analysis of solar water heating and photovoltaic systems”, *Solar Energy*, vol. 70, no. 2, pp. 131–142, 2001. doi:10.1016/s0038-092x(00)00134-1
- [4] M. Šúri, T. A. Huld y E. D. Dunlop, “PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe”, *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 24, no. 2, pp. 55–67, Jun. 2005. doi:10.1080/14786450512331329556
- [5] K. Gairaa, A. Khellar, S. Benkacilai y M. Guermoui, “Solar radiation measurements in Algeria: case of Ghardaïa station as member of the enerMENA meteorological network”, *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 50-54, Dec. 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.11.010
- [6] S. T. Mohammad, H. H. Al-Kayiem, M. A. Aurybi y A. K. Khelif, “Measurement of global and direct normal solar energy radiation in Seri Iskandar and comparison with other cities of Malaysia”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 18, p. 100591, Apr. 2020. doi:10.1016/j.csite.2020.100591
- [7] V. Estrada-Cajjgal, *Fuentes de información de datos de radiación solar*, Cuernavaca, Morelos: IER-UNAM, 2008. <https://bit.ly/3pNoZcf>
- [8] M. Valdes-Barrón, D. Riveros-Rosas, C. A. Arancibia-Bulnes y R. Bonifaz, “The solar Resource Assessment in Mexico: State of the Art”, *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1299–1308, 2014. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.120
- [9] Meteotest, *Meteonorm 8, Handbook part II: Theory*, Meteotest, Oct. 2021. <https://bit.ly/3e06C0R>
- [10] J. Remund y S. Müller, “Solar radiation and uncertainty information of Meteonorm 7”, *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2011*, 2011. doi:10.18086/swc.2011.24.25
- [11] Organización Latinoamericana de Energía, “Medición directa de la radiación solar”, en *Solarimetría y evaluación energética solar*, Quito, 1983, pp. 13-14. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3AsUKMH>

- [12] T. Muneer y F. Fairouz, “Quality control of solar radiation and sunshine measurements - lessons learnt from processing worldwide databases”, *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 23, no. 3, pp. 151-166, Ago. 2002. doi:10.1191/0143624402bt038oa
- [13] M. Geiger, L. Diabaté, L. Ménard y L. Wald, “A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation”, *Solar Energy*, vol. 73, no. 6, pp. 475-480, Dec. 2002. doi:10.1016/s0038-092x(02)00121-4
- [14] L. Laiti, D. Andreis, F. Zottele, L. Giovannini, L. Panziera, G. Toller y D. Zardi, “A Solar Atlas for the Trentino Region in the Alps: Quality Control of Surface Radiation Data”, *Energy Procedia*, vol. 59, pp. 336–343, 2014. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.386
- [15] P. E. Dias da Silva, E. Pereira, F. Martins y S. Pereira, “Quality Control of Solar Radiation Data within Sonda Network in Brazil: Preliminary results”, *Proceedings of the EuroSun 2014 Conference*, 2015. doi:10.18086/eurosun.2014.08.04
- [16] O. El Alani, H. Ghennioui, A. Ghennioui, Y.-M. Saint-Drenan, P. Blanc, N. Hanrieder y F.-E. Dahr, “A Visual Support of Standard Procedures for Solar Radiation Quality Control”, *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10, no. 3, pp. 401–414, Feb. 2021. doi:10.14710/ijred.2021.34806
- [17] M. Journée y C. Bertrand, “Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurement network”, *Solar Energy*, vol. 85, pp. 72-86, Ene. 2011. doi:10.1016/j.solener.2010.10.021
- [18] J. G. Sánchez-Montes y J. J. Flores-Prieto, “Evaluación del recurso solar en Jiutepec, Morelos, corrigiendo datos fuera de intervalo de una estación meteorológica automática”, en *ANES XLIII Semana Nacional de Energía Solar 2019*, Nayarit, Oct. 2019, pp. 252-257
- [19] F. I. Álvarez-Sánchez, “Evaluación del recurso solar para procesos industriales en zonas factibles de México”, tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, 2017.
- [20] M. S. Adaramola, “Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akure, Nigeria”, *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 38-44, Nov. 2012. doi:10.1016/j.renene.2012.04.005
- [21] J. Almorox, C. Hontoria y M. Benito, “Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain)”, *Applied Energy*, vol. 88, pp. 1703–1709, May. 2011. doi:10.1016/j.apenergy.2010.11.003

- [22] J. Almorox, M. Bocco y E. Willington, “Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina”, *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 382-387, Dic. 2013. doi:10.1016/j.renene.2013.05.033
- [23] CONAGUA, “Los últimos años”, en *Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México*, México, D.F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012, pp. 60-65. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3AsOUL4>
- [24] A. E. González-Cabrera, D. Riveros-Rosas, M. G. Valdés-Barrón, Bonifaz-Alfonzo, V. M. Velasco-Herrera, H. R. Estevez-Perez, y G. Carabali, “New reference solarimetric network for Mexico”, de *AIP Conference Proceedings*, 2018. doi:10.1063/1.5067192
- [25] D. Riveros-Rosas, C. A. Arancibia-Bulnes, R. Bonifaz, M. A. Medina, R. Peón y M. Valdes, “Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model”, *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 21-29, Mar. 2015. doi:10.1016/j.renene.2014.09.013
- [26] *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*, NMX-AA-166/1-SCFI-2013.
- [27] *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación - Parte I. Medición de variables meteorológicas*, World Meteorological Organization, 2018.
- [28] *Energía Solar - Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua- Método de Pruebas y Etiquetado*, NMX-ES-001-NORMEX-2005.
- [29] *Energía Solar - Evaluación Térmica de Sistemas Solares para Calentamiento de Agua- Método de Prueba*, NMX-ES-004-NORMEX-2010.
- [30] *Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones*, NMX-CH-140-IMNC-2002.
- [31] G. Huang, X. Li, C. Huang, S. Liu, Y. Ma y H. Chen, “Representativeness errors of point-scale ground-based solar radiation measurements in the validation of remote sensing products”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 181, pp. 198-206, Ago. 2016. doi:10.1016/j.rse.2016.04.001
- [32] F. Besharat, A. A. Dehghan y A. R. Faghieh, “Empirical models for estimating global solar radiation : A review and case study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 798-821, May. 2013. doi:10.1016/j.rser.2012.12.043

- [33] W. Yao, Z. Li, Y. Wang, F. Jiang y L. Hu, “Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China”, *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 597-612, Ago. 2014. doi:10.1016/j.enconman.2014.04.017
- [34] M. S. Okundamiya, J. O. Emagbetere, and E. A. Ogunjor, «Evaluation of various global solar radiation models for Nigeria”, *International Journal of Green Energy*, vol. 13, no. 5, pp. 505-512, Ene. 2015. doi:10.1080/15435075.2014.968921
- [35] M. Gong y S. Ding, “Daily solar irradiance in Daily useful energy of Domestic solar water heater”, de *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 81, p. 012160, Ago. 2017. doi:10.1088/1755-1315/81/1/012160
- [36] L. Yuwu, C. Linlin, Y. Dandand, L. Huakaia, L. Leia, Y. Shifeng, T. Lianguang y S. Yuquan, “The effect of measurement uncertainty and environment on domestic solar water heating systems’ energy efficiency grades”, *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 371-378, May. 2015. doi:10.1016/j.egypro.2015.02.137
- [37] A. Gautam, S. Chamoli, A. Kumar y S. Singh, “A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 541–562, Feb. 2017. doi:10.1016/j.rser.2016.09.104
- [38] F. Álvarez-Sánchez, J. Flores-Prieto y O. García-Valladares, “Annual Thermal Performance of an Industrial Hybrid Direct–Indirect Solar Air Heating System for Drying Applications in Morelos–México”, *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5417, Ago. 2021. doi:10.3390/en14175417
- [39] D. Chiaroni, M. Chiesa, V. Chiesa, S. Franzò, F. Frattini y G. Toletti, “Introducing a new perspective for the economic evaluation of industrial energy efficiency technologies: An empirical analysis in Italy”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 15, pp. 1-10, Jun. 2016. doi:10.1016/j.seta.2016.02.004
- [40] CONAGUA, “Sistema Meteorológico Nacional”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3dZRuRt>
- [41] F. N. González-Ramírez, S. Messina, D. Riveros-Rosas, A. E. González Cabrera y C. E. Saldaña Durán, “Evaluación del recurso solar en Tepic, Nayarit, México a través de la red solarimétrica mexicana”, en *ANES XLIII Semana Nacional de Energía Solar 2019*, Nayarit, Oct. 2019.
- [42] SEMARNAT, “Atlas Digital Geográfico”, [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3pLyw3s>
- [43] I. Cedar Lake Ventures, “Clima promedio en Xochitepec”, *Weather Spark*. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3wzn2E4>

- [44] W. N. Venables y D. M. Smith, *An Introduction to R*, R Core Team, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3TngTET>
- [45] Mathworks, *Curve Fitting Toolbox*, Mathworks, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3QSmXmY>
- [46] J. G. Sánchez-Montes, “Diseño de una habitación climatizada con cero energías convencionales, considerando enfoque adaptativo”, tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, 2021.
- [47] INEGI, “PIB por Entidad Federativa (PIBE)”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2013/>
- [48] SENER, “Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2021 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3AQ9GWm>
- [49] CRE, “Precios máximos vigentes del 12 al 18 junio de 2022”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3R6NzAE>