



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN  
DE LLUVIA CON IMÁGENES DE SATÉLITE,  
UTILIZANDO DATOS DE ESTACIONES  
CLIMATOLÓGICAS, PARA LA REGIÓN  
HIDROLÓGICA NÚMERO 30 DE MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA :

**JORGE EDUARDO VELÁZQUEZ  
SUÁREZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. FERNANDO J. GONZÁLEZ VILLARREAL**

**MÉXICO 2014**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/57/2014

Señor  
**JORGE EDUARDO VELAZQUEZ SUÁREZ**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. FERNANDO JORGE GONZÁLEZ VILLARREAL que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

**"CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA CON IMÁGENES DE SATÉLITE,  
UTILIZANDO DATOS DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS, PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA  
NÚMERO 30 DE MÉXICO"**

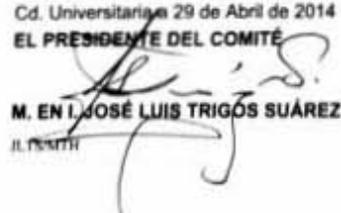
**INTRODUCCIÓN**

- I. EL CICLO HIDROLÓGICO**
  - II. MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN**
  - III. CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROCLIMATOLÓGICOS**
  - IV. CASO DE APLICACIÓN**
  - V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria 29 de Abril de 2014  
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

  
**M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGÓS SUÁREZ**  
IL. TRIGOS

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de estudiar en la mejor universidad de México, a la cual estaré agradecido toda mi vida.

Agradezco a mis padres Luis Velázquez y María de Lourdes Suárez que me motivaron a lo largo de toda mi carrera, me apoyaron en todos mis proyectos, confiaron en mí, y sobre todo por el gran ejemplo que me han dado durante toda mi vida que me ha motivado a ser una mejor persona, trabajadora y con excelentes principios. Justo como ellos.

Agradezco a mis hermanos Luis Velázquez y Enrique Velázquez, por su apoyo incondicional y por su ejemplo diario de dedicación y trabajo el cual me motivo día a día a terminar mis estudios y este trabajo

A mi director de tesis el Dr. Fernando Jorge González Villarreal que me animó a escribir este trabajo y me dio todo su apoyo.

Al M.I. Juan Javier Carillo Sosa, por motivarme y por creer en este proyecto desde el principio.

Al M.I. Jorge Luis Reyes Hernández que todos los días me motivaba diciéndome que estaba a punto de acabar la tesis, sin que así fuera, y apoyándome todos los días hasta el final.

Al M.I. Guillermo Enrique Ortega Gil y a la empresa SIMETH por la elaboración del software del modelo denominado “Hidroestimador” que fue la base para la elaboración de este proyecto.

Al M.I. Vitali Díaz Mercado por empezar conmigo este proyecto, por su paciencia y por motivarme a terminar el trabajo desde el principio.

Y quisiera agradecer a todos mis compañeros y amigos que me acompañaron a lo largo de toda la carrera que con su ayuda, motivación y desveladas hicieron de mi carrera universitaria una experiencia de vida. En particular a Mauricio, Aldo, Enrique, Erik y Ángel que hicieron de la carrera mas divertida. De igual manera a Adriana por motivarme todos los días a terminar este trabajo lo antes posible.

Gracias a todos  
Jorge Eduardo Velázquez Suárez

## **INDICE**

<b>GLOSARIO.....</b>	<b>10</b>
<b>Resumen. ....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>Objetivo.....</b>	<b>14</b>
<b>Objetivos específicos. ....</b>	<b>14</b>
<b>1 EL CICLO HIDROLÓGICO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 La precipitación .....</b>	<b>17</b>
1.1.1 Precipitaciones Convectivas .....	18
1.1.2 Precipitaciones Orográficas.....	19
1.1.3 Precipitaciones Ciclónicas o frontales.....	20
<b>2 MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Medición de la precipitación.....</b>	<b>21</b>
2.1.1 Pluviómetros y Pluviógrafos .....	22
2.1.2 Estaciones climatológicas.....	24
2.1.3 Intensidad de la precipitación: Hietograma y curva de lluvia acumulada o curva masa de la precipitación.....	25
<b>2.2 Estimación de la magnitud de la precipitación .....</b>	<b>27</b>
2.2.1 Estimación por medio de radar meteorológico.....	28
2.2.2 Estimación por medio de satélite meteorológico.....	28
<b>3 CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROCLIMATOLÓGICOS .....</b>	<b>43</b>

<b>3.1</b>	<b>Análisis de Sensibilidad en Modelos.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Criterios de Eficiencia .....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Coeficiente de determinación $r^2$ .....	45
3.2.2	Coeficiente de eficiencia (COE).....	46
<b>3.3</b>	<b>Error absoluto y error relativo de un número aproximado.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Error cuadrático Medio (ECM) .....</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>CASO DE APLICACIÓN.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Zona de Estudio .....</b>	<b>49</b>
4.1.1	Localización .....	49
4.1.2	Fisiografía.....	50
4.1.3	Clima local .....	50
<b>4.2</b>	<b>Datos.....</b>	<b>51</b>
4.2.1	Información climatológica.....	51
<b>4.3</b>	<b>Diseño de la Metodología .....</b>	<b>57</b>
4.3.1	Descripción.....	57
<b>4.4</b>	<b>Ejemplo de aplicación.....</b>	<b>57</b>
4.4.1	Regionalización .....	58
4.4.2	Elección de las lluvias de acuerdo a su comportamiento temporal .....	62
4.4.3	Calibración con estaciones convencionales.....	66
4.4.4	Aplicación del Coeficiente de determinación ( $r^2$ ).....	73

4.4.5	Disponibilidad de la información de temperaturas de las imágenes de satélite.....	74
4.4.6	Disponibilidad de la información de lluvias horarias y diarias .....	75
4.4.7	Información para la calibración horaria y diaria .....	75
4.4.8	Calibración de los parámetros, resultados preliminares .....	78
4.4.9	Análisis de sensibilidad .....	83
4.4.10	Aplicación del Coeficiente de eficiencia (COE) .....	95
4.4.11	Aplicación del método de la curva masa de precipitación. ....	96
4.4.12	Ajuste del modelo utilizando estaciones climatológicas.....	100
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>		<b>105</b>
<b>Bibliografía.....</b>		<b>108</b>

## GLOSARIO

<i>CFE</i>	Comisión Federal de Electricidad
<i>CONAGUA</i>	Comisión Nacional del Agua
<i>CV</i>	Coefficiente de Variación
<i>EC</i>	Error cuadrático
<i>EEUU</i>	Estados Unidos de América
<i>EMA</i>	Estación Meteorológica Automática
<i>EMC</i>	Estación Meteorológica Convencional
<i>ER</i>	Error Relativo
<i>ES-10-NP</i>	Earth Science in the national parks
<i>FF</i>	Frente frío
<i>GOES</i>	Geostationary Operational Environmental Satellite
<i>HE</i>	Hidroestimador
<i>ID</i>	Identificador
<i>IINGEN</i>	Instituto de Ingeniería de la UNAM
<i>IR</i>	Infrarrojo
<i>NOAA</i>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<i>OCFS</i>	Organismo de Cuenca Frontera Sur
<i>RH</i>	Región Hidrológica
<i>SEMARNAT</i>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<i>SMN</i>	Sistema Meteorológico Nacional
<i>UNAM</i>	Universidad Nacional Autónoma de México
<i>UNIATMOS</i>	Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM

## Resumen.

En este trabajo se presenta un método para la calibración de un modelo de estimación de lluvia del Instituto de Ingeniería UNAM denominado Hidroestimador el cual estima la precipitación en la región hidrológica número 30 de México llamada cuenca del Grijalva – Usumacinta, utilizando imágenes satelitales y estaciones climatológicas instaladas en campo que envían la información de manera constante. Para la calibración del modelo se hizo un análisis de la información que ofrecen las estaciones climatológicas instaladas en la región, una regionalización de la zona así como una selección de tormentas representativas divididas en tres periodos: ciclones, frentes fríos y estiaje; con los datos obtenidos se realizó una calibración del modelo utilizando un análisis de sensibilidad de los parámetros tomando como referencia coeficientes de determinación entre lo estimado y lo observado, se evaluó la eficiencia del modelo con el coeficiente de eficiencia de Nash. Al final se aplicaron los valores sensibilizados con mayor relación de  $r^2$  y se obtuvo un coeficiente de determinación de  $r^2=0.5$ , y un coeficiente de eficiencia de Nash del  $COE= 0.32$

## INTRODUCCIÓN

El sureste mexicano es conocido tanto por su diversidad cultural, sus paisajes, su flora y fauna, pero también por su precipitación, la cual es la más elevada en todo el territorio mexicano. Aunque en muchas culturas la precipitación siempre fue bien vista y se relaciona con la abundancia, en la planicie tabasqueña representa un problema de seguridad ya que estas producen inundaciones constantes perjudicando a la sociedad, provocando daños materiales y pérdidas humanas.

Las lluvias en esta región siempre se han presentado de la misma forma con pequeñas variaciones en su intensidad, por lo que es importante conocer su comportamiento y es necesario formular un plan de prevención contra los riesgos que esta ocasiona.

Generalmente las inundaciones más importantes en la región se deben al aumento de los niveles de los ríos a causa de la gran cantidad de agua que precipita y uno de los mayores riesgos son los asentamientos humanos en zonas naturales de inundación.

El conocer la magnitud y distribución espacial de la precipitación es un factor importante en la reducción de riesgos, al poder utilizar la información en modelos de lluvia-escurrimiento para la predicción de los niveles de los ríos. El problema actual radica que la distribución espacial de las lluvias está limitada a la cantidad y acomodo de las estaciones climatológicas terrestres y la red que estas conjuntan; al tener una red escasa, la información de la distribución de la precipitación será escasa. Dado que resulta imposible cubrir todo el territorio con estaciones climatológicas se ha optado por soluciones diferentes.

En el primer capítulo de este trabajo se habla del ciclo hidrológico, y cómo influye en la circulación del agua. Específicamente se abundó el tema de la precipitación, desde su formación hasta los diferentes tipos que se presentan en la región.

En el segundo capítulo se habla de la medición y estimación de la precipitación. La importancia que implica el conocimiento de la información, las dificultades en su instrumentación y medición, así como los nuevos retos que la estimación genera.

En el tercer capítulo se habla de las técnicas utilizadas para la calibración de modelos hidroclimatológicos. Las metodologías descritas en este capítulo fueron fundamentales en la calibración del modelo.

El capítulo cuarto habla del caso de aplicación partiendo de sus generalidades como su ubicación, población y clima, el diseño de la metodología y el ejemplo de aplicación relacionando las metodologías y teorías de los capítulos anteriores para generar un resultado.

#### *Objetivo*

Desarrollar una metodología para mejorar la calibración de un sistema de estimación de lluvia con imágenes satelitales utilizando datos de estaciones climatológicas, la cual sea capaz de obtener resultados en tiempo real.

#### *Objetivos específicos.*

- Analizar los datos de precipitación medidos por las estaciones climatológicas convencionales y automáticas de la CONAGUA y CFE, valorando la calidad de la información al compararlas unas con otras.
- Encontrar valores para los parámetros que mejoren los resultados del modelo.
- Generar un valor de lluvia estimado que tenga una mejor correlación con el valor de lluvia observado.

## 1 EL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra, Campos (2007) lo define como:

*“sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación”.*

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene principio ni fin, y su descripción puede empezar desde cualquier punto. Involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente. En la figura 1.1 se aprecia el ciclo gráficamente.

Para su explicación supondremos que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos, el vapor de agua resultante del proceso anterior es transportado por las masas de aire en movimiento (viento hacia los continentes). Bajo condiciones meteorológicas adecuadas el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales, a su vez, dan origen a las precipitaciones.

No toda la precipitación llega al terreno, ya que parte de esta se evapora durante su caída y otra es retenida (proceso llamado intercepción) por la vegetación, edificios carreteras, etc. y poco tiempo después, es retornada a la atmósfera en forma de vapor.

Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte se queda retenida en los huecos e irregularidades del terreno (proceso de almacenamiento) y en su mayoría vuelve a la atmósfera por evaporación.

Otra parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie (lluvia en exceso) y se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos, los cuales, posteriormente, desembocan en los ríos (Esguerrimiento superficial) que conducen las aguas a los lagos, embalses o mares, donde se evapora, o bien, se infiltra en el terreno.

Por último, hay una tercera parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno (proceso de infiltración) y va rellenando los poros y fisuras.

Si el agua infiltrada es abundante, una parte desciende hasta recargar el agua subterránea, en cambio, cuando el volumen infiltrado es escaso, el agua queda retenida en la zona no saturada o vadosa (humedad del suelo) de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o principalmente, por transpiración de las plantas. Como en la práctica es complicado separar los procesos anteriores, simplemente se le denomina evapotranspiración.

Bajo la influencia de la gravedad, tanto el esguerrimiento superficial como el agua subterránea se mueven hacia las zonas bajas y con el tiempo integran el esguerrimiento total de un río para fluir hacia los océanos.<sup>2</sup>

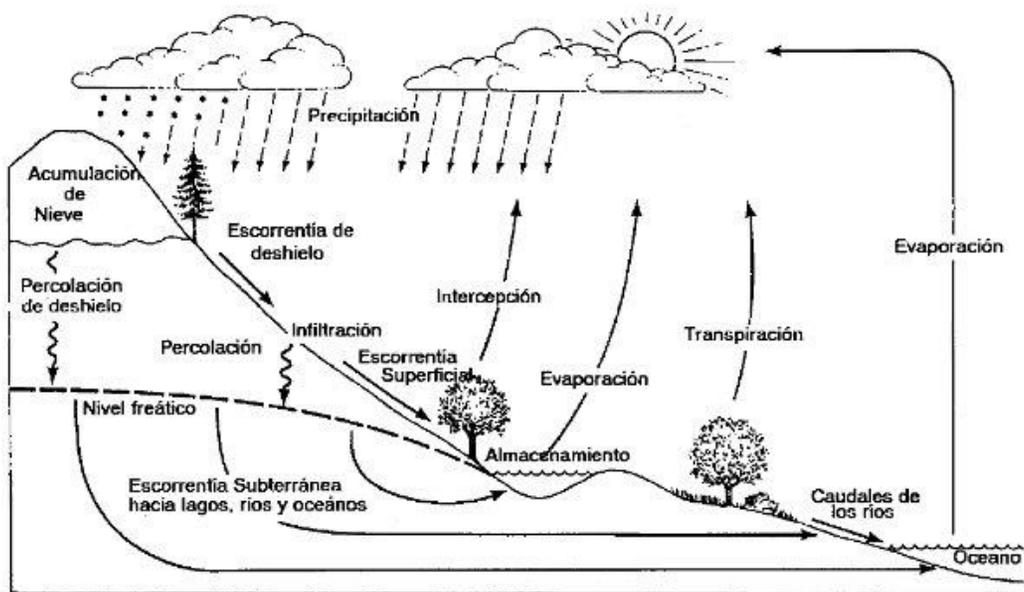


Figura 1.1 El ciclo hidrológico (Campos, 2007)

## 1.1 *La precipitación*

La precipitación es uno de los procesos más importantes en el planeta, ya que gracias a este se obtiene la mayoría del agua de la superficie terrestre, por lo cual nos concierne estudiar su comportamiento así como estimar ciertos fenómenos que a este incumbe.

Para que la precipitación se presente, se deben presentar nubes y para que estas se formen, el vapor de agua tiene que llegar a cierta temperatura y presión que den pie a la condensación, sin embargo, para una presión y temperatura dadas, siempre hay una cantidad de vapor de agua por unidad de volumen que puede existir sin condensarse, es decir, sin pasar a ser un líquido. Por lo tanto, cuando una masa de aire contiene esa cantidad máxima de vapor, se dice que está saturada y a la temperatura en ese preciso momento se le denomina *punto de rocío*.

Al momento de que esta masa de aire asciende, su presión va aumentando, lo que ocasiona una expansión, y al expandirse, según la ley de los gases, esta disminuye su temperatura; si la temperatura llega a descender lo suficiente hasta a alcanzar o rebasar el punto de rocío puede comenzar la condensación.

Claro está que si la temperatura solo llegara al punto de rocío podría comenzarse la condensación, sin embargo, para que la precipitación se presente es necesario el efecto de la gravedad. Esto quiere decir que cuando las pequeñas gotas de lluvia empiecen a formarse estas deberán unirse con otras pequeñas gotas para poder ganar peso (súper-saturación), ya que estas sólo caerán bajo la acción de la fuerza gravitatoria, estas durante su caída podrán crecer más en virtud de su coalescencia<sup>i</sup>.

También es de suma importancia la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera que se encuentra sobre algún lugar determinado, pero en especial la cantidad de lluvia que

---

<sup>i</sup> Virtud de dos partículas de lluvia a fusionarse al momento de colisionar por el efecto de gravedad

esa cantidad de vapor de agua puede generar. La masa total de vapor de agua existente en una columna de aire unitaria y a cierta altura se le conoce como *agua precipitable*.

La precipitación se puede clasificar, por su origen, en convectiva, ciclónica y orográfica.<sup>1,2</sup>

### 1.1.1 Precipitaciones Convectivas

Este tipo de precipitación se produce cuando el aire asciende por un aumento de temperatura a causa de un calentamiento local (ascensión convectiva).

El ascenso es natural; el gradiente adiabático<sup>ii</sup> de esta masa de aire es menor que el gradiente vertical medio de temperatura, por lo que el aire inestable asciende y se forman nubes de desarrollo vertical (cúmulos y cumulonimbos), como se ilustra en la figura 1.2, dando lugar a precipitaciones de tormenta y granizo. Este tipo de lluvias son propias de las regiones ecuatoriales y tropicales.<sup>12</sup>

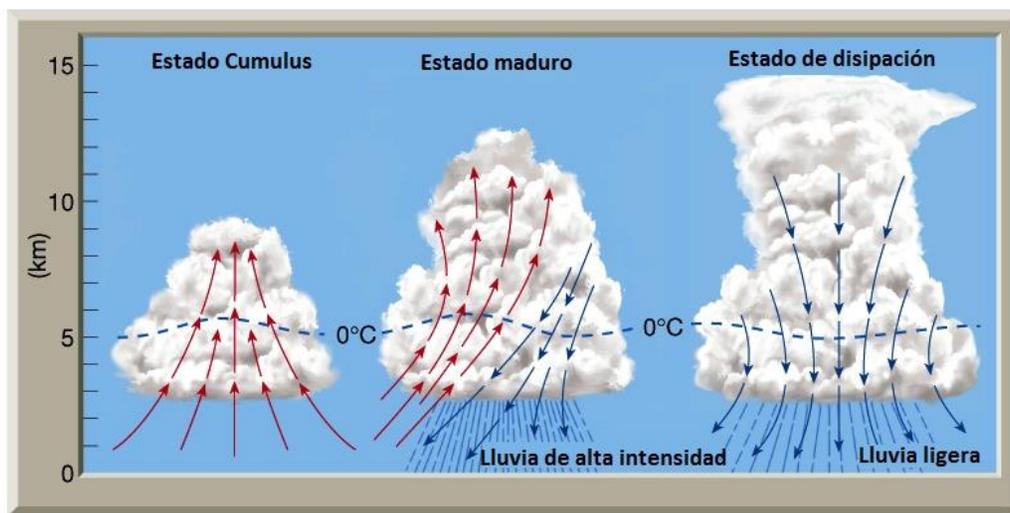


Figura 1.2 Esquema de Precipitaciones convectivas (NOAA)

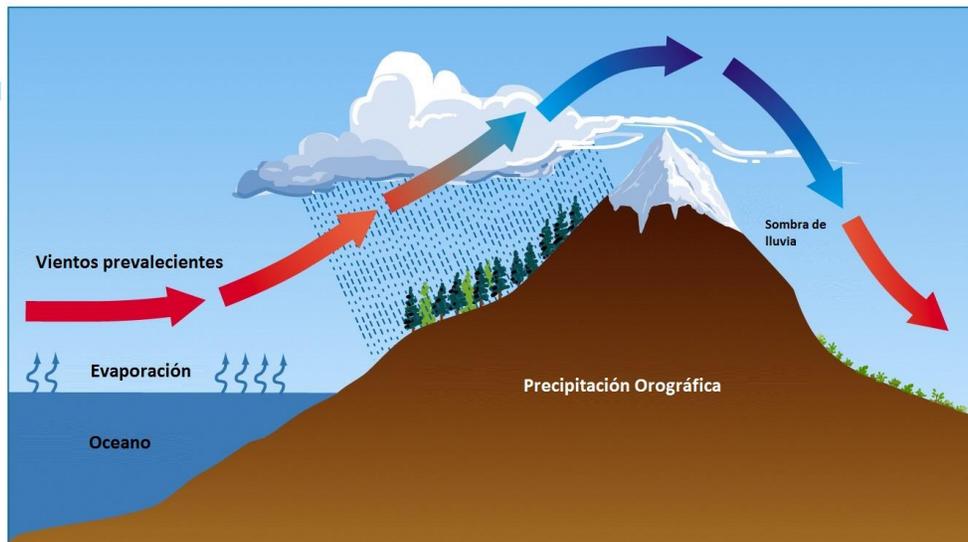
---

<sup>ii</sup> El gradiente adiabático es la variación de temperatura que experimentan las masas de aire en movimiento vertical

### 1.1.2 Precipitaciones Orográficas

Se producen cuando una masa de aire que se mueve horizontalmente se encuentra con una montaña y es obligada a ascender para salvarla (ascensión orográfica) por lo que el ascenso del aire es forzado.

En primer lugar se produce un ascenso adiabático por expansión, hasta que alcanza el nivel de condensación. Sigue un ascenso hidrodinámico formándose grandes nubes estratificadas (estratocúmulos) en la vertiente de barlovento<sup>iii</sup>, en el cual se producen las precipitaciones, como se observa en la figura 1.3. Cuando llega a la cumbre la masa de aire, ya desecada, comienza a descender por sotavento<sup>iv</sup> calentándose de nuevo por el gradiente adiabático seco con un viento descendente cálido y seco.<sup>12</sup>



*Figura 1.3 Esquema de precipitaciones orográficas (ES-IO-NP.2013)*

---

<sup>iii</sup> Barlovento: En contra de donde sopla el viento

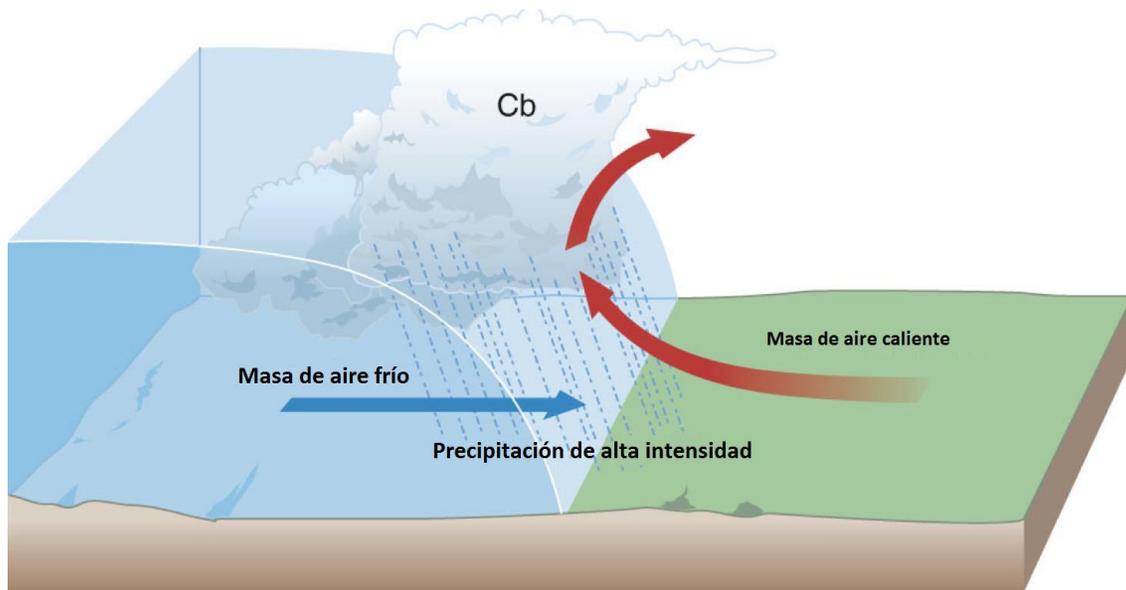
<sup>iv</sup> Sotavento: A favor de donde sopla el viento

### 1.1.3 Precipitaciones Ciclónicas o frontales

Estas se producen cuando dos masas de aire, de características diferentes, se ponen en contacto y el desplazamiento de una provoca la ascensión frontal de la otra. (Figura 1.4)

A lo largo del frente cálido y húmedo se eleva por encima del aire frío, engendrando nubes y lluvia; a lo largo del frente frío, las masas de aire cálido son levantadas por el impulso del aire frío, de lo que se siguen intensas lluvias y chubascos tormentosos separados por claros.

Las lluvias ciclónicas se producen precisamente, cuando se crea un remolino debido a diferencias de presiones y no debido a diferencias de temperaturas. Debido a este ciclón, el aire asciende y se enfría alcanzando el punto de rocío.<sup>12</sup>



*Figura 1.4 Esquema de precipitaciones por frente frío*

## 2 MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

### 2.1 *Medición de la precipitación*

La distribución espacio temporal de la lluvias es uno de los aspectos que más desconoce el hombre; la observación y medida de la precipitación es una condición indispensable para el avance y preservación de una sociedad moderna.

Actualmente se realizan medidas en miles de estaciones meteorológicas ubicadas sobre tierra firme, pero también sobre el mar y a distintas alturas de la atmósfera, tanto en posiciones fijas y como a lo largo de las rutas trazadas por barcos y aviones, aprovechando que todos ellos disponen de instrumentos meteorológicos abordo.

El uso que puede darse a la información que proporcionan todas estas fuentes de observación es muy variado: desde el mero registro temporal en estaciones concretas, a la elaboración de predicciones meteorológicas.

En cualquier caso, los centros meteorológicos centralizan la información por áreas, la procesan, controlan su calidad, y la distribuyen a los usuarios que pueden necesitarla para estudiar la atmósfera.

La precipitación se mide en milímetros de agua o litros caídos por unidad de superficie ( $m^2$ ). La cantidad de lluvia que cae en un lugar se mide por los pluviómetros o pluviógrafos; Esta equivale al agua que se acumularía en una superficie horizontal e impermeable durante el tiempo que dure la precipitación o sólo en una parte del periodo de la misma.<sup>10</sup>

### 2.1.1 Pluviómetros y Pluviógrafos

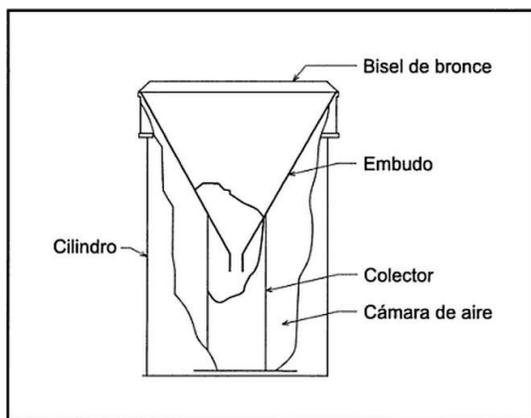
Los pluviómetros y pluviógrafos son instrumentos que se utilizan en casi todo el mundo para la medición de la precipitación. Con ligeras diferencias estos instrumentos han ayudado al hombre, a lo largo del tiempo, en la medición de este fenómeno meteorológico.

#### 2.1.1.1 Pluviómetros

Los pluviómetros son los primeros y los dispositivos más utilizados para la medición de la precipitación, estos consisten en un recipiente cilíndrico graduado al cual descarga un embudo con un área de captación mayor a la del cilindro receptor, como se ilustra en la figura 2.1.

Este dispositivo mide la lluvia de forma puntal, esto quiere decir que se mide el acumulado de lluvia a cierto tiempo. Normalmente se realiza la medición cada 12 o 24 horas, en México se acostumbra a tomar cada 24 hrs a las 08:00 hrs y esta consiste en una supervisión, encargada de dar mantenimiento y las lecturas del dispositivo.

La lluvia, se mide en “milímetros de lluvia”, por lo que se acostumbra a que el área de captación del embudo sea 10 veces mayor a la del cilindro receptor para que cada centímetro medido sea equivalente a 1 mm, lo que facilita la lectura a simple vista de hasta una décima de mm de lluvia.<sup>1</sup>



*Figura 2.1 Pluviómetro convencional*

### 2.1.1.2 Pluviógrafos

Los pluviógrafos son muy similares a los pluviómetros con la única diferencia que registran la precipitación de forma continua, esto se logra gracias a un flotador adecuado en el recipiente colector al cual se le adecua una plumilla que va marcando la altura de precipitación en un tambor giratorio, que utiliza un mecanismo de reloj el cual gira a velocidad constante el cual contiene un papel con un graduado especial. Generalmente estos dispositivos tienen un límite de almacenaje en el cilindro almacenador (10mm de lluvia) por lo que al llegar a este límite se vacía con un sifón, como se observa en la figura 2.2.<sup>1</sup>

Al registro obtenido por los pluviógrafos se le conoce como pluviograma.

Los pluviógrafos modernos utilizan circuitos electrónicos que registran los niveles y generan un archivo el cual es enviado en diferentes periodos de tiempo a las autoridades correspondientes.

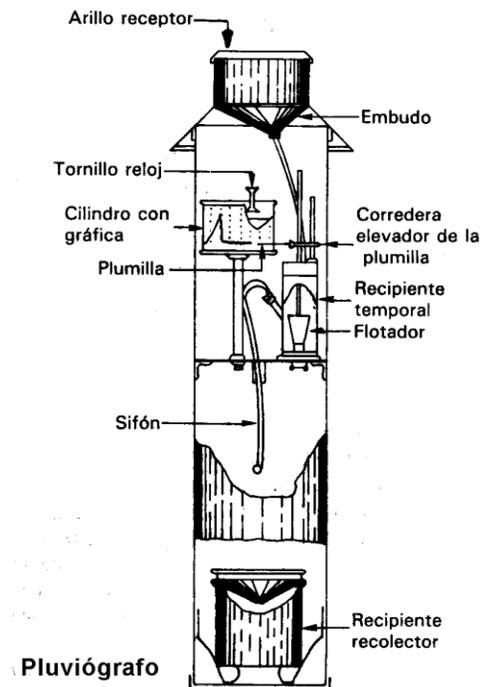


Figura 2.2 Pluviógrafo convencional (Aparicio)

### 2.1.2 Estaciones climatológicas

El disponer de datos meteorológicos es indispensable para una buena planificación en ingeniería. Para la obtención de estos datos se utilizan estaciones climatológicas las cuales miden los elementos o variables meteorológicos más importantes como son:

- La temperatura, humedad, viento, insolación, precipitación y evaporación.

Para que los datos obtenidos sean comparables alrededor del mundo las mediciones deben ser estandarizadas por lo que exige un cierto nivel de normalización en los instrumentos que estas contienen.

Los datos de precipitación son básicos en el desarrollo y administración de los recursos hidráulicos del país, así como también para la operación de las obras hidráulicas; Por su importancia, se exige cierta calidad en cuanto a su manejo y mantenimiento, ya que sin una buena operación los datos son inservibles.<sup>5</sup>

En nuestro país existen dos tipos de estaciones climatológicas: las Convencionales y las automáticas.<sup>4</sup>

#### 2.1.2.1 Estaciones Climatológicas Convencionales

Las estaciones climatológicas convencionales son áreas específicamente planeadas para la recolección de datos climatológicos, por lo que cuentan con varios instrumentos de medición como son:

- Una caseta o garita meteorológica, la cual es una estructura de medidas estandarizadas que sirve de protección para el termómetro de mercurio. Está orientada al norte en el hemisferio norte y al sur en el hemisferio sur. Se pinta de blanco y cuenta con ventilación para que las mediciones que se realicen con el termómetro sean a la sombra
- También cuenta con un evaporímetro que consta de un tanque estandarizado, un vaso estabilizador y un tornillo micrométrico para las mediciones correspondientes
- Se cuenta con un pluviómetro, una veleta (que nos indica la dirección del viento) y un anemómetro (magnitud cualitativa del viento).

Para obtener los datos registrados en este tipo de estaciones una persona tiene que presentarse y medir manualmente todos los días del año a las 8 de la mañana.<sup>4</sup>

#### 2.1.2.2 Estaciones Climatológicas Automáticas

Una estación meteorológica automática es una herramienta por la cual se obtienen datos climatológicos como temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, lluvia y otros, por medio de sensores electrónicos.

Las lecturas son acondicionadas para luego ser procesadas mediante micro-controladores o microprocesadores, y transmitidas a través de un sistema de comunicación en forma automática; este tipo de estación funciona de forma autónoma las 24 horas del día, y con un sistema de alimentación a través de energía solar o eólica.

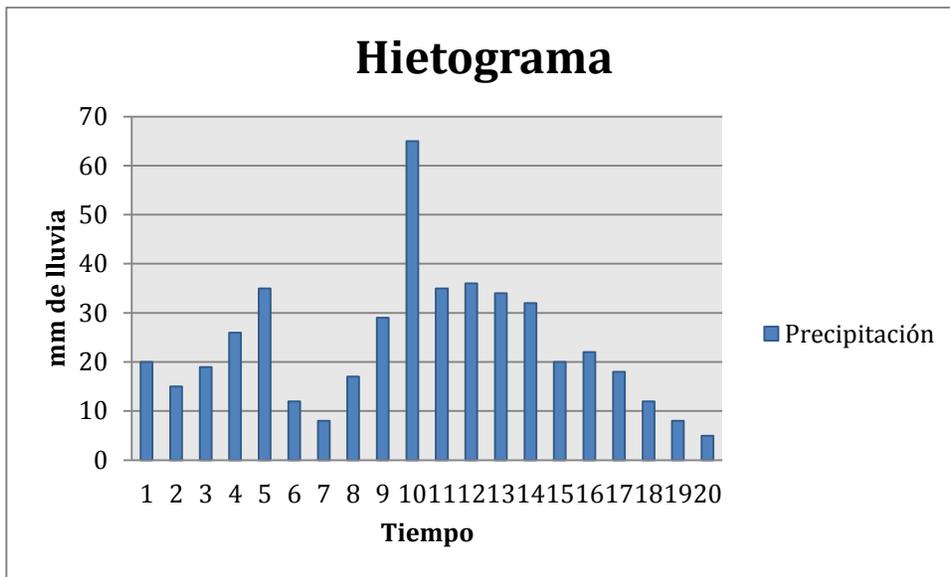
Actualmente se opta por la opción de la estación climatológica automática ya que nos brinda el recurso de autonomía por lo que es posible su instalación en zonas de poco acceso o inaccesibles por el hombre.<sup>6</sup>

#### 2.1.3 Intensidad de la precipitación: Hietograma y curva de lluvia acumulada o curva masa de la precipitación.

El fenómeno de la precipitación, se caracteriza por su variabilidad en espacio y tiempo. Ello obliga a la aplicación de métodos que permitan caracterizar las tormentas según su valor efectivo sobre una superficie y el espacio de tiempo en el que ocurren.

Las tormentas se definen por el volumen de agua precipitada  $P$  (mm) y la intensidad de lluvia o precipitación instantánea,  $i$  (mm/h). Desde el punto de vista hidrológico es importante considerar que un mismo volumen de agua caído durante una tormenta puede provocar distinta infiltración y escurrimiento en función de la intensidad de lluvia ocurrida durante la misma.

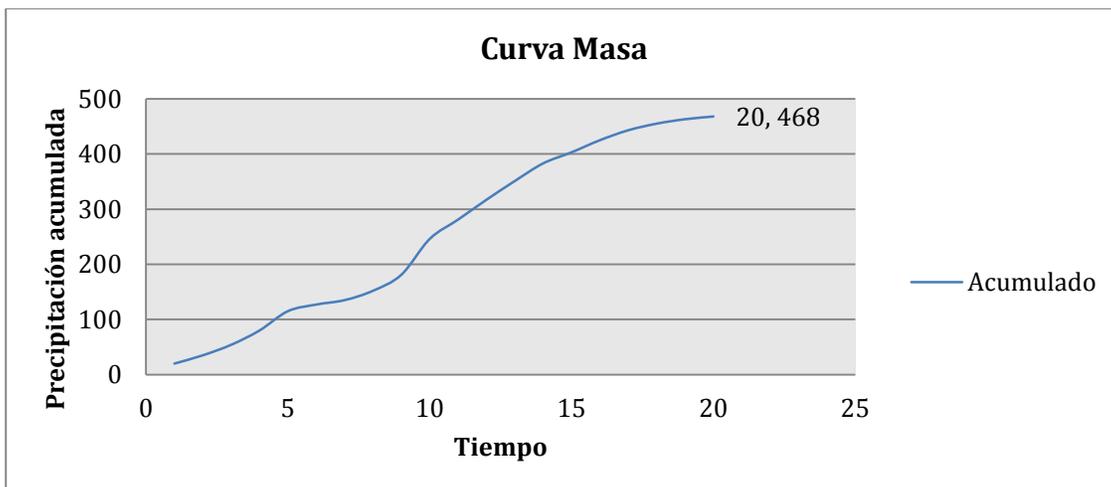
La gráfica de variación en el tiempo de la intensidad de lluvia se denomina hietograma (Figura 2.3) y por tratarse de una función discreta en el tiempo debe representarse mediante un diagrama de barras.<sup>19</sup>



*Figura 2.3 Ejemplo de hietograma*

La sumatoria de la lluvia caída hasta un momento dado desde el principio de la tormenta se denomina curva masa de precipitación y esta se representa con una línea continua. (Figura 2.4), esta curva no es decreciente, la pendiente en cualquier tiempo, es igual a la intensidad de la lluvia (altura de precipitación por unidad de tiempo) en ese instante.

$$i = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$



*Figura 2.4 Ejemplo de curva masa*

Dónde:

$i$  = Intensidad de la lluvia mm/h

$\Delta t$  = Incremento del tiempo en h.

$\Delta p$  = Incremento de lluvia en el intervalo  $\Delta t$  en mm.

## 2.2 Estimación de la magnitud de la precipitación

Teniendo en cuenta las limitaciones de los procesos de medición de la precipitación es necesario estimarla esto quiere decir que por medio de datos cuantitativos generar un dato de precipitación desconocido que sea confiable y preciso.

La distribución espacial y temporal de las precipitaciones a escala regional es necesaria para una variedad de usos científicos y aplicaciones sociales tales como estudios y diagnósticos climáticos, gestión del agua para la agricultura y la energía, mitigación de sequía, control de inundaciones, y pronóstico de los cultivos y eventos extremos.

Un aspecto común de un mal monitoreo hidrológico en los países en desarrollo es la baja densidad de las redes de pluviométricas, y en situaciones críticas como las sequías y los períodos de inundaciones, la falta de datos añade un desafío adicional a las instituciones encargadas de mitigar y controlar los daños y perjuicios y produce una disminución de la eficacia de las medidas tomadas.

En situaciones normales, la disponibilidad de información hidrológica puede ayudar a mejorar la productividad de la tierra, ya que permite una mejor gestión del mercado y las actividades productivas.

Por ello el disponer de información hidrológica cuenta como un activo valioso, pero la tarea de cuantificar la distribución de las lluvias se complica por el hecho de que en la actualidad no hay un método de estimación de la precipitación con buena cobertura y precisión.<sup>11</sup>

Existen varios métodos para la estimación de la precipitación como: el método de la media aritmética, el método de las isoyetas, el de polígonos de Thiessen, la estimación por medio

de radares y la estimación por medio de imágenes satelitales. En este trabajo se analizaron estos últimos dos.

### 2.2.1 Estimación por medio de radar meteorológico

El radar nos ofrece un panorama instantáneo de condiciones atmosféricas y de la precipitación en una zona muy amplia, evitando las interpolaciones que se deben utilizar al emplear utensilios de medición puntual como los pluviógrafos o pluviómetros.

Las medidas de la precipitación mediante el radar se abocan a la altura y a la intensidad de la precipitación.

Por lo que respecta a la altura de la precipitación, se toman fotografías que proyectan el área temporal que la produce; Aquí aparecen zonas luminosas de mayor o menor intensidad, de acuerdo con la variación de las intensidades del eco que se correlacionan con las precipitaciones acumuladas.

En lo referente a la intensidad de la precipitación, en las pantallas del radar meteorológico el eco de las gotas de lluvia es distinto del producido por otros obstáculos y gotitas de las nubes, por lo que éste puede ser interpretado como intensidad de la lluvia.

Los datos generados por el radar son de gran utilidad para el manejo de situaciones ocasionadas por fuertes precipitaciones. Por otro lado, representa un medio para efectuar medidas de precipitación en zonas inaccesibles.

Uno de los defectos del radar meteorológico es que se tiene que interpretar las atenuaciones del radar, si no hacemos una buena interpretación los resultados serán incorrectos.<sup>3, 5</sup>

### 2.2.2 Estimación por medio de satélite meteorológico

Gracias a este método de estimación se puede observar grandes formaciones de tormentas y sus extensiones, así como su distribución temporal; sin embargo, como cualquier estimación de precipitación, la información no es cuantitativa por lo que el error es muy común en este tipo de sistemas

La desventaja de este sistema de estimación es que no mide la lluvia, sino que su cuantificación requiere de la aplicación de un coeficiente de precipitación en base a la cantidad y tipo de nubosidad, la probabilidad de lluvia y su intensidad asociada a cada tipo de nube.

Uno de los mayores problemas que se presentan al interpretar observaciones de los satélites, es que con frecuencia no revelan las nubes que generan lluvia debido a que esas nubes están cubiertas por otras nubes o capas.<sup>5</sup>

#### 2.2.2.1 Información de las Imágenes GOES

El satélite GOES (por sus siglas en inglés Geostationary Operational Environmental Satellite), es un satélite meteorológico y una de la claves principales del programa estadounidense de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Los datos de imágenes y de sonda del GOES son continuos y proveen una corriente de información ambiental para soportar el pronóstico del tiempo, el seguimiento de tormentas severas, y para investigación de meteorología.

Este tipo de satélites están diseñados para operar en órbita geoestacionaria, esto quiere decir que permanecen estáticos de acuerdo a un punto sobre el suelo.

Este monitorea nubes, temperatura superficial y vapor de agua y sondea los perfiles de estructuras térmicas y de vapor. Así, sigue la evolución de fenómenos de la atmósfera, asegurando la cobertura en tiempo real para seguir eventos de corta vida, especialmente tormentas severas locales, ciclones tropicales o cualquier fenómeno que puedan afectar directamente la seguridad pública.

Este tipo de satélites son de observación pasiva, esto quiere decir que solo recibe radiación emitida por los objetos, mas no son emisores de radiación. Esto es típicamente echo vía diferentes “canales” o “bandas” del espectro electromagnético, en particular el visible y algunas porciones del infrarrojo. La tabla 2-1 nos muestra para los diferentes canales los tipos de onda y su longitud.<sup>16, 17</sup>

Tabla 2-1 CANALES DEL SATELITE GOES

Canal	Onda	Longitud de onda (um)
Canal 1	Visible	0.65
Canal 2	Onda corta infrarroja	3.90
Canal 3	Vapor de agua (WV)	6.50
Canal 4	Onda larga infrarroja	10.70
Canal 5	Infrarroja sensible WV	12.00
Canal 6	Temp. de bajo nivel	13.30

#### 2.2.2.1.1 Canal 3 (vapor de agua)

El vapor de agua compone entre 1-4% (en volumen) de la atmósfera terrestre, pero aun así juega un papel crítico en el balance energético de la tierra.

El vapor de agua absorbe y emite radiación electromagnética en diferentes bandas y longitudes de onda. Tal radiación infrarroja, emitida por la tierra y capturada por los satélites, es la base de la percepción remota del vapor de agua troposférico.

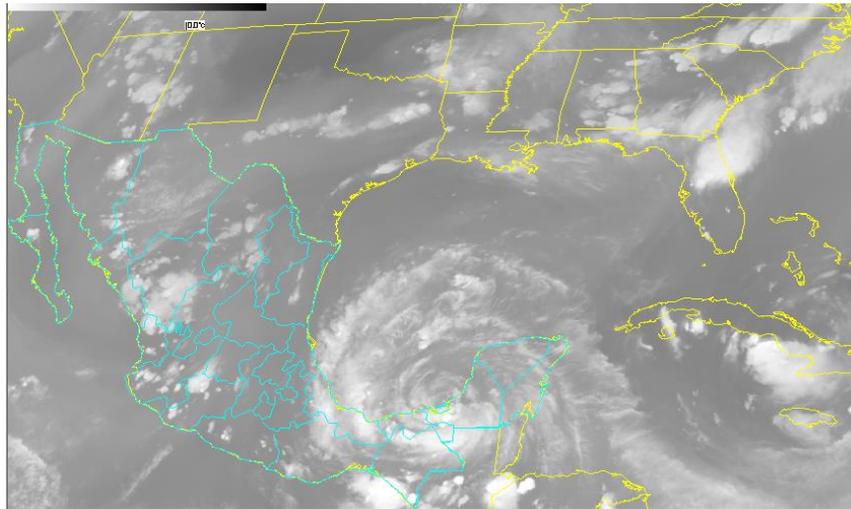
Los satélites meteorológicos incluyen escáneres radiométricos los cuales están diseñados para detectar radiación terrestre ascendente en longitudes de onda discretas.

Estos satélites cargan con 2 radiómetros diferentes pero el que nos interesa en este momento es el de imágenes. El radiómetro de imágenes tiene un canal para vapor de agua que es el número 3, el cual asigna a cada pixel una escala de gris dependiendo del brillo de la temperatura medida. Generalmente el blanco indica una temperatura muy fría (radiación

de una capa húmeda o alguna nube en la parte alta de la tropósfera) y el color negro una elevada (radiación de la tierra o alguna capa seca en la mitad de la tropósfera).

El canal 3 identifica contenido y advección<sup>v</sup> de humedad en niveles medios y movimiento atmosférico de niveles medios/altos. <sup>7</sup> El satélite tiene una resolución espacial de 4 km.

Una imagen generada por el satélite GOES 13 en su banda 3 de la república mexicana es representada en la figura 2.5.



*Figura 2.5 Imagen de la banda 3 del satélite GOES-13 (IINGEN, Huracán Ernesto 09/Agosto/2012)*

---

<sup>v</sup> Advección es la variación de un escalar en un punto dado por efecto de un campo vectorial

#### 2.2.2.1.2 Canal 4 (infrarrojo)

La información en imágenes del satélite GOES provee una gran variedad espectral de bandas que son muy útiles para medir o inferir condiciones meteorológicas en las nubes tales como: temperatura al tope de las nubes, reflectividad<sup>vi</sup> visible de las nubes y las fases de las nubes; el uso de los canales de infrarrojo de onda larga (IR) puede determinar la temperatura al tope de la nube y nos ayuda a diferenciar nubes de hielo delgado de nubes de lluvia.

El tener una actualización de los datos (en los satélites GOES de cada 15 min) y una resolución espacial moderada (4 km) ayuda en el monitoreo de tormentas importantes que puedan ocasionar daños materiales o humanos.

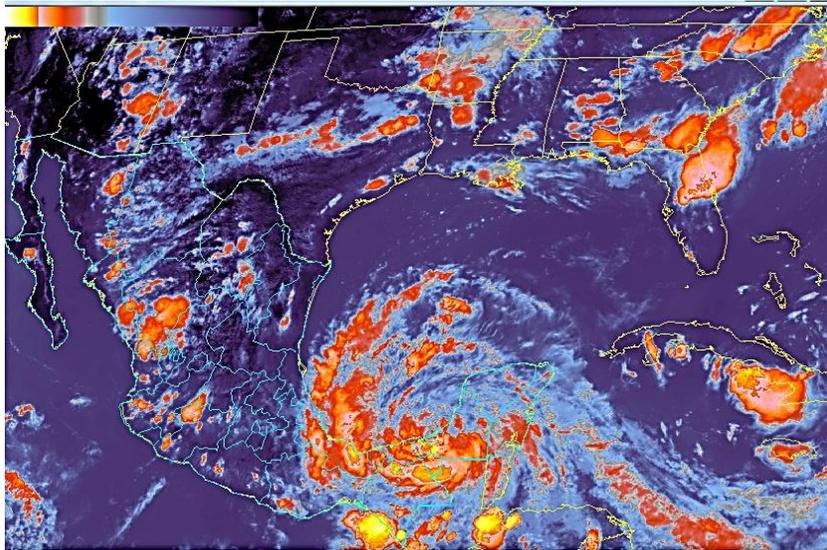
La principal debilidad de la técnica de percepción remota del infrarrojo de onda larga es la poca habilidad en la observación de las nubes súper enfriadas que son más oscuras que las nubes en altitudes más elevadas.

Aunque la técnica del infrarrojo de onda larga solo observa el tope de la nube, se ha visto que el agua líquida tiende a acumularse en el tope de las nubes estratificadas, haciendo la técnica de GOES muy efectiva en varias situaciones.

En este trabajo se utiliza las imágenes de la banda 4 para la obtención de la temperatura al tope de la nube por pixel.<sup>8</sup> La imagen generada por el satélite GOES 13 en su banda 4 de la república mexicana es representada en la figura 2.6

---

<sup>vi</sup> Reflectividad es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie



*Figura 2.6 Imagen de la banda 4 del satélite GOES-13 (IINGEN, Huracán Ernesto 09/Agosto/2012)*

#### 2.2.2.2 Método propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Hidroestimador)

El Instituto de Ingeniería (II) de la UNAM propuso un modelo de estimación utilizando imágenes satelitales, este modelo utiliza dos factores cuantitativos para poder estimar la lluvia en la región: La temperatura al tope de la nube y el vapor de agua en la nube.

El modelo propuesto empezó su funcionamiento a mitades del 2011 con el nombre de “Hidroestimador”, éste se aplicó en el cálculo de la láminas de lluvia en cuatro subcuencas del río de la Sierra (Tabasco, México), para tomar en cuenta la variabilidad de la lluvia se utilizó la información del satélite GOES 13 para estimar la precipitación en tiempo real, con base en un algoritmo para el cálculo de precipitaciones, a través de las imágenes de temperatura al tope de las nubes (canal 4 del GOES-13) y las imágenes de vapor de agua (canal 3 del mismo GOES-13).

El cálculo de la lluvia a partir de imágenes satelitales, tiene sus antecedentes desde el Analizador Interactivo para Inundaciones Repentinas (IFFA) del Servicio Nacional Informático de Satélites Ambientales de los EEUU, a finales de los años 70, hasta el desarrollo de un Hidroestimador por parte del mismo organismo.

Como parte de las tareas llevadas a cabo dentro del Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), está el desarrollo de un sistema Hidroestimador, el cual consta de tres partes (PHIT, 2011): estación receptora de imágenes GOES-13, software para la adquisición remota de datos de las estaciones hidrométricas instaladas en la cuenca del río Grijalva (Tabasco, México) y software para la estimación de la lluvia, realizado con base en el procedimiento de estimación de lluvia de la agencia Nacional para el Océano la Atmosfera de los EEUU (NOAA).

La finalidad de este sistema es el cálculo de las láminas de lluvia a tiempo real, con miras al desarrollo de un sistema de prevención temprana para la población de la región.<sup>15</sup>

### 2.2.2.3 Descripción del Hidroestimador

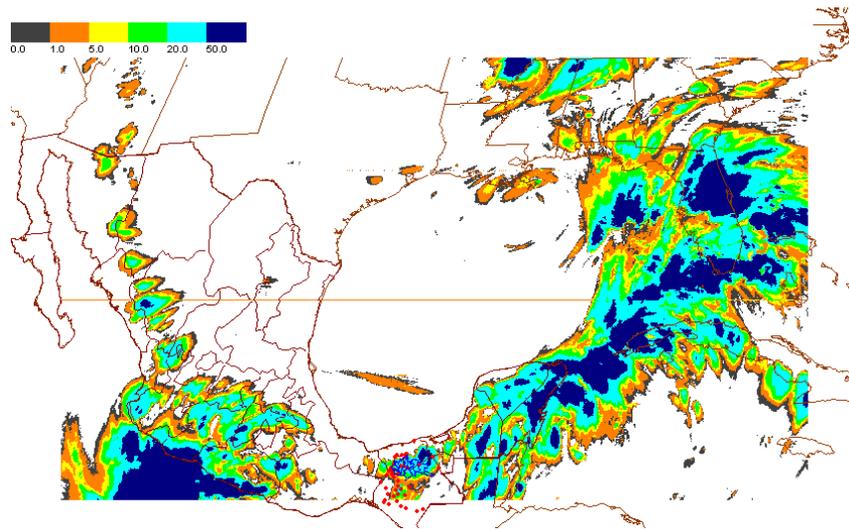
Podríamos dividir los procesos del Hidroestimador en dos etapas: la primera etapa es el manejo de las imágenes de satélite para la obtención de temperaturas al tope de la nube y las temperaturas de vapor de agua; y la segunda es la aplicación de un algoritmo para la obtención de la precipitación en base de las temperaturas obtenidas en la etapa 1.

El procesamiento de la información se realiza de manera continua y este empieza recolectando la información a cada 10 minutos en las estaciones hidroclimatológicas que se tienen instaladas en la cuencas de la región hidrológica número 30 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

De manera conjunta el satélite GOES envía de manera periódica (cada 15 min) imágenes de la banda 4 y banda 3, estas son procesadas por el algoritmo interno del Hidroestimador y como resultado obtenemos imágenes de temperatura al tope de la nube y el contenido de vapor de agua por pixel. Las imágenes son en realidad archivos matriciales que por medio de un visor pueden representarse los datos de  $T$  (temperatura al tope de la nube) y  $T_{VA}$  (temperatura de vapor de agua) como mapas. La información climatológica recibida se combina con la información del satélite ya procesada para ajustar los valores.

El algoritmo propio del Hidroestimador recibe la información de la red de estaciones y los datos procesados de temperaturas y vapor de agua, ordena la información, la procesa y,

como resultado, entrega distintos productos. Uno es la imagen del satélite interpretada para la lluvia (figura 2.7), otros productos son graficas continuas que muestran las lluvias más recientes indicadas sobre un mapa de la cuenca. También se obtienen tablas por estaciones o por lluvia media tanto registrada como estimada por el Hidroestimador.



*Figura 2.7 Imagen satelital interpretada por el Hidroestimador para lluvia*

Entre las ventajas del Hidroestimador se pueden mencionar la disponibilidad continua de la lluvia al momento, así como la correcta distribución espacial de la precipitación, ya que la imagen satelital procesada indica claramente la distribución de la lluvia sin necesidad de introducir los errores propios de las interpolaciones que contienen los análisis con datos puntuales.

El proceso anteriormente mencionado es representado en la figura 2.8.

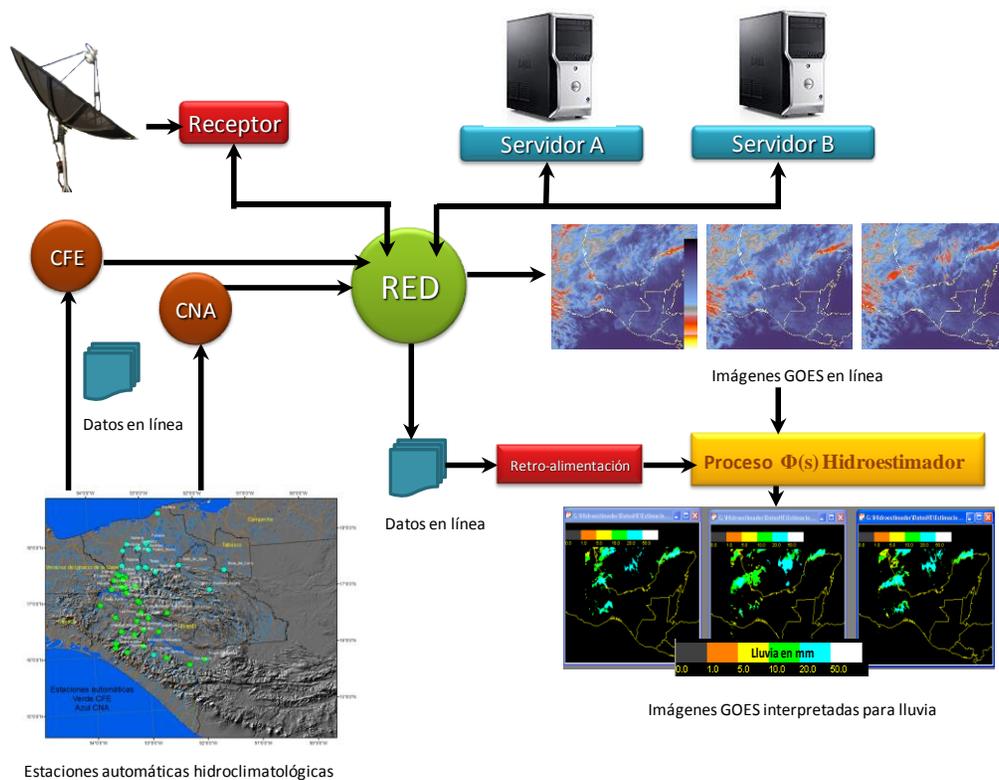


Figura 2.8 Funcionamiento del “Hidroestimador” del IINGEN(PHIT)

El procedimiento utilizado en la etapa 1, para la obtención de los valores matriciales de temperatura al tope de la nube y la temperatura de vapor de agua fueron obviados, por lo que el procedimiento no se tomó en cuenta.

Sin embargo el procedimiento de la etapa 2 fue el evaluado para la calibración del modelo tomando los datos de la etapa 1 con el siguiente método de cálculo:

El procedimiento para la estimación de la lluvia en cada pixel o celda, se describe en seguida:

- 1) Se analiza el archivo de temperatura al tope de la nube, para cada pixel  $i$  se observa la temperatura al tope de la nube (T):

$$\text{Si: } T \geq 250 K \rightarrow Pr_{c_{pixel}} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{Si: } T < 250 K \quad (2.2)$$

Entonces, se procede al paso 2:

- 2) Al cumplir la condición anterior, se calcula la fracción de lluvia convectiva ( $Prc_C$ ) y no convectiva ( $Prc_{NC}$ ) en cada pixel.

2.1 La lluvia convectiva se calcula en función de la temperatura al tope de la nube (T) con la ecuación:

$$Prc_C = ae^{-bT} \quad (2.3)$$

Donde:

$Prc_C$ : lluvia convectiva (mm),

$T$ : Temperatura al tope de la nube (K),

$a$  y  $b$ : parámetros del modelo de lluvia convectiva.

En el modelo actual se utilizan los parámetros “a y b” con los siguiente valores.

$$a = 1.182 \times 10^{13} \quad (2.4)$$

$$b = 1.283 \times 10^{-1} \quad (2.5)$$

2.2 La lluvia NO convectiva se calcula también en función de la temperatura al tope de la nube (T) con las ecuaciones:

$$Prc_{NC} = \alpha ae^{-bT} \quad (2.6)$$

$$Prc_{NC} \leq \beta \quad (2.7)$$

Donde:

$Prc_{NC}$ : lluvia no convectiva (mm),

$T$ : Temperatura al tope de la nube (K),

$\alpha$  y  $\beta$ : parámetros del modelo de lluvia no convectiva.

En el modelo actual se utilizan los parámetros “ $\alpha$  y  $\beta$ ” con los siguiente valores.

$$\begin{aligned} a &= 1.182 \times 10^{13} & \alpha &= 0.2 \\ b &= 1.283 \times 10^{-1} & \beta &= 12 \text{ mm} \end{aligned}$$

- 3) Se toma en cuenta los valores de la vecindad para tomar en cuenta el efecto convectivo y no convectivo.

3.1 Dependiendo de la temperatura se elige el área de la primera vecindad

$$\text{Si: } T \leq 200K \rightarrow \text{Vecindad} = 50 \text{ Pixeles}$$

$$\text{Si: } T > 200K \rightarrow \text{Vecindad} = 50 \text{ Pixeles}$$

Se obtienen la media ( $\mu_1$ ) y la desviación estándar ( $\sigma_1$ ) de las temperaturas de la vecindad para la obtención del valor  $z_1$  con la ecuación:

$$Z_1 = \frac{T - \mu_1}{\sigma_1} \quad (2.8)$$

Donde:

$z_1$ : Valor Normalizado de la vecindad 1,

$T$ : Temperatura al tope de la nube (K),

$\mu_1$ : Media de las temperaturas de la vecindad 1 (K),

$\sigma_1$ : Desviación estándar de las temperaturas de la vecindad 1 (K).

Dependiendo del valor  $z_1$  es la ecuación a utilizar para obtener el valor de la precipitación del pixel obtenido de la vecindad 1

$$\text{Si: } z_1 \leq 0 \rightarrow \text{Pr}c_1 = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{Si: } z_1 > 0 \rightarrow \text{Pr}c_1 = \frac{\text{Pr}c_C \cdot z_1^2 + \text{Pr}c_{NC} [1.5 - z_1]^2}{z_1^2 + [1.5 - z_1]^2} \quad (2.10)$$

Donde:

$z_1$ : Valor Normalizado de la vecindad 1,

$Prc_1$  : Precipitación del pixel obtenido de la vecindad 1 (mm),

$Prc_C$  : Precipitación convectiva (mm),

$Prc_{NC}$  : Precipitación no convectiva (mm).

3.2 Considerando que en tormentas convectivas hay más de un núcleo se repite el cálculo con otra vecindad, pero esta vez la vecindad será más pequeña, por lo que contará con solo 15 pixeles.

De igual manera se obtienen la media ( $\mu_2$ ) y la desviación estándar ( $\sigma_2$ ) de las temperaturas de la vecindad 2 para la obtención del valor  $z_2$  de ecuación:

$$z_2 = \frac{T - \mu_2}{\sigma_2} \quad (2.11)$$

Donde:

$z_2$ : Valor Normalizado de la vecindad 2,

$T$ : Temperatura al tope de la nube (K),

$\mu_2$ : Media de las temperaturas de la vecindad 2 (K),

$\sigma_2$ : Desviación estándar de las temperaturas de la vecindad 2 (K).

Dependiendo del valor  $z_2$  es la ecuación a utilizar para obtener el valor de la precipitación del pixel obtenido de la vecindad 2

$$\text{Si: } z_2 \leq 0 \rightarrow Prc_2 = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{Si: } z_2 > 0 \rightarrow Prc_2 = \frac{Prc_C \cdot z_2^2 + Prc_{NC} [1.5 - z_2]^2}{z_2^2 + [1.5 - z_2]^2} \quad (2.13)$$

- 4) Para la obtención de la precipitación del pixel, considerando el efecto de lluvias convectivas y no convectivas, se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si: } Prc_1 > 0 \text{ y } Prc_2 = 0 \rightarrow Prc_T = 0 \quad (2.14)$$

$$\text{Si: } Prc_1 = 0 \text{ y } Prc_2 > 0 \rightarrow Prc_T = Prc_2 \quad (2.15)$$

$$\text{Si: } Prc_1 > 0 \text{ y } Prc_2 > 0 \rightarrow Prc_T = \sqrt{Prc_1 \cdot Prc_2} \quad (2.16)$$

Donde:

$Prc_T$ : Precipitación en el pixel  $i$  obtenida de la temperatura al tope de la nube (mm),

$Prc_1$ : Precipitación del pixel obtenida de la vecindad 1 (mm),

$Prc_2$ : Precipitación del pixel obtenida de la vecindad 2 (mm).

5. Para la misma ubicación del pixel  $i$  se calcula el Agua Precipitable ( $AP$ ) en función de la temperatura de la imagen de Vapor de Agua ( $T_{VA}$ ), con la ecuación:

$$AP = cT_{VA} + d \quad (2.17)$$

$$AP \leq \gamma \quad (2.18)$$

$$Prc_{m\acute{a}x} = AP \quad (2.19)$$

Donde:

$Prc_{m\acute{a}x}$ : lluvia máxima precipitable (mm),

$AP$ : Agua precipitable (mm),

$T_{VA}$ : Temperatura de la imagen de Vapor de Agua (K),

$c, d$  y  $\gamma$ : Parámetros del modelo.

En el modelo actual los parámetros “ $c, d$  y  $\gamma$ ” son:

$$c = -0.303 \quad \gamma = 20 \text{ mm}$$

$$d = 78.4848$$

Finalmente para la estimación de la precipitación del pixel  $i$  ( $Prc_{pixeli}$ ), se compara la precipitación obtenida con la temperatura al tope de las nubes ( $Prc_T$ ) contra la obtenida de la imagen de vapor de agua ( $Prc_{máx}$ ), se elige la menor:

$$Prc_{pixel} = \min(Prc_T, Prc_{máx}) \quad (2.20)$$

Donde:

$Prc_{pixeli}$ : Precipitación estimada en el pixel  $i$ ,

$Prc_{máx}$ : Precipitación máxima en el pixel  $i$ ,

$Prc_T$ : Precipitación en el pixel  $i$  calculada con la temperatura al tope de la nube.

En resumen, se muestran en la tabla 2-2 los parámetros con los que el modelo está trabajando actualmente:

TABLA 2-2 VALORES DE LOS PARÁMETROS ACTUALES DEL MODELO DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA

No.	Parámetro	Valor	Gobierna el comportamiento
1	a	$1.182 \times 10^{13}$	lluvia convectiva
2	b	$1.283 \times 10^{-1}$	lluvia convectiva
3	c	-0.303	agua precipitable
4	d	78.4848	agua precipitable
5	$\alpha$	0.2	lluvia no convectiva
6	$\beta$	12 mm	lluvia no convectiva
7	$\gamma$	20 mm	agua precipitable



### 3 CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

Los problemas hidrológicos y climáticos, generalmente, se analizan a través del uso de modelos y estos pueden ser de tres tipos: determinísticos, paramétricos o estocásticos.

- 1) Un modelo completamente determinístico es aquel que se obtiene a través de las relaciones físicas y no requiere de datos experimentales para su aplicación.
- 2) Un modelo paramétrico puede ser considerado como un determinístico en el sentido de que una vez que se estiman los parámetros del modelo, éste siempre genera la misma salida a partir de la información de entrada; por otro lado, un modelo paramétrico y estocástico es aquel en el que los parámetros estimados dependen de los datos observados y aquellos cambiarán cuando los datos observados también lo hagan.
- 3) Un modelo estocástico es aquel en el cual las salidas son predecibles solamente en un sentido estadístico. En un modelo estocástico, el empleo repetido de un grupo dado de entradas del modelo genera salidas que no son las mismas pero siguen cierto modelo estadístico.

Antes de hacer inferencias de cualquier modelo es importante la estimación de sus parámetros. Cada estimador de un parámetro es una función de los valores de la muestra, los cuales son observaciones de una variable aleatoria. Así, el propio parámetro estimado es una variable aleatoria que tiene su propia distribución muestral.

Un estimador que se obtiene a partir de un grupo de valores puede considerarse como un valor observado de una variable aleatoria. Por lo cual, la bondad de un estimador puede ser juzgado a partir de su distribución.<sup>18</sup>

### 3.1 *Análisis de Sensibilidad en Modelos*

El objetivo del análisis de la sensibilidad consiste en valorar la influencia de cada parámetro del modelo en algún aspecto de la salida del mismo.

Si se parte de un modelo de la forma  $y=f(x, u, O)$  donde “y” es el vector de salida, “x” el de estados, “u” el de entradas y “O” el de parámetros.

Para efectuar este análisis hay que evaluar la respuesta elegida para un determinado rango de valores del parámetro. Este método presenta las ventajas de que se incluyen todos los aspectos de los modelos informáticos (ecuaciones y soluciones numéricas) y puede evaluarse siempre, sin que importe la complejidad de las ecuaciones matemáticas, tan sólo el tiempo que tarde en realizarse todas las simulaciones.

Aparte de mostrar la sensibilidad de la función, las curvas resultantes pueden ofrecer una indicación cualitativa de la desviación del sistema respecto a un coste cuadrático, ya que si la salida del modelo es lineal en los parámetros, la suma del cuadrado de los residuos será una función cuadrática, resultando una curva simétrica.

### 3.2 *Criterios de Eficiencia*

Hay muchísimas razones por las cuales se necesita evaluar el rendimiento de un modelo, una de ellas es para proveer a un modelo de estimación cuantitativo la habilidad de reproducir comportamientos históricos o futuros; Para proporcionar un medio para evaluar mejor en el enfoque de modelado a través del ajuste de valores de parámetros de modelo; Para comparar esfuerzos del modelo presente con resultados de estudios previos.

El proceso de evaluación del desempeño de un modelo hidrológico requiere que el hidrólogo pueda hacer, subjetivamente y/o objetivamente, estimaciones de la “cercanía” del comportamiento simulado del modelo con lo observado.

El acercamiento más fundamental para evaluar el rendimiento del modelo en términos del comportamiento es por la inspección visual de los hidrogramas o gráficas, estimados u observados.

En este enfoque, el hidrólogo puede formularse evaluaciones subjetivas del comportamiento del modelo que pueden ser relacionados con el comportamiento sistemático y dinámico del mismo.

Sin embargo, evaluaciones objetivas requieren el uso de una estimación matemática del error entre las variables hidrológicas estimadas y observadas, como puede ser los criterios de eficiencia.

Los criterios de eficiencia se definen como mediciones matemáticas de lo bien que las simulaciones de un modelo se ajusta a las observaciones disponibles.

En general, muchos criterios de eficiencia contienen una sumatoria del termino de error (la diferencia entre lo simulado y lo observado en cada paso) normalizado por la medida de la variabilidad de las observaciones.

Para evitar la cancelación de errores del signo opuesto, la suma de los errores absolutos o cuadrados es usada para los criterios de eficiencia. Como resultado, se hace un énfasis en los errores de mayor tamaño mientras que los pequeños tienden a ser ignorados.

Cuando asociamos errores con valores de simulación grandes, estos tienden a ser mayores que aquellos que asociamos con valores pequeños. Algunos intentos de calibración son destinados a minimizar este tipo de criterios, y para lograrlo ponen los valores altos a expensas del valor menor.

En este trabajo se abordaron dos coeficientes: El coeficiente de determinación y el coeficiente de eficiencia de Nash (COE).<sup>20</sup>

### 3.2.1 Coeficiente de determinación $r^2$

El coeficiente de determinación es definido como el cuadrado del valor del coeficiente de correlación de Pearson, de la siguiente manera.

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (3.1)$$

Donde:

O: Son los valores observados.

P: Son los valores predichos.

$r^2$  también puede ser expresada como el cuadrado del ratio entre la covarianza y la multiplicación de desviaciones estándar de los valores observados y predichos.

Por lo tanto estima las dispersiones combinadas contra la dispersión de las series observadas y estimadas.

El rango de  $r^2$  se encuentra entre 0 y 1 lo que describe que tanto de la dispersión observada es explicada por la predicción. Un valor de cero significa que no existe correlación alguna mientras que el valor de 1 significa que la dispersión de las predicciones es igual a las series observadas.

El hecho de que solo la dispersión es cuantificada es uno de los inconvenientes de la  $r^2$  si esta se considera sola. Un modelo que sobre o subestime sistemáticamente todo el tiempo seguirá dando resultados buenos de  $r^2$  muy cercanos a 1 aunque todas las predicciones estuvieran mal.

Si  $r^2$  es usado para la validación de un modelo es además aconsejable tener en cuenta información adicional que le pueda hacer frente con ese problema.

Dicha información es prevista por el gradiente “b” y la intercepción “a” de la regresión en la cual  $r^2$  es basado.<sup>20</sup>

### 3.2.2 Coeficiente de eficiencia (COE)

El coeficiente de eficiencia (COE) propuesto por Nash and Sutcliffe (1970) es definido como uno menos la suma del absoluto de las diferencias cuadradas entre los valores normalizados de lo predicho y lo observado por la varianza de los valores observados durante el periodo de investigación. Y es calculada como:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.2)$$

El rango del COE se encuentra entre  $-\infty$  y 1 (ajuste perfecto).

Una eficiencia menor que cero indica que el valor medio en la serie de tiempo observada habría sido un mejor predictor que el modelo.

La mayor desventaja de la eficiencia de Nash es el hecho de que las diferencias entre los valores observados y los predichos se calculan como valores al cuadrado.

Como resultado valores mayores en una serie de tiempo se sobreestiman fuertemente mientras que los valores más bajos se descuidan. Para la cuantificación de las predicciones de escurrimientos, están llevando a una sobreestimación de los resultados del modelo en los caudales máximos y una subestimación durante condiciones de flujo bajo.

Similar al  $r^2$ , el COE no es muy sensible al modelo sistemático que sobre o subestima, especialmente en los periodos de bajo flujo.<sup>20</sup>

### 3.3 Error absoluto y error relativo de un número aproximado.

Al hacer una medición que representamos por un número decimal  $X_1$ , se comete algún tipo de error debido, entre otras causas a las siguientes:

- La representación decimal es finita y desprecia las restantes cifras decimales.
- Error procedente del apartado de medida. Error debido al observador

Si  $X_0$  es la medida exacta, entonces  $\Delta x = |X_1 - X_0|$  es el error cometido llamado error absoluto. Éste obviamente se desconoce (del contrario se conocería  $X_0$  y no habría error), por lo que en su lugar se trabaja con una cota del error absoluto “ $\varepsilon$ ” que satisface  $|X_1 - X_0| < \varepsilon$ . Para dar a conocer  $\varepsilon$ , la medida efectuada se representa por  $\varepsilon \pm X_1$ . Al valor  $\varepsilon$  en los aparatos de medición se le conoce como precisión del aparato.

A la expresión  $\frac{\Delta x}{X_0}$  se le denomina Error relativo pues mide la aproximación relativa con que se trabaja. Además, cuando se trabaja con magnitudes, el error relativo es un escalar por ser cociente de dos magnitudes iguales. Como obviamente se desconoce el error relativo, en su lugar se trabaja con una cota del error relativo  $\varepsilon_r = \left| \frac{\varepsilon}{X_1} \right|$  siendo  $X_1$  una medida por defecto de  $X_0$ . En el caso en que conozcamos una cota del error relativo cometido al expresar

aproximadamente el número  $X_0$ , entonces una cota del error relativo cometido al expresar aproximadamente el número  $X_0$ , entonces una cota del error absoluto es  $\varepsilon_a = X^2 \varepsilon_r$ , siendo  $X^2$  una medida por exceso de  $X_0$ .

No se debe pensar que existe contradicción alguna con el párrafo anterior, puesto que tratamos con valores aproximados, y en teoría de errores hemos de situarnos en la posición más desfavorable posible.<sup>21</sup>

### 3.4 Error cuadrático Medio (ECM)

Otro criterio razonable para escoger un determinado estimador de un parámetro  $\theta$  es tomar aquel que cometa, en promedio, el menor error en la estimación. Como, en principio, queremos penalizar igualmente los errores por defecto que por exceso podríamos establecer como cantidad a minimizar la esperanza de la diferencia entre el estadístico  $T$  y el parámetro  $\theta$  (en valor absoluto para impedir que los errores por defecto y por exceso se anulen mutuamente):

$$E[|T - \theta|] \quad (3.3)$$

Aunque este operador resulta razonable, presenta el inconveniente de que la función valor absoluto es complicada de manejar desde un punto de vista matemático. Por dicha razón suele utilizarse el error cuadrático medio (ECM) de un estimador  $T$ , definido como sigue:

$$E[(T - \theta)^2] \quad (3.4)$$

Una propiedad interesante del ECM es que puede descomponerse como la suma de dos componentes: la varianza del estimador más su sesgo al cuadrado:

$$E[(T - \theta)^2] = V(T) + \text{sesgo}^2(T) \quad (3.5)$$

Por tanto, en el caso de comparar diversos estimadores centrados de un parámetro  $\theta$ , el ECM coincidirá con sus varianzas. Con lo que el estimador con menor ECM coincidirá con el de menor varianza. Debe quedar claro, sin embargo, que el estimador con menor ECM no debe ser necesariamente centrado. De hecho, no siempre existirá el estimador con ECM mínimo. En realidad, si no nos restringimos a estimadores centrados, suele suceder que para unos determinados valores de  $\theta$  sea un estimador el que produzca un ECM menor, mientras que para otros valores de  $\theta$  sea otro estimador el que obtenga un ECM menor.

## 4 CASO DE APLICACIÓN

### 4.1 *Zona de Estudio*

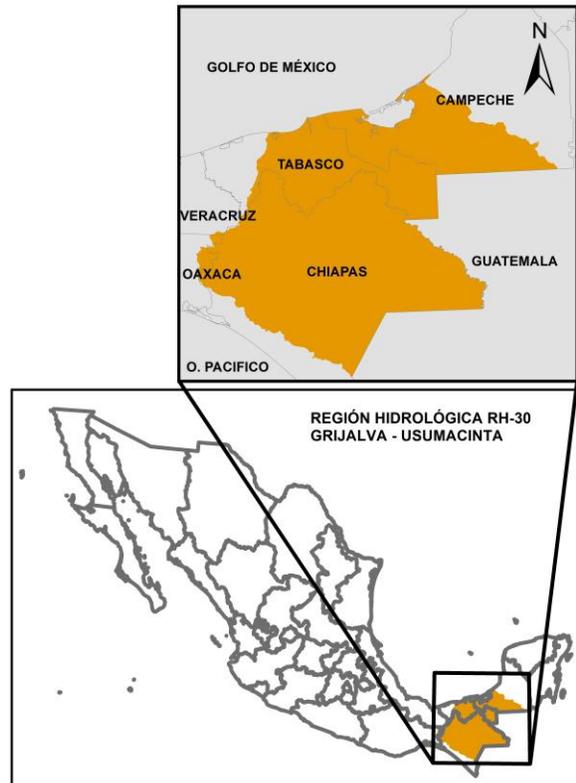
#### 4.1.1 Localización

La región hidrológica número 30, también conocida como la cuenca del Grijalva – Usumacinta, se localiza en el sureste de la República mexicana y administrativamente comprende los estados de Tabasco y Chiapas con pequeñas porciones de Campeche.

Su extensión territorial es de 91,345 km<sup>2</sup> y representa el 4.7% del territorio nacional.

Su población es de 4, 919,793 habitantes que corresponden solo el 5% de la población total de México, según los últimos datos del censo general de población y vivienda del año 2000. Esta se concentra especialmente en estuarios, como Tonalá-Coatzacoalcos y planicies de inundación del Bajo Grijalva, con densidades que duplican la media nacional.

Sus latitudes extremas son el norte los 18°39' latitud norte y al sur los 16°30' latitud norte, al extremo oriente se ubica en los 90°22' y al oeste en los 94°38' (figura 4.1).<sup>9</sup>



*Figura 4.1 Localización de la región hidrológica no. 30 (Samayoa)*

#### 4.1.2 Fisiografía

Su fisiografía es integrada por la Sierra madre de Chiapas o macizo cristalino y granítico de Chiapas al sur; la Sierra Norte de Chiapas al centro; los suaves lomeríos de la sierra de la lacandona y las sierras bajas del Petén guatemalteco al este y las llanuras costeras del golfo al norte, integran un variado mosaico de paisajes terrestres que descienden desde alturas superiores a los 4,000 msnm hasta el nivel del mar en el Golfo de México, favoreciendo la formación de ricos ecosistemas terrestres, costeros y marinos.<sup>9</sup>

#### 4.1.3 Clima local

La precipitación de la región es la mayor del país y una de las más altas del mundo. Su media anual es de 2,143 mm, 2.6 veces el promedio nacional. En la sierra de Chiapas y en

la Sierra de la lacandona, las lluvias sobrepasan en algunos lugares los 4,000 mm al año y llegan hasta los 5,000, mientras que en la zona costera del norte promedia 2,093 mm al año y alcanza los 2,750 mm.

La temperatura media anual es de 24 °C y de 7 a 41 °C en sus extremos, lo que establece un gradiente de climas cálidos y semicálidos húmedos con influencia marina en la zona norte y en la parte central de la región.

La invasión de masas de aire frío del norte y húmedos tropicales del atlántico y el pacífico provocan la mayoría de las precipitaciones anuales en la región. Lluvia prácticamente todo el año, el 83% de los 365 días, pero especialmente las lluvias se concentran en verano, otoño e invierno. Sólo la primavera es relativamente seca.

En el verano las lluvias son muy intensas. Entre el otoño y el invierno soplan los nortes, con lluvias prolongadas y torrenciales. Los ríos y lagunas alcanzan sus máximos niveles entre septiembre y noviembre, lo que vuelve a la planicie un espejo de agua.

En la época de inundaciones es cuando se provocan desastres en la agricultura y en las poblaciones asentadas en la llanura costera norte.

La conformación litológica de los márgenes de los ríos y de los suelos de aluvión, la sinuosidad de los cauces con abundantes meandros y las grandes descargas de sedimentos y materiales de las cuencas altas hacen de la planicie un área fácilmente erosionable y sujeta a las grandes inundaciones que se dan periódicamente en la llanura costera.<sup>9</sup>

## 4.2 Datos

### 4.2.1 Información climatológica

Como se dijo observar y medir el clima es de suma importancia y para la región hidrológica número 30 puede generar una prevención a siniestros climatológicos.

Para que la información climatológica sea confiable es necesario contar con equipo y personal bien calificado, esto quiere decir que la maquinaria o instrumentos a utilizar sean

manejados de una forma correcta y se les dé un buen mantenimiento; y que el personal reciba la capacitación adecuada para su operación.

Como se mencionó la información climatológica en México se hace por medio de las estaciones climatológicas ya sean convencionales o automáticas y la RH #30 no es la excepción.

La información climatológica necesaria es proporcionada en México por el sistema meteorológico nacional, él es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. El servicio meteorológico nacional, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT).

Los objetivos del sistema meteorológico nacional se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y sobre todo originar la pérdida de vidas humanas.

El Sistema Meteorológico Nacional (SMN) también realiza un acopio de la información climatológica nacional.

Este tiene como funciones principales el mantener informado al sistema de protección civil en caso de emergencia, difundir al público boletines y avisos de las condiciones del tiempo, proporcionar información meteorológica y climatológica entre otra funciones.

Para llevar a cabo sus objetivos el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con una red integrada con una extensa infraestructura: cuenta con 79 observatorios meteorológicos , cuyas funciones son las de observación y transmisión en tiempo real de la información y condiciones atmosféricas; consta de 16 estaciones de radio sondeo, cuya función es observar las capas altas de la atmósfera; También tiene 13 radares meteorológicos distribuidos en el territorio nacional; una estación terrena receptora de imágenes del satélite GOES-8.

El SMN difunde su información en forma de boletines o avisos especiales ya sea vía telefónica, fax, modem o internet, al Sistema Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, la Secretaria de la Defensa Nacional, la Secretaria de Marina, etc.<sup>13</sup>

#### 4.2.1.1 Información climatológica en la Región hidrológica Número 30

Para lograr un mejor aprovechamiento y preservación del agua en el país, la SEMARNAT, a través de la Comisión Nacional del Agua, desarrolla un proceso de cambio que promueve la participación de los usuarios y plantea un manejo del agua por cuencas hidrológicas, en lugar del que tradicionalmente se hacía por entidades federativas, ya que es precisamente en la cuenca donde el agua escurre y se distribuye de manera natural

Así se definieron 13 organismos de cuenca que incluyen a las 314 cuencas del país.

En la región de la cuenca Grijalva Usumacinta opera el Organismo de Cuenca Frontera Sur (Región XI), con sede en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, tiene como circunscripción 4 estados del Sureste de la República Mexicana, los cuales son; Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Campeche. De los cuales le corresponde a este Organismo de cuenca la atención de 132 municipios dentro de las regiones hidrológicas; Costa de Chiapas (23) y Grijalva-Usumacinta (30).<sup>14</sup>

El organismo de Cuenca Frontera Sur cuenta con una superficie de 103,480 km<sup>2</sup>, lo que representa un 5% del territorio nacional. El área de influencia del OCFS está distribuida de la siguiente manera:

73% correspondiente al estado de Chiapas

24% correspondiente al estado de Tabasco

2% correspondiente al estado de Oaxaca

1% correspondiente al estado de Campeche

En las cuencas de Grijalva – Usumacinta (RH#30) hay 54 estaciones meteorológicas automáticas (EMA) instaladas. En la Figura 4.2 se muestran las EMAS así como los rangos de la lluvia media anual en milímetros.

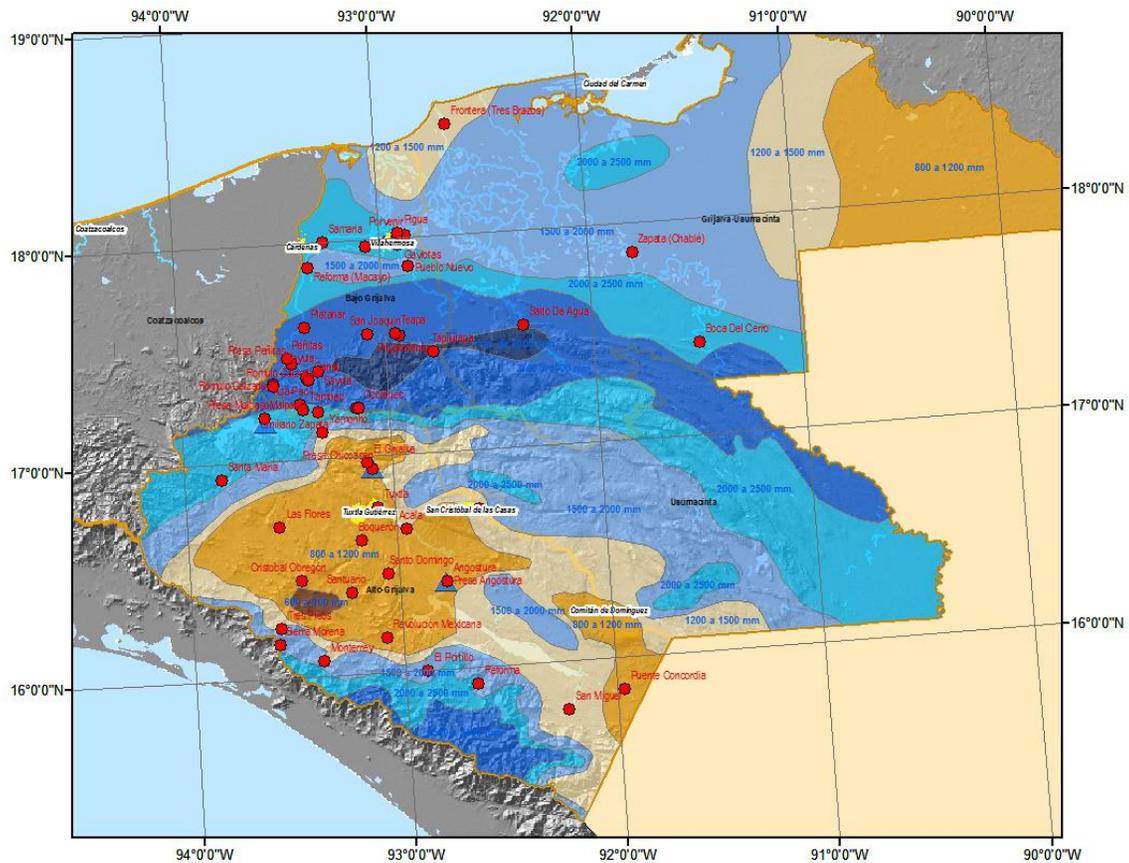


Figura 4.2 Estaciones meteorológicas automáticas de la región hidrológica #30 (PHIT)

En la tabla4-1 se muestran las estaciones meteorológicas automáticas con su identificador y su posición geográfica de la región hidrológica no. 30.

TABLA 4-1 ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS DE LA REGIÓN  
HIDROLÓGICA NO. 30

N°	Nombre	Longitud	Latitud	Identificación Estación
1	Tapijulapa	-92.77	17.47	TAB01
2	Puyacatengo	-92.93	17.55	TAB02
3	Teapa	-92.95	17.56	TAB03
4	San Joaquín	-93.09	17.56	TAB04
5	Porvenir	-92.88	18.01	TAB05
6	Samaria	-93.28	18	TAB06
7	Reforma (macayo)	-93.36	17.88	TAB07
8	Peñitas	-93.48	17.47	TAB08
9	Sayula	-93.33	17.4	TAB09
10	Muelle	-92.92	17.99	TAB10
11	González	-93.07	17.97	TAB11
12	Ocotepec	-93.15	17.23	TAB12
13	Rómulo calzada	-93.55	17.35	TAB13
14	Zapata (chablé)	-91.79	17.86	TAB14
15	El portillo	-92.9	15.99	TAB15
16	Gaviotas	-92.9	17.97	TAB16
17	Pueblo nuevo	-92.87	17.87	TAB17
18	Platanar	-93.38	17.61	TAB18
19	Boca del cerro	-91.49	17.43	TAB19
20	Salto de agua	-92.33	17.56	TAB20
21	Posta	-92.98	17.98	TAB21
22	Pigua	-92.91	18.02	TAB22
23	Frontera (tres brazos)	-92.65	18.51	TAB23
24	Acala (CFE)	-92.96	16.66	TAB24
25	Aza-pac (CFE)	-93.43	17.25	TAB25
26	Boquerón (CFE)	-93.17	16.62	TAB26

N°	Nombre	Longitud	Latitud	Identificación Estación
27	Canal (CFE)	-93.38	17.36	TAB27
28	Cristóbal obregón (CFE)	-93.47	16.44	TAB28
29	El Grijalva (CFE)	-93.12	16.97	TAB29
30	Emiliano zapata (CFE)	-93.34	17.22	TAB30
31	Juan Grijalva vaso inferior (CFE)	-93.39	17.38	TAB31
32	Juan Grijalva vaso superior (CFE)	-93.38	17.36	TAB32
33	Las flores (CFE)	-93.56	16.69	TAB33
34	Monterrey (CFE)	-93.38	16.07	TAB34
35	Ocoteppec (CFE)	-93.16	17.23	TAB35
36	Presa angostura (CFE)	-92.78	16.4	TAB36
37	Presa chicoasen (CFE)	-93.1	16.94	TAB37
38	Presa malpaso (CFE)	-93.6	17.2	TAB38
39	Presa penitas (CFE)	-93.46	17.45	TAB39
40	Puente concordia (CFE)	-91.97	15.85	TAB40
41	Reforma (CFE)	-92.66	15.92	TAB41
42	Revolución mexicana (CFE)	-93.08	16.16	TAB42
43	Rómulo calzada (CFE)	-93.55	17.35	TAB43
44	San Cristóbal de las Casas (CFE)	-92.6	16.73	TAB44
45	San miguel (CFE)	-92.24	15.78	TAB45
46	Santa maría (CFE)	-93.83	16.92	TAB46
47	Santo domingo (CFE)	-93.06	16.45	TAB47
48	Santuario (CFE)	-93.23	16.37	TAB48
49	Sayula (CFE)	-93.33	17.4	TAB49
50	Sierra Morena (CFE)	-93.59	16.15	TAB50
51	Tres Picos (CFE)	-93.58	16.23	TAB51
52	Tuxtla (CFE)	-93.09	16.76	TAB52

N°	Nombre	Longitud	Latitud	Identificación Estación
53	Tzimbac (CFE)	-93.41	17.23	TAB53
54	Yamonho (CFE)	-93.33	17.12	TAB54

### 4.3 *Diseño de la Metodología*

#### 4.3.1 Descripción

La calibración de un sistema como este involucra conocimientos matemáticos, geográficos, sociales, computacionales, así como el conocimiento del comportamiento de los fenómenos físicos que ocurren en nuestra atmósfera.

Al tratar de reproducir fenómenos físicos nos encontramos con la limitante de la incertidumbre, las probabilidades juegan un papel muy importante por lo que el saber aplicar sus conceptos y teorías nos dan un mejor panorama de que hacer.

#### 4.4 *Ejemplo de aplicación*

En esta investigación se calibró el modelo de estimación de lluvia con datos puntales, estos son los datos de las estaciones climatológicas automáticas y convencionales. Dado que el programa del Hidroestimador empezó a funcionar a mitades del 2011 con información cada 15 minutos, dificultó el trabajar con tantos datos al mismo tiempo, con lo que surgió la necesidad de hacer una depuración de los datos. Por lo que se aplicó un método para seleccionar la información para que los resultados fueran satisfactorios al área deseada.

El depurar la información no es suficiente se tiene que verificar que la información utilizada sea equivalente o representativa de toda la región; En nuestro país, es muy común los cambios drásticos en el clima por lo que hay que cuidar la zona de la calibración.

#### 4.4.1 Regionalización

La delimitación regional se ha sustentado en considerar áreas geográficamente continuas, límites políticos o administrativos. Sin embargo, si la variabilidad espacial de las características fisiográficas o hidrológicas es grande, la consideración de homogeneidad no se puede garantizar.

Con esta metodología no es necesario que una cuenca se encuentre dentro de un grupo que sea geográficamente contiguo. Estas regiones podría decirse, serán comunes respecto a sus series de datos en un espacio variable multidimensional antes que en el espacio geográfico, en este caso la precipitación.

El método a utilizar es el del coeficiente de variación (Cv) este consiste en dividir la desviación estándar de la serie de datos entre la media aritmética lo que nos indica la variabilidad del dato.

Este método fue aplicado a toda la república por el centro de ciencias de la atmosfera de la UNAM (UNIATMOS) el cual puede ser consultado a través de su Atlas Climatológico Nacional, el cual se encuentra en línea de manera gratuita.

La estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) obtenida del UNIATMOS, fue obtenida en forma de mapa (Figura 4.3), y de un archivo “.kmz”<sup>vii</sup>, el cual utilizando una escala de colores de los fríos (más bajos) a los cálidos (más altos) indica los valores del Cv.

Al observar la figura 4.3, se pueden observar posibles zonas de estudio y tomando en cuenta la orografía local, se identificaron 4 posibles regiones.

---

<sup>vii</sup> Los archivos con extensión “.kmz” son archivos XML georreferenciados en 3 dimensiones para ser manejado por Google Earth®.

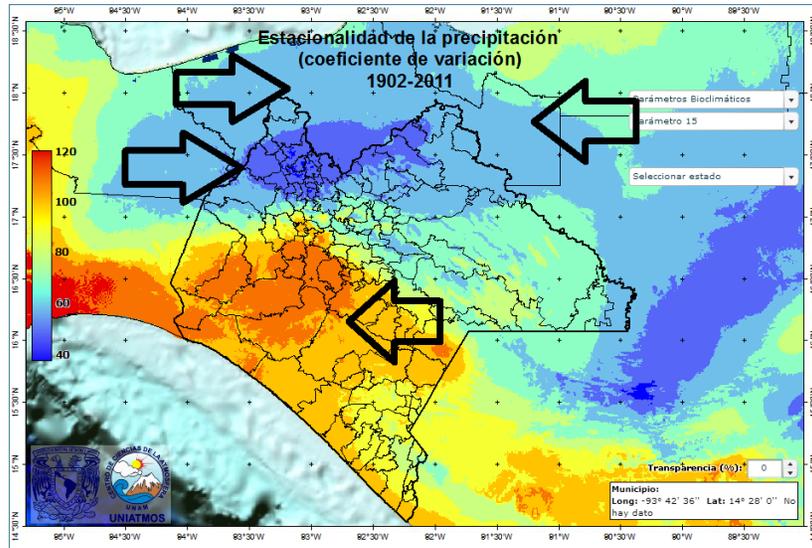


Figura 4.3 Visualizador del atlas climatológico nacional, estado de Chiapas, coeficiente de variación (UNIATMOS)

Al visualizar las 4 posibles zonas de estudio se montaron en Google Earth® los archivos “.kmz” del Coeficiente de variación y de las estaciones automáticas de la región. Se seleccionaron las regiones (figura 4.4) y los resultados se observan ordenados en las tablas 4-2 a la 4-5.

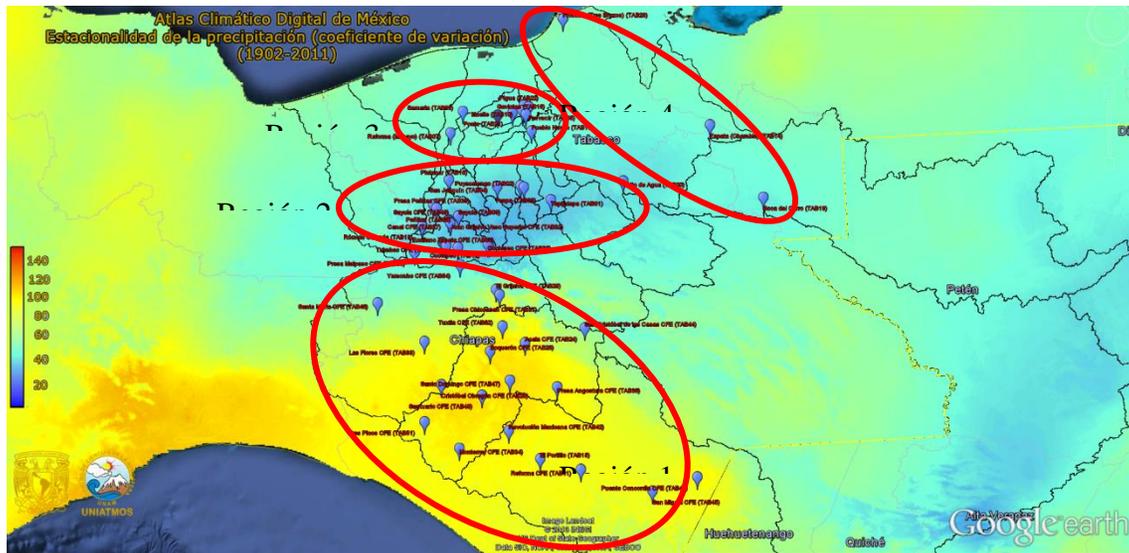


Figura 4.4 Regiones establecidas para la región hidrológica #30 (Google Earth®)

TABLA 4-2 CLAVES Y NOMBRE DE LAS ESTACIONES AGRUPADAS POR  
 REGIÓN (REGIÓN 1)

Clave	Nombre
TAB15	El Portillo
TAB24	Acala
TAB26	Boqueron
TAB28	Crsitobal Obregón
TAB29	El Grijalva
TAB33	Las Flores
TAB34	Monterrey
TAB36	Presa Angostura
TAB37	Presa Chicoasen
TAB38	Presa Malpaso
TAB40	Puente Concordia
TAB41	Reforma
TAB42	Revolución Mexicana
TAB44	San Cristóbal de las Casas
TAB45	San Miguel
TAB46	Santa María
TAB47	Santo Domingo
TAB48	Santuario
TAB50	Sierra Morena
TAB51	Tres Picos
TAB52	Tuxtla
TAB54	Yamoho

TABLA 4-3 CLAVES Y NOMBRE DE LAS ESTACIONES AGRUPADAS POR  
REGIÓN (REGIÓN 2)

Clave	Nombre
TAB01	Tapijulapa
TAB02	Puyacatengo
TAB03	Teapa
TAB04	San Joaquín
TAB08	Peñitas
TAB09	Sayula
TAB12	Ocoteppec
TAB13	Romulo Calzada
TAB18	Platanar
TAB20	Salto de Agua
TAB22	Pigua
TAB25	Aza-Pac
TAB27	Canal
TAB30	Emiliano Zapata
TAB31	Juan Grijalva Vaso Inferior
TAB32	Juan Grijalva Vaso Superior
TAB35	Ocoteppec
TAB39	Presa Peñitas
TAB43	Romulo Calzada
TAB49	Sayula
TAB53	Tzimbac

TABLA 4-4 CLAVES Y NOMBRE DE LAS ESTACIONES AGRUPADAS POR REGIÓN (REGIÓN 3)

Clave	Nombre
TAB05	Porvenir
TAB06	Samaria
TAB07	Reforma (Macayo)
TAB10	Muelle
TAB11	González
TAB16	Gaviotas
TAB17	Pueblo Nuevo
TAB21	Posta

TABLA 4-5 CLAVES Y NOMBRE DE LAS ESTACIONES AGRUPADAS POR REGIÓN (REGIÓN 4)

Clave	Nombre
TAB14	Zapata (Chamblé)
TAB19	Boca del Cerro
TAB23	Frontera (Tres Brazos)

Al estar la ciudad de Villahermosa dentro de la región número 2, se tomó la decisión de empezar la calibración para esta zona.

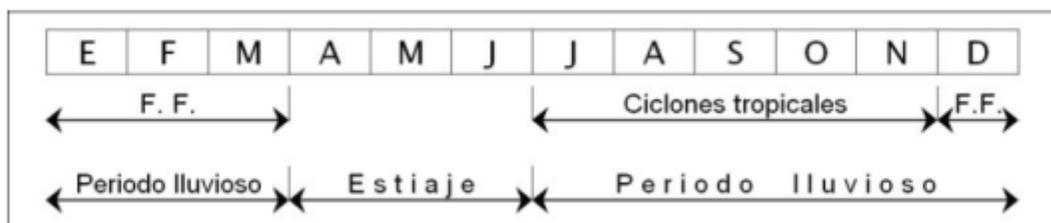
#### 4.4.2 Elección de las lluvias de acuerdo a su comportamiento temporal

Además de considerar la estacionalidad de las lluvias en la región, es de suma importancia el conocer el comportamiento de las lluvias en la región. El comportamiento de la precipitación depende de la zona geográfica donde se desarrolle, lo que significa que no tendremos el mismo comportamiento en el ecuador como en los trópicos.

En general, en la República Mexicana, se divide el comportamiento de la lluvia en dos temporadas, la temporada de lluvias y la de estiaje. Pero como se mencionó, las lluvias pueden ser ocasionadas por diferentes circunstancias, por lo que para esta investigación se dividirán en 3: periodo de lluvias ocasionadas por ciclones tropicales, periodo de lluvias

ocasionadas por frentes fríos (FF) y la temporada de estiaje. Por lo que la calibración debería ser diferente para cada periodo.

En la región sur del país el comportamiento de las lluvias se desarrolla como se indica en la figura 4.5, donde se expresan las iniciales de los meses en la parte superior y los periodos en la inferior.



*Figura 4.5 Comportamiento temporal de la precipitación en la región hidrológica # 30*

Para hacer una calibración representativa de cada periodo, fue necesario tomar tanto lluvias normales como extraordinarias para localizar los alcances o limitantes del modelo. También debido a que el comportamiento de la lluvia es diferente en cada periodo, se consideró tomar tres muestras, es decir tres lluvias o tormentas localizadas en los periodos mencionados.

Para esta investigación se contaron con datos de estaciones meteorológicas automáticas del 2011 al 2013.

Para la elección de las tormentas fue necesario que los datos observados estuvieran completos y fueran continuos, lo que facilita su seguimiento e identificación de sus valores pico.

Se presentan en las figuras de la 4.6 a 4.8, los hietogramas del 2011, 2012 y 2013 respectivamente, de la lluvia horaria registrada en las estaciones automáticas de la RH #30.

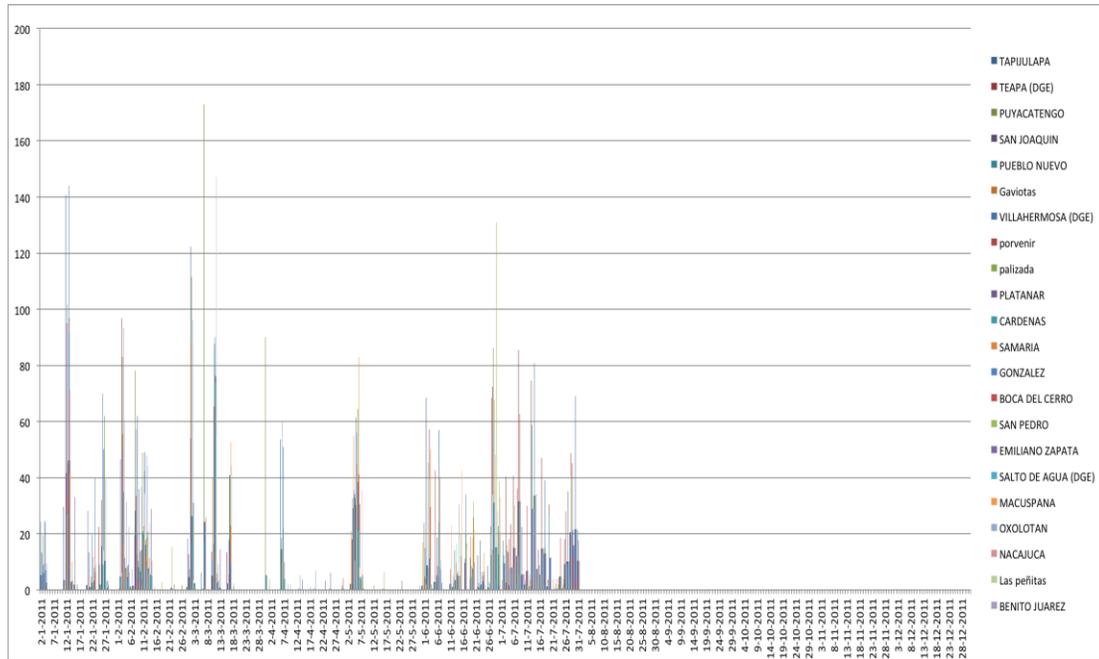


Figura 4.6 Hietograma del año 2011 para las estaciones meteorológicas automáticas de la RH # 30

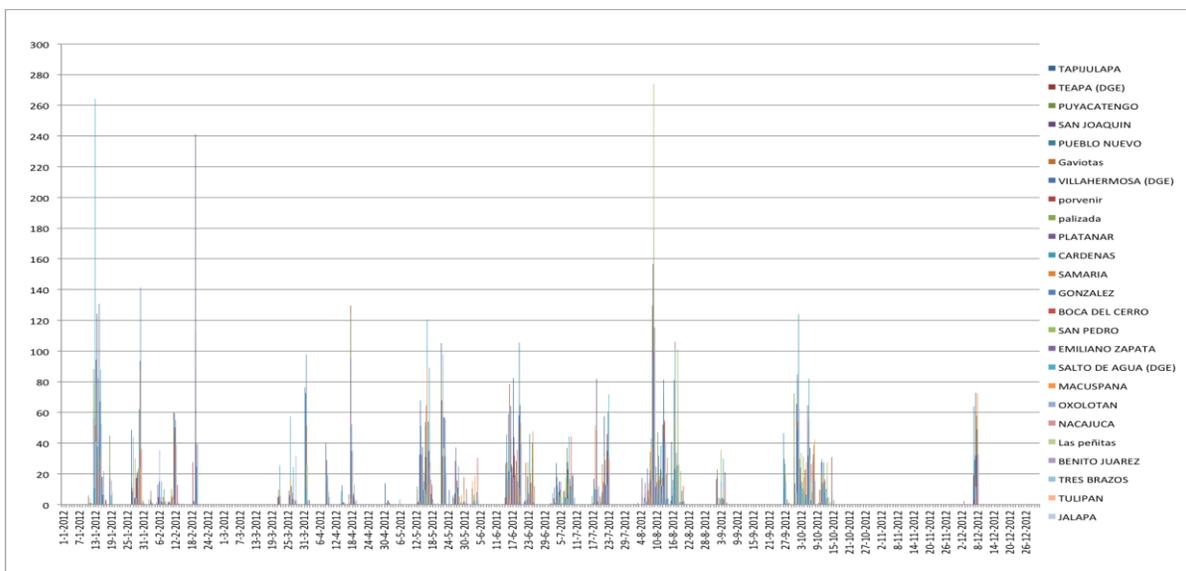
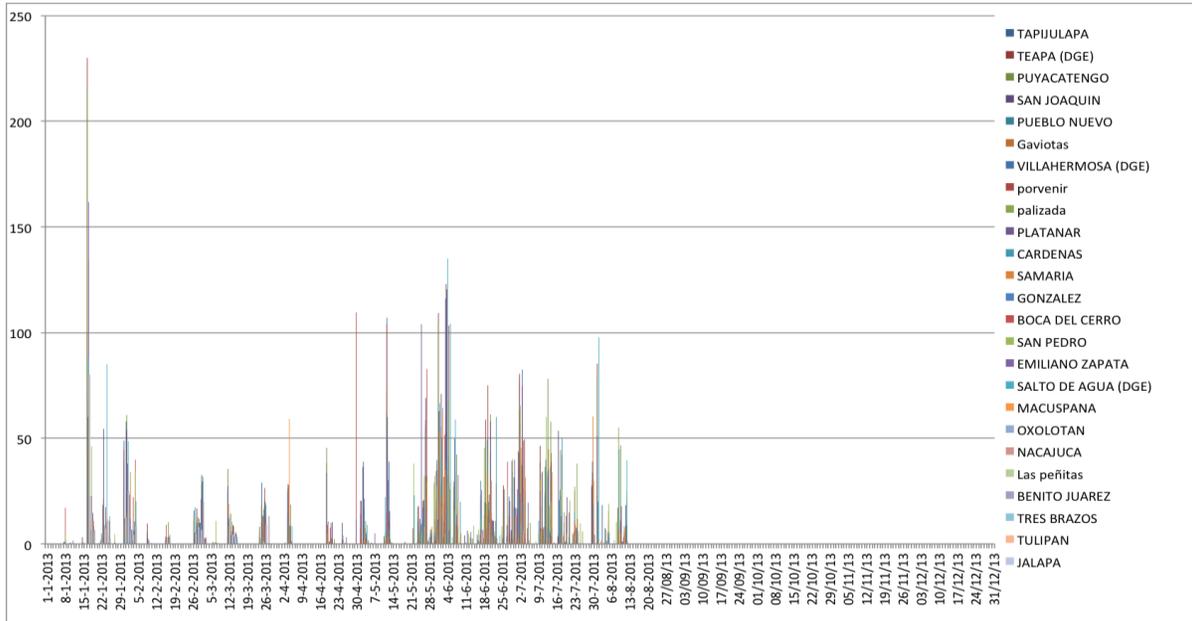


Figura 4.7 Hietograma del año 2012 para las estaciones meteorológicas automáticas de la RH # 30



*Figura 4.8 Hietograma del año 2013 para las estaciones meteorológicas automáticas de la RH # 30*

Dado que el año con menores datos faltantes es el 2012 se consideró utilizar este año como nuestro periodo de análisis. De este año se eligieron tormentas localizadas dentro de los periodos de lluvia mencionados. Para la selección de tormenta se consideró tomar las lluvias cuyos picos fueran los más altos y tuvieran una evolución de tormenta uniforme. En la figura 4.9 se muestra el hietograma del 2012 y se resalta con rectángulos las lluvias elegidas para la calibración del modelo.

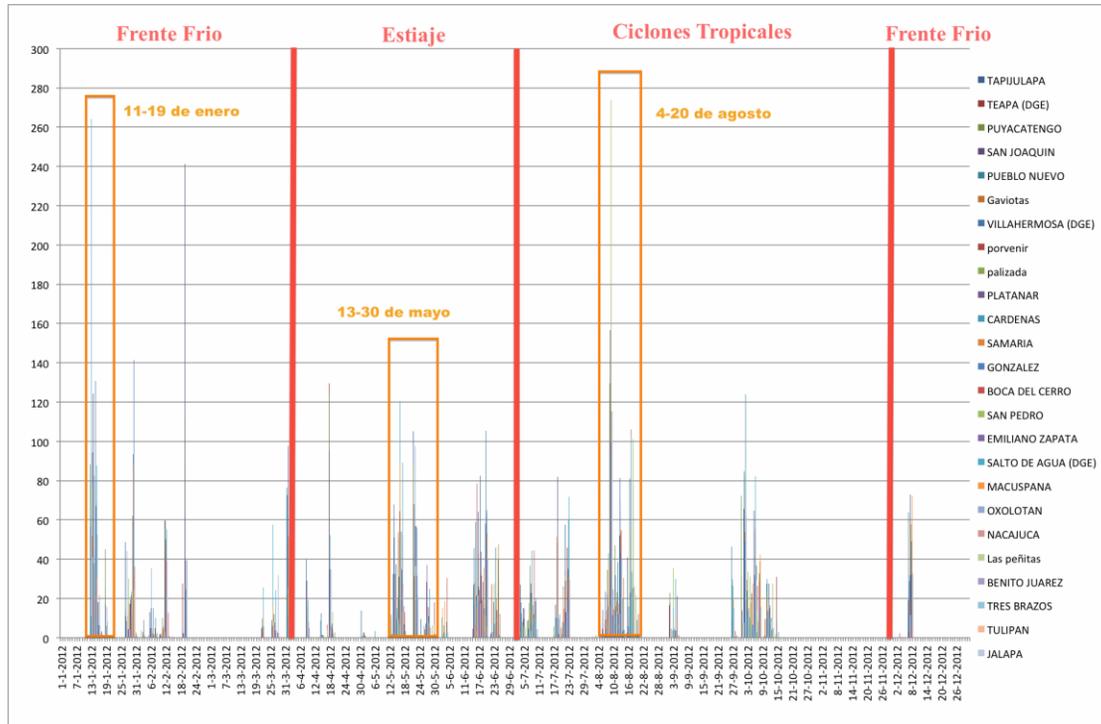


Figura 4.9 Hietograma del 2013 con tormentas seleccionadas

En la tabla 4-6 se observan las fechas elegidas dentro del periodo de lluvia seleccionado.

TABLA 4-6 TORMENTAS ELEGIDAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

Periodo	Fecha inicial	Fecha final
Fronte frio	11 de enero	19 de enero
Estiaje	13 de mayo	30 de mayo
Ciclones	4 de agosto	20 de agosto

#### 4.4.3 Calibración con estaciones convencionales

Al analizar el histórico de datos de las estaciones meteorológicas automáticas se hace notar que muchos de los datos son erróneos o faltantes por lo que además de utilizar los datos de estas estaciones, se emplearon los datos de lluvia diaria de las estaciones convencionales, con la finalidad de subsanar los datos faltantes.

Para que las estaciones convencionales ayuden a eliminar los espacios de datos es necesario que estas dos estaciones sean comparables, por lo que se hizo un análisis de homogeneidad entre los tipos de estaciones el cual consistía en, de manera geográfica, trazar un radio de la estación automática (10 km aprox.) y tomar la estación convencional más cercana, generando un dato comparable.

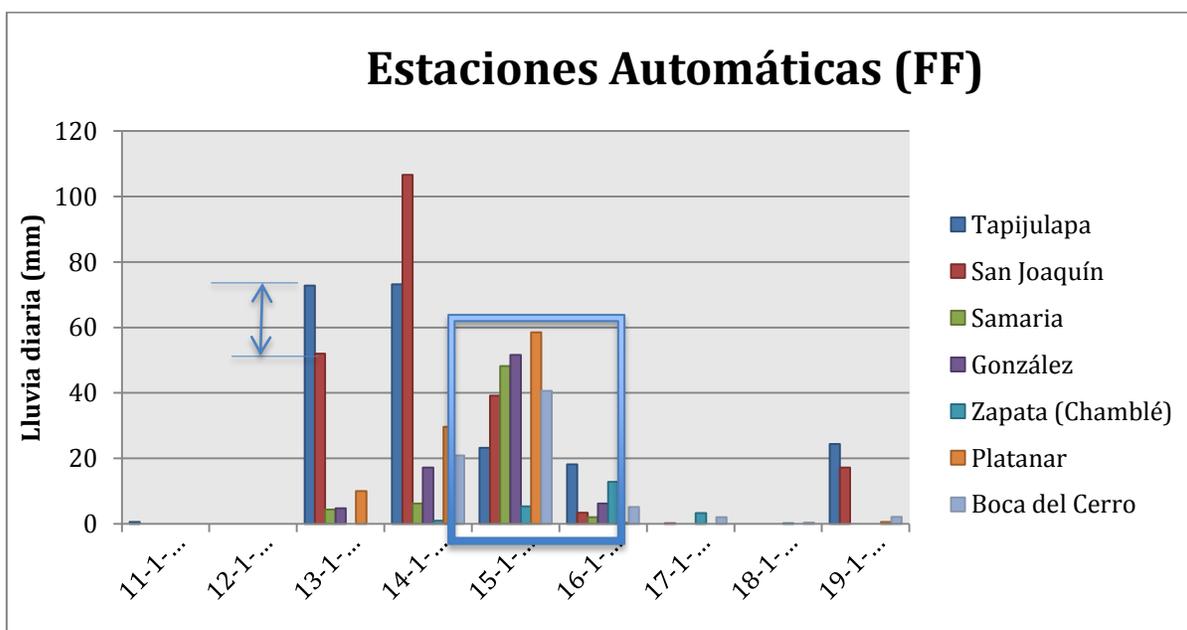
En la tabla 4-7 se muestra la estación climatológica convencional más cercana a la estación automática respectiva.

**TABLA 4-7 ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA CONVENCIONAL MÁS CERCANA A LA ESTACIÓN AUTOMÁTICA RESPECTIVA.**

Clave	Nombre E. Automática	Clave CLICOM	Nombre E. Convencional
TAB01	Tapijulapa	27042	Tapijulapa
TAB02	Puyacatengo	27061	Puyacatengo
TAB03	Teapa	27044	Teapa
TAB04	San Joaquín	7193	Pichucalco
TAB05	Porvenir	27096	Porvenir
TAB06	Samaria	27039	Samaria
TAB07	Reforma (Macayo)	27095	INIFAP
TAB08	Peñitas	7106	Las Peñitas
TAB09	Sayula	7106	Las Peñitas
TAB10	Muelle	27054	Villahermosa
TAB11	González	27054	Villahermosa
TAB12	Ocotepc	7365	Ocotepc
TAB13	Rómulo Calzada	7106	Las Peñitas
TAB14	Zapata (Chamblé)	27091	Playa Larga
TAB15	El Portillo	7183	Benito Juárez
TAB16	Gaviotas	27054	Villahermosa
TAB17	Pueblo Nuevo	27037	Pueblo Nuevo
TAB18	Platanar	7130	Platanar de arriba
TAB19	Boca del Cerro	27004	Boca del Cerro
TAB20	Salto de Agua	7141	Salto de Agua
TAB21	Posta	27054	Villahermosa

Clave	Nombre E. Automática	Clave CLICOM	Nombre E. Convencional
TAB22	Pigua	27096	Porvenir
TAB23	Frontera (Tres Brazos)	27016	Frontera A. Obregón
TAB24	Acala	7091	La Escalera
TAB25	Aza-Pac	7360	Luis Espinosa
TAB26	Boqueron	7039	El Boqueron
TAB27	Canal	7106	Las Peñitas
TAB28	Cristóbal Obregón	7332	Cristóbal Obregón
TAB29	El Grijalva	7366	Grijalva
TAB30	Emiliano Zapata	7360	Luis Espinosa
TAB31	Juan Grijalva Vaso Inferior	7106	Las Peñitas
TAB32	Juan Grijalva Vaso Superior	7106	Las Peñitas
TAB33	Las Flores	7102	Las Flores
TAB34	Monterrey	7349	Monterrey
TAB35	Ocotepc	7365	Ocotepc
TAB36	Presa Angostura	7086	La Angostura
TAB37	Presa Chicoasen	7035	Chicoasen
TAB38	Presa Malpaso	7112	Malpaso
TAB39	Presa Peñitas	7106	Las Peñitas
TAB40	Puente Concordia	7135	Puente Concordia
TAB41	Reforma	7180	Jaltenango
TAB42	Revolución Mexicana	7236	Revolución Mexicana
TAB43	Rómulo Calzada	7106	Las Peñitas
TAB44	San Cristóbal de las Casas	7144	San Cristóbal de las Casas
TAB45	San Miguel	7224	Chicomuselo
TAB46	Santa María	7156	Santa María
TAB47	Santo Domingo	7229	Santo Domingo
TAB48	Santuario	7175	Villaflores
TAB49	Sayula	7106	Las Peñitas
TAB50	Sierra Morena	NA	NA
TAB51	Tres Picos	NA	NA
TAB52	Tuxtla	7165	Tuxtla Gutiérrez
TAB53	Tzimbac	7360	Luis Espinosa
TAB54	Yamoho	7178	Yamoho

Al ubicar la estación convencional asociada a la estación automática se hizo un análisis de la calidad de la información de los periodos elegidos, lo que consistió en agrupar los datos de precipitación en periodos diarios; Esto se logró sumando los 24 datos horarios de las estaciones automáticas para que fueran comparables con las convencionales. Después se graficaron los datos asociados para el periodo de ciclones, frentes fríos y estiaje (figuras 4.10 a la 4.15), se compararon los datos asociados de los dos tipos de estaciones.



*Figura 4.10 Lluvias por frente frio (11 de enero al 19 de enero), estaciones automáticas*

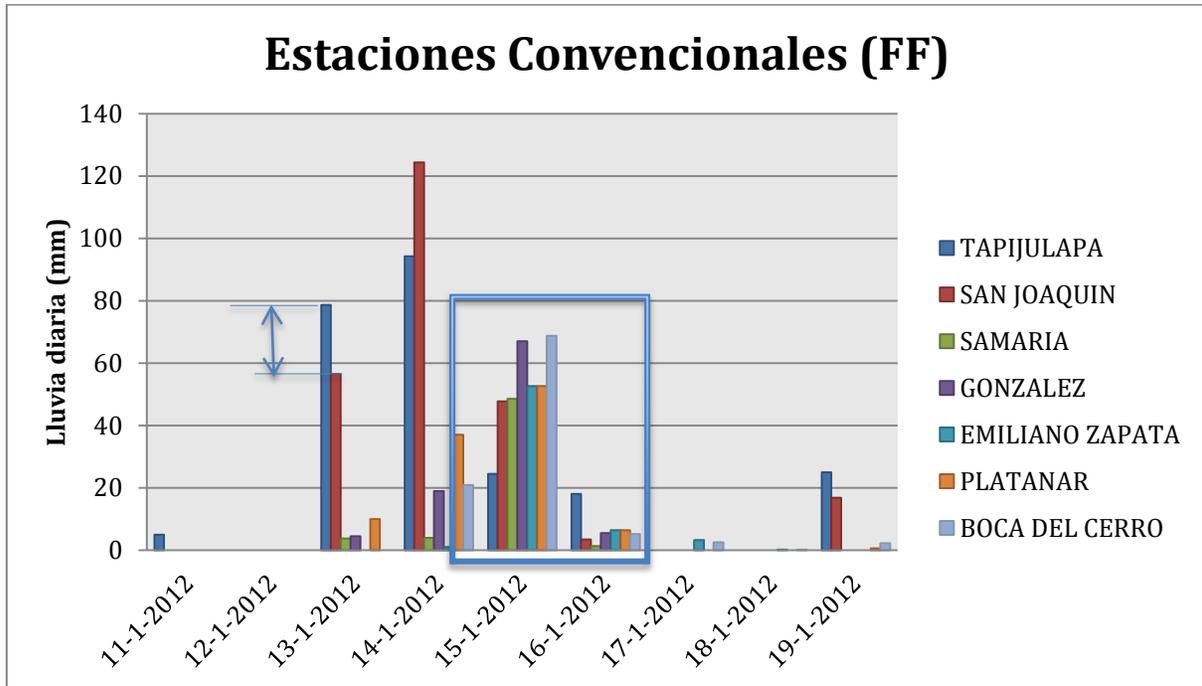


Figura 4.11 Lluvias por frente frío (11 de enero al 19 de enero), estaciones convencionales

Tanto en la figura 4.10 y 4.11 se puede observar que aunque no se tengan los mismos valores de precipitación, la tendencia se sigue conservando. Es importante que para que una estación automática sea considerada para la calibración, esta cumpla con cierto parecido en sus valores registrados a su asociada convencional. En las figuras anteriores se observa en el recuadro las diferencias de las precipitaciones entre estaciones.

De igual manera observando las figuras 4.12 y 4.13 se observa que la tendencia se conserva pero si se observa el recuadro en las dos figuras, estos destacan la falta de datos dentro del periodo marcado. Esto se puede deber o a falta de datos de una estación, o a un error en la medición que ocasione o genere datos inexistentes.

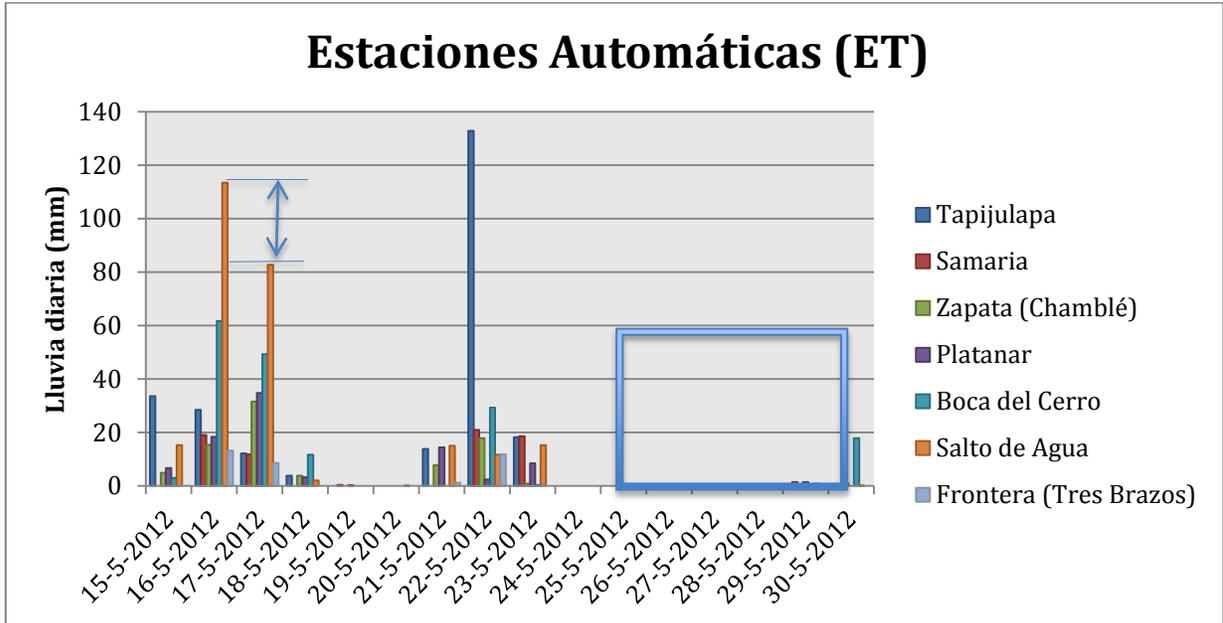


Figura 4.12 Lluvias por frente frío (11 de enero al 19 de enero), estaciones automáticas

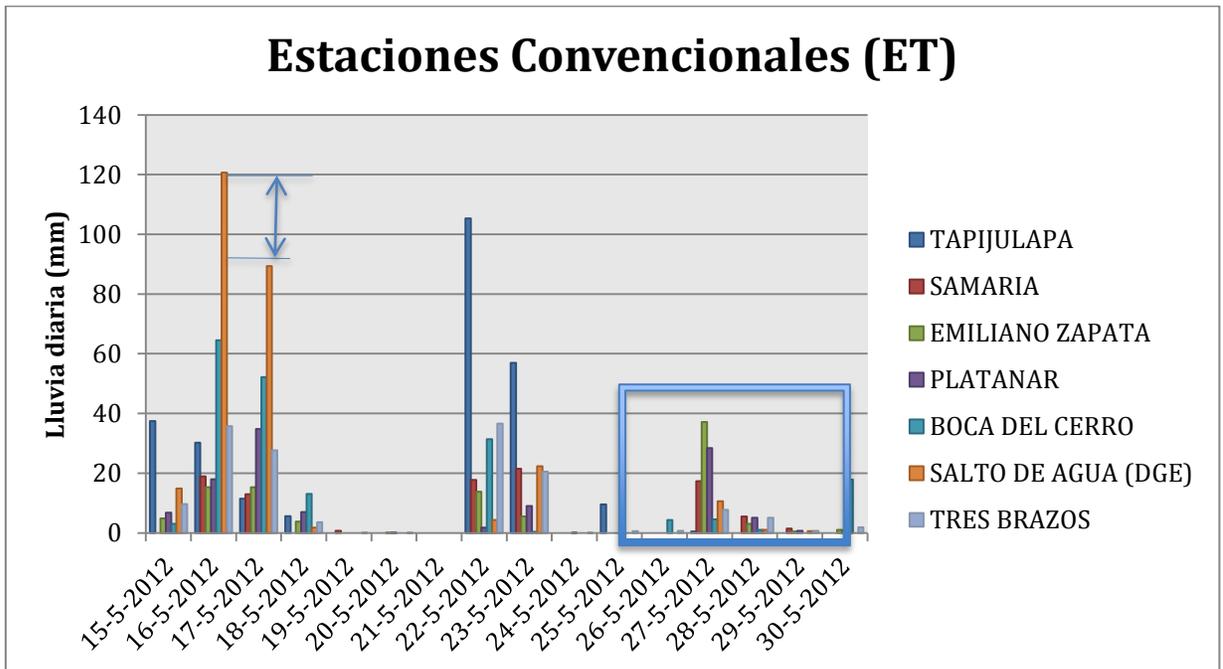


Figura 4.13 Lluvias por frente frío (11 de enero al 19 de enero), estaciones convencionales

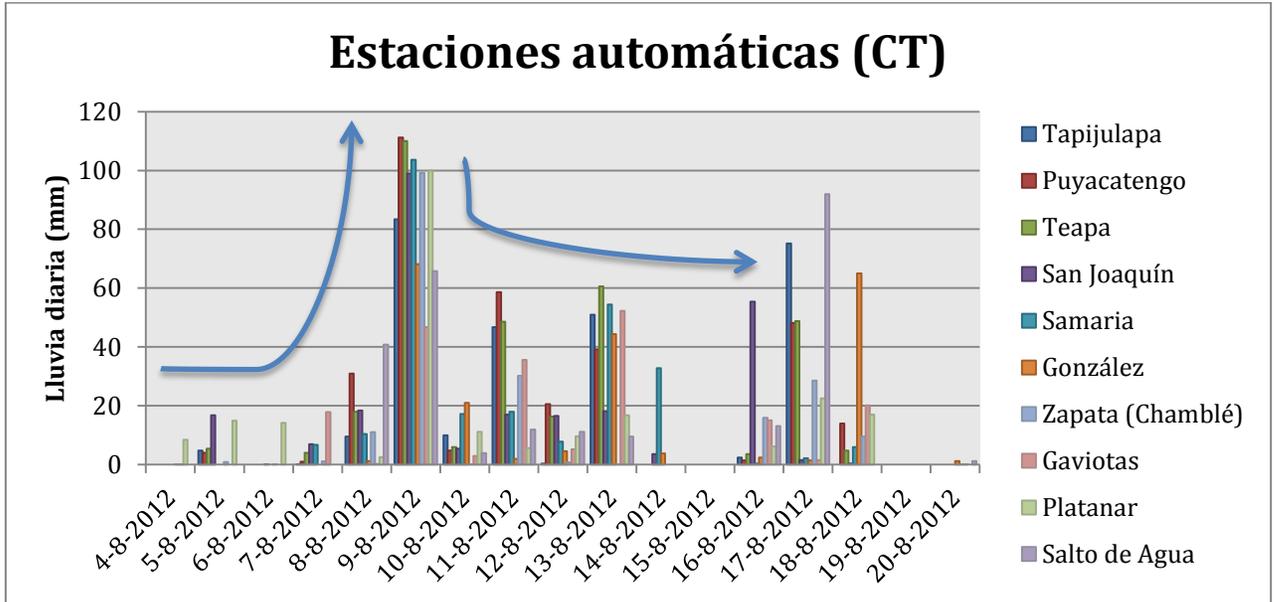


Figura 4.14 Lluvias periodo de ciclones (4 de agosto al 20 de agosto), estaciones automáticas

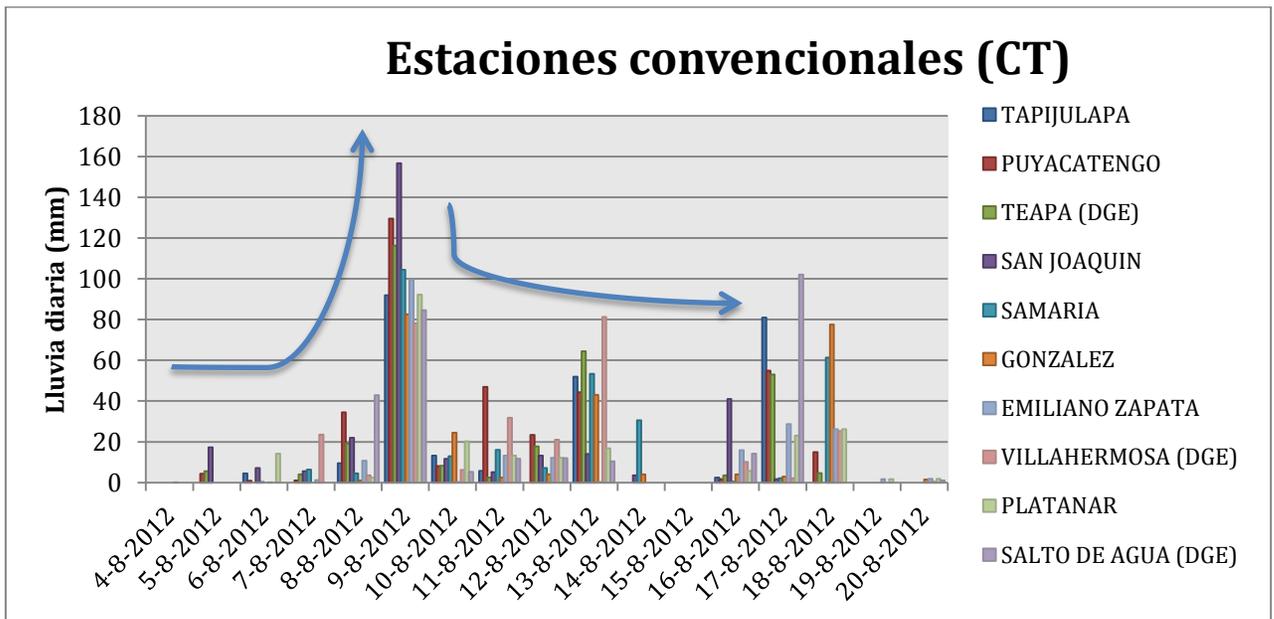


Figura 4.15 Lluvias periodo de ciclones (4 de agosto al 20 de agosto), estaciones convencionales

En las figuras 4.14 y 4.15 es clara la ausencia de magnitud de las estaciones automáticas, ya sea porque estas son más precisas o por errores eléctricos o mecánicos. Lo importante en esta comparación es la tendencia de las lluvias y las mediciones de las estaciones, como se observa con las flechas estas marcan una tendencia, gracias a la cual se pensaría en la posibilidad de ajustarlas con un escalar.

Los resultados obtenidos se utilizaron para la obtención de un coeficiente de determinación entre las estaciones.

#### 4.4.4 Aplicación del Coeficiente de determinación ( $r^2$ )

Al obtener los valores asociados fue clara la inexistencia de ciertos datos y de la poca verosimilitud que esto reflejan, por lo que se decidió empezar la calibración del modelo con las estaciones asociadas que reflejaran una mayor congruencia entre sí. Para la obtención de estas estaciones se utilizó el coeficiente de determinación, que relaciona un valor con otro.

El método para la obtención del coeficiente de determinación se aplicó entre las estaciones automáticas y sus asociadas convencionales, y se seleccionó solo las relaciones con un  $r^2$  mayor a 0.8. Este método se hizo para cada periodo y los resultados se organizaron en las tablas de la 4-8 a la 4-10.

TABLA 4-8 COEFICIENTE R2 PARA EL PERIODO DE LLUVIAS POR FRENTE  
FRÍO

Estación	$r^2$
Tapijulapa	0.999
San Joaquín	0.998
Samaria	0.998
González	0.996
Zapata	0.872
Platanar	0.964
Boca del cerro	0.961

TABLA 4-9 COEFICIENTE R2 PARA EL PERIODO DE LLUVIAS EN ESTIAJE

Estación	r <sup>2</sup>
Tapijulapa	0.852
Samaria	0.979
Zapata	0.776
Platanar	0.826
Boca del cerro	1.000
Salto de agua	0.982
Tres brazos	0.826

TABLA 4-10 COEFICIENTE R2 PARA EL PERIODO DE LLUVIAS EN PERIODO DE CICLONES

Estación	r <sup>2</sup>
Tapijulapa	0.871
Puyacatengo	0.980
Teapa	0.866
San Joaquín	0.904
Samaria	0.996
González	0.992
Zapata	0.930
Villahermosa	0.918
Platanar	0.933
Salto de agua	0.993

#### 4.4.5 Disponibilidad de la información de temperaturas de las imágenes de satélite

El modelo de estimación de lluvia emplea los datos de Temperatura y Agua Precipitable para la obtención de los valores normalizados de las temperaturas al tope de la nube ( $z_1$  y  $z_2$ ) para cada pixel, estos datos se obtienen al manipular las imágenes de satélite y son reportados como archivos de texto. Estos archivos de texto con la información de los valores normalizados son esenciales para la calibración del modelo de estimación. Sin

embargo, para algunas estaciones, ésta información de cálculos intermedios no se encuentra disponible en los archivos de texto. Por ello no se consideraron las siguientes estaciones: TAB25, TAB32, TAB37, TAB43, TAB49 y TAB54. Todas éstas se encuentran operadas al grupo de estaciones operadas por la Comisión Federal de Electricidad.

#### 4.4.6 Disponibilidad de la información de lluvias horarias y diarias

Los periodos de las lluvias elegidas para el análisis por tormenta (lluvias en ciclones, lluvias por frente frío y lluvias en estiaje), son en los que mayores datos de lluvia se cuentan, respecto a las estaciones automáticas. Sin embargo, algunas estaciones no cuentan con información para los tres periodos de análisis horario. Para la comparación con la lluvia diaria, se emplearon como etapa preliminar, los datos de las estaciones ubicadas en las subcuencas de río de La Sierra (región 2).

#### 4.4.7 Información para la calibración horaria y diaria

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores (4.4.5 y 4.4.6), reduciremos las regiones inicialmente propuestas (tabla 4-17). A continuación se muestran las estaciones agrupadas por regiones, cuya información fue empleada para la calibración horaria y diaria (tablas 4-11 y 4-13).

TABLA 4-11 ESTACIONES AUTOMÁTICAS AGRUPADAS POR REGIÓN

Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
TAB15	TAB01	TAB05	TAB14
TAB24	TAB02	TAB06	TAB19
TAB26	TAB03	TAB07	TAB23
TAB28	TAB04	TAB10	
TAB29	TAB08	TAB11	
TAB33	TAB09	TAB16	
TAB34	TAB12	TAB17	
TAB36	TAB13	TAB21	
TAB37	TAB18		
TAB38	TAB20		
TAB40	TAB22		
TAB41	TAB25		
TAB42	TAB27		
TAB44	TAB30		
TAB45	TAB31		
TAB46	TAB32		
TAB47	TAB35		
TAB48	TAB39		
TAB50	TAB43		
TAB51	TAB49		
TAB52	TAB53		
TAB54			
No. de estaciones: 22	No. de estaciones: 21	No. de estaciones: 8	No. de estaciones: 3
TOTAL: 54			

TABLA 4-12 ESTACIONES AUTOMÁTICAS AGRUPADAS POR REGIÓN,  
CONSIDERADAS PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS LLUVIAS HORARIAS

Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
TAB24	TAB01	TAB05	TAB14
TAB26	TAB02	TAB06	TAB19
TAB28	TAB03	TAB11	TAB23
TAB29	TAB04	TAB16	
TAB33	TAB12	TAB17	
TAB34	TAB18		
TAB36	TAB20		
TAB37	TAB30		
TAB38	TAB39		
TAB40	TAB53		
TAB41			
TAB42			
TAB44			
TAB45			
TAB46			
TAB47			
TAB48			
TAB50			
TAB51			
TAB52			
No. de estaciones: 20	No. de estaciones: 10	No. de estaciones: 5	No. de estaciones: 3
TOTAL: 38			

*TABLA 4-13 ESTACIONES AUTOMÁTICAS AGRUPADAS POR REGIÓN, CONSIDERADAS PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS LLUVIAS DIARIAS*

Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
Ninguna	TAB01	TAB06	TAB14
	TAB02	TAB10	
	TAB03	TAB11	
	TAB04		
	TAB18		
	TAB20		
No. de estaciones: 0	No. de estaciones: 6	No. de estaciones: 3	No. de estaciones: 1
TOTAL: 10			

Con las tablas anteriores es posible visualizar, la información con la que se puede calibrar de manera horaria y las estaciones que se pueden emplear para la calibración de la lluvia diaria.

#### 4.4.8 Calibración de los parámetros, resultados preliminares

Tomando en cuenta todo lo dicho anteriormente se optó por empezar la calibración con la región 2 en el periodo de ciclones, ya que es la más susceptible y la que a lo largo de la historia ha presentado mayores desastres y pérdidas humanas y es aquí donde se encuentran las concentraciones humanas más grandes. En la tabla 4-14 se muestran los datos empleados para la calibración de las lluvias horarias y diarias, se muestra además el origen de la información.



Después de anexar los valores obtenidos del HE, se empezó a formular la hoja de Excel de acuerdo a las ecuaciones descritas en el apartado 2.2.2.3 *descripción del Hidroestimador*. Estas se fueron formulando de forma ordenada para poder obtener un resultado de estimación por renglón, esto ocasionó que obtuviéramos resultados por cada dato que se recibió (c/15 min). Estos resultados se acumulaban para formar los resultados horarios y estos mismos para formar los resultados diarios.

Todas las formulaciones fueron vinculadas a la tabla de calibración, la cual se encontraba en el primer libro del documento, esto para poder modificar los parámetros de calibración, ver el comportamiento de los resultados y cambiarlos de forma sencilla.

Para evaluar la comparación de las estimaciones, se emplearon para cada estación analizada, tres criterios numéricos: error cuadrático (EC), error relativo absoluto (ER), y coeficiente de determinación ( $r^2$ ), lo que facilitaba el análisis de resultados.

En la tabla 4-15 se muestra parte de la tabla de calibración de la hoja de cálculo, para la calibración de los parámetros; también se muestran los parámetros actuales del modelo. En las celdas de la columna Calibración, es posible variar los valores y obtener resultados de forma sencilla.

Tabla 4-15 Parámetros originales del modelo de estimación de lluvia

No.	Parámetro	Descripción	Gobierna el comportamiento	Valor actual	Calibración
1	a	Parámetro del modelo de lluvia convectiva	lluvia convectiva	1.182x1013	1.182x1013
2	b	Exponente del modelo de lluvia convectiva	lluvia convectiva	1.283x10-1	1.283x10-1
3	c	Pendiente del modelo de agua precipitable	agua precipitable	-0.303	-0.303
4	d	Parámetro del modelo de agua precipitable	agua precipitable	78.4848	78.4848
5	$\alpha$	Porcentaje de lluvia no convectiva	lluvia no convectiva	0.2	0.2
6	$\beta$	Límite de lluvia máxima no convectiva	lluvia no convectiva	12 mm	12 mm
7	$\gamma$	Límite de agua máxima precipitable	agua precipitable	20 mm	20 mm
8	T	Límite de temperatura para la que hay precipitación	lluvia convectiva	250 K	250 K

9	k1	Z1	lluvia de la vecindad de tamaño N1	1.5	1.5
10	k2	Z2	lluvia de la vecindad de tamaño N2	1.5	1.5

En la figura 4.18 se presenta la segunda parte de la tabla de calibración en donde se obtenían los resultados de los errores cuadrático (EC), relativo (ER) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) calculados para cada estación perteneciente a la Región 2, los resultados que se muestran son para el periodo de lluvias en época de ciclones sin la calibración.

		Mínimo	31.85	0.27	0.06	Mínimo	109.38	0.85	0.16
		Máximo	89.90	3.57	0.32	Máximo	179.00	4.74	0.61
		Promedio	66.71	1.04	0.18	Promedio	137.44	2.04	0.35
Hoja	Estación	Lluvia horaria (mm)			Hoja	Estación	Lluvia diaria (mm)		
		Error cuadrático medio (lluvia horaria)	Error relativo (lluvia horaria)	$r^2$ (lluvia horaria)			Error cuadrático medio (lluvia diaria)	Error relativo (lluvia diaria)	$r^2$ (lluvia diaria)
Hoja 01	TAB01	76.95	0.61	0.20	Hoja 01	TAB01	122.68	1.08	0.46
Hoja 01	TAB02	64.42	0.61	0.32	Hoja 01	TAB02	111.87	1.48	0.47
Hoja 01	TAB03	72.96	0.32	0.30	Hoja 01	TAB03	109.38	2.14	0.61
Hoja 01	TAB04	89.90	0.58	0.06	Hoja 01	TAB04	179.00	4.74	0.16
Hoja 02	TAB12	70.52	0.36	0.17	Hoja 01	TAB18	134.08	0.85	0.24
Hoja 01	TAB18	85.83	1.58	0.09	Hoja 02	TAB20	167.61	1.96	0.19
Hoja 02	TAB20	87.07	1.69	0.16		Mínimo	109.38	0.85	0.16
Hoja 02	TAB30	49.09	0.27	0.16		Máximo	179.00	4.74	0.61
Hoja 02	TAB39	38.54	3.57	0.10		Promedio	137.44	2.04	0.35
Hoja 02	TAB53	31.85	0.80	0.27					
	Mínimo	31.85	0.27	0.06					
	Máximo	89.90	3.57	0.32					
	Promedio	66.71	1.04	0.18					

Figura 4.17 Resultados del modelo con los parámetros originales

Se calcularon los errores cuadrático y relativo, sin embargo para fines de comparación se determinó utilizar el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

Los criterios numéricos para medir cuantitativamente la calibración de los parámetros del modelo, se muestran representados en la gráficas radiales que se muestran en las figuras siguientes (se muestran antes de modificar los valores de los parámetros). En la figura 4.19

se muestra la gráfica radial para la estimación horaria. En la figura 4.20 se muestra para la estimación diaria.

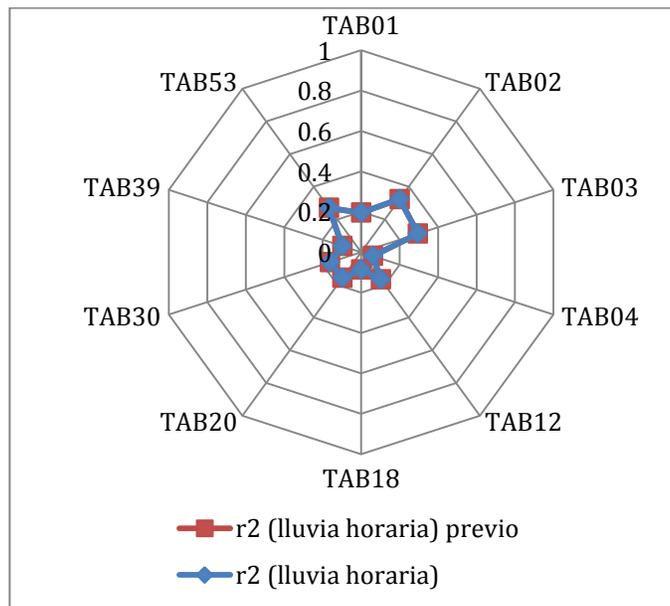


Figura 4.18 Coeficiente de determinación, lluvias horarias

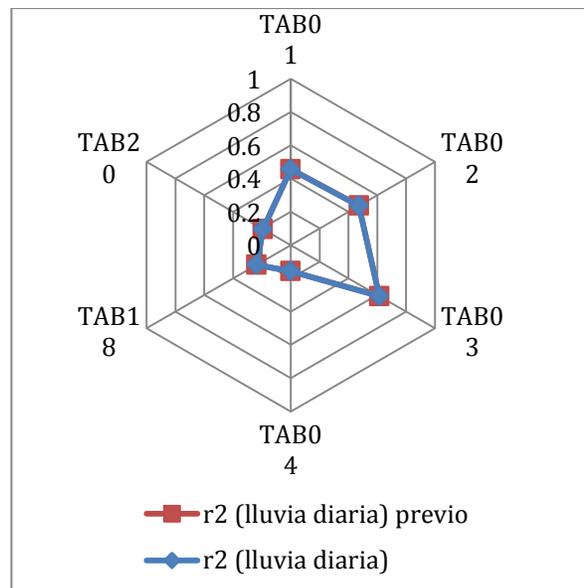


Figura 4.19 Coeficiente de determinación, lluvias diarias

#### 4.4.9 Análisis de sensibilidad

Para ir variando los parámetros se utilizó la metodología del análisis de la sensibilidad ajustado a las necesidades de la calibración. Esto se hizo modificando los parámetros de forma ordenada para la obtención de una mejor calidad de ajuste del modelo.

Al tener muchísima información a “sensibilizar” fue imposible el análisis en conjunto de los parámetros por lo que se decidió hacer la metodología *uno a uno*.

Nuestro ajuste cero fue el hecho por el instituto de ingeniería con los parámetros originales, se tomó como estándar cero de calibración el coeficiente de determinación obtenido ( $r^2=0.35$ ).

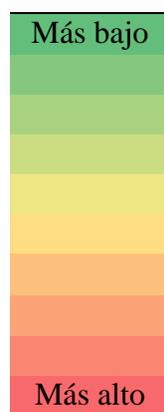
La metodología uno a uno consiste en lo siguiente:

1. Se empezó modificando el parámetro 1 de manera ordenada y lógica, en “n” valores, al ir modificando este primer parámetro era necesario no modificar ningún otro parámetro.
2. Cada vez que se variaba el valor del parámetro el modelo estimaba distinto. Se observó la variación del coeficiente de determinación ( $r^2$ ). Este resultado se almacenada con su respectivo valor del parámetro.
3. Al termino de las “n” modificaciones al parámetro, este se graficó teniendo en el eje de las abscisas el valor del parámetro y en el eje de las ordenadas el valor resultante del coeficiente de determinación, esto con el propósito de observar las fluctuaciones y la “sensibilidad” de los parámetros.
4. Después de graficar el primer parámetro, este se regresaba al valor original.
5. El procedimiento de los pasos 1-4 se realizó para todos los parámetros.
6. Al tener todas las tablas y gráficas de sensibilidad se analizan y se determina cual es el valor más “sensible”, esto se hace obteniendo el máximo valor del coeficiente de determinación obtenido y relacionándolo con su valor generador.
7. Al obtener el primer valor sensible este se fijó (ya no modificable), y se repitió la metodología hasta que el coeficiente de determinación no variara en más de un 10%.

Se aplicó el método antes descrito, obteniendo los siguientes resultados:

Para las siguientes tablas la escala es la siguiente: el color verde indica el valor más bajo y el rojo indica el valor más alto como se indica en la tabla 4-16.

TABLA 4-16 ESCALA DE COLORES UTILIZADA EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



En las tablas 4-17 a la 4-24 se muestran la variación de los parámetros y en las figuras 4.21 a la 4.28 se muestran las gráficas de las variaciones del coeficiente de determinación.

Para la referencia de los parámetros dirigirse a la tabla 4-15.

TABLA 4-17 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 1

Valor del parámetro 1	Coefficiente r2
1E+11	0.16479
1E+12	0.16479
1E+13	0.32465
1.182E+13	0.34062
1.42E+13	0.36209
2.13E+13	0.38248
2.36E+13	0.38519
1.00E+14	0.41336

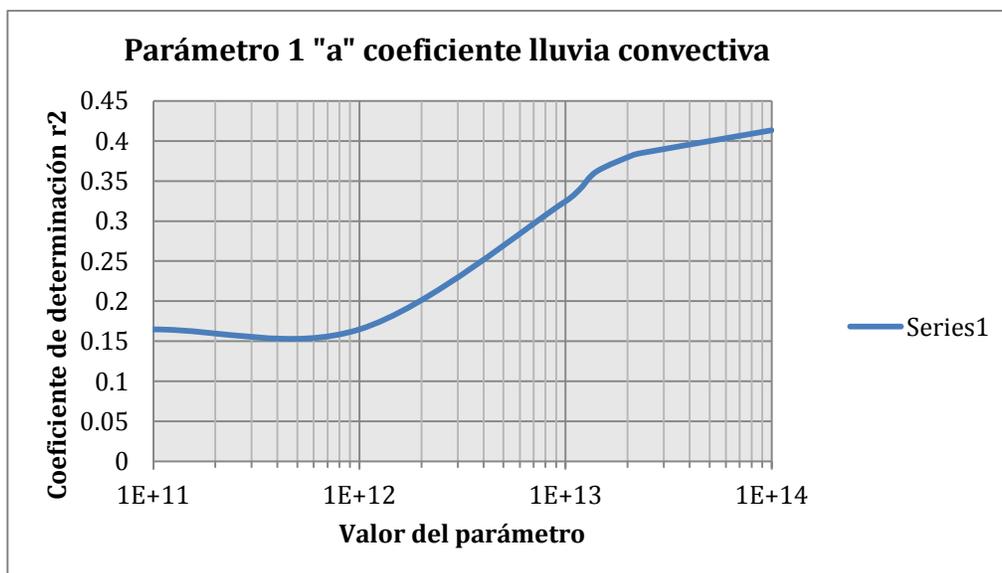


Figura 4.20 Análisis de sensibilidad parámetro 1

TABLA 4-18 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 2

Valor del parámetro 2	Coefficiente r2
0.1	0.4092
0.105	0.4092
0.115	0.40957
0.116	0.41091
0.117	0.41089
0.118	0.41178
0.11885	0.41302
0.1189	0.4129
0.119	0.41266
0.12	0.41065
0.125	0.38592
0.1283	0.34602
0.13	0.30112
0.135	0.1682
0.14	0.1398
0.145	0.13018
0.15	0.12119
1.54E-01	0.11451

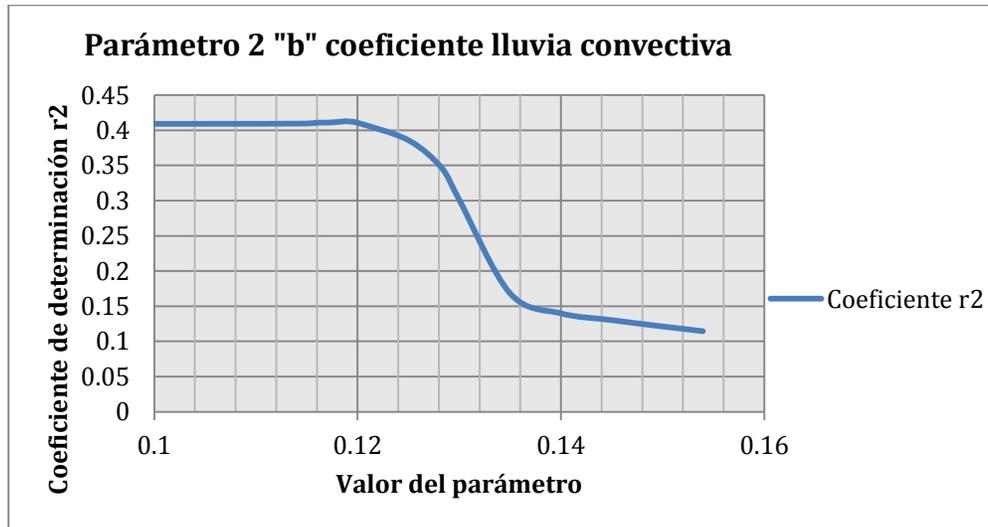


Figura 4.21 Análisis de sensibilidad parámetro 2

TABLA 4-19 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 5

Valor del parámetro 5	Coefficiente r2
0.00	0.3272
0.10	0.3305
0.20	0.34602
0.30	0.35924
0.40	0.36864
0.50	0.3766
0.60	0.38248
0.70	0.38668
0.80	0.38948
0.90	0.39199
1.00	0.3946

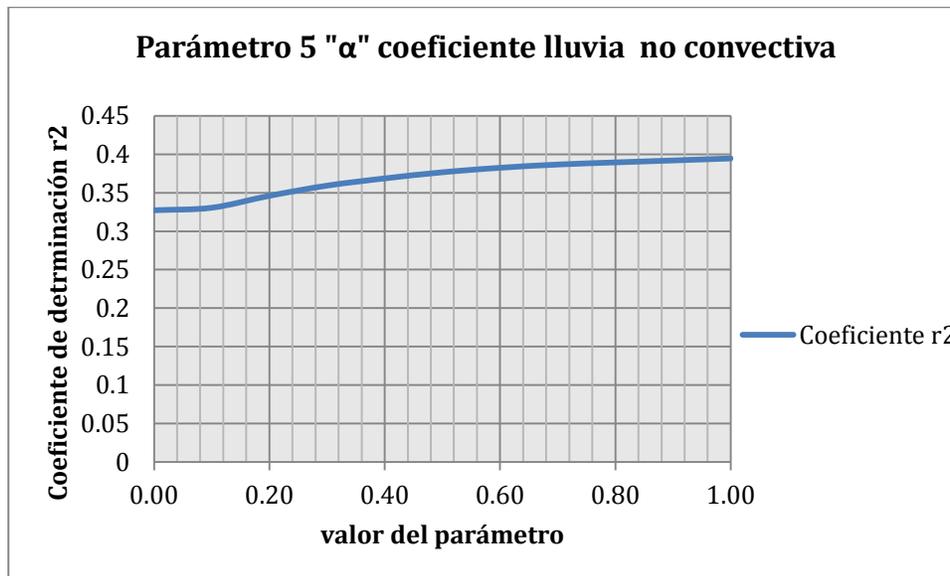


Figura 4.22 Análisis de sensibilidad parámetro 5

TABLA 4-20 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 6

Valor del parámetro 6	Coficiente r2
5	0.34515
8	0.34623
9	0.34638
10	0.34622
11	0.34605
12	0.34602
15	0.346
20	0.346
25	0.346
30	0.346
35	0.346
40	0.346
45	0.346

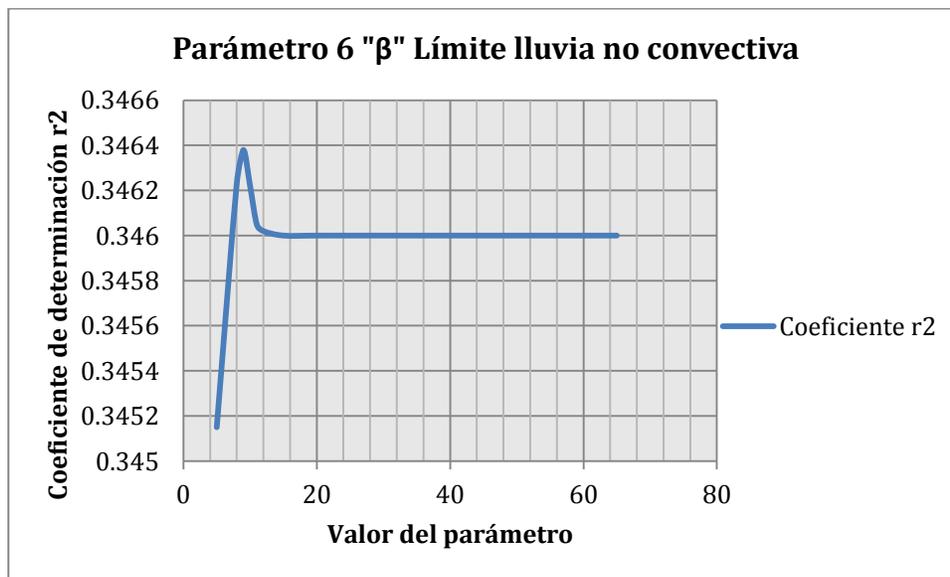


Figura 4.23 Análisis de sensibilidad parámetro 6

TABLA 4-21 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 7

Valor del parámetro 7	Coefficiente r2
1	0.4094
5	0.40362
10	0.38522
11	0.38275
15	0.368760738
16	0.3647
20	0.346391592
25	0.31908
30	0.30049
45	0.26275
65	0.22344

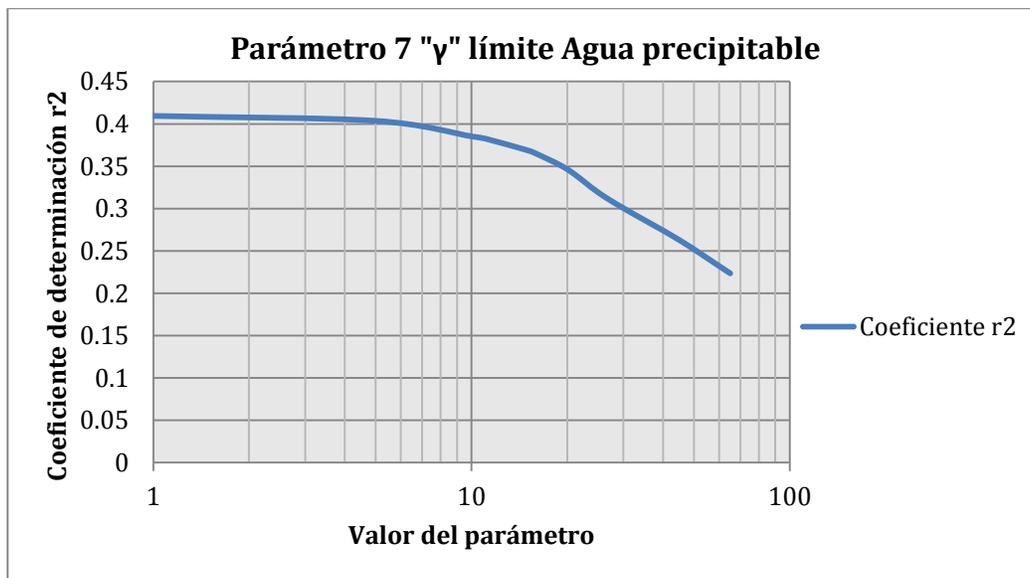


Figura 4.24 Análisis de sensibilidad parámetro 7

Tabla 4-22 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 8

Valor del parámetro 8	Coefficiente r2
204	0.03511
210	0.2331
215	0.32842
220	0.33771
225	0.34515
230	0.3449
235	0.34602
240	0.34602
245	0.34602
250	0.34602

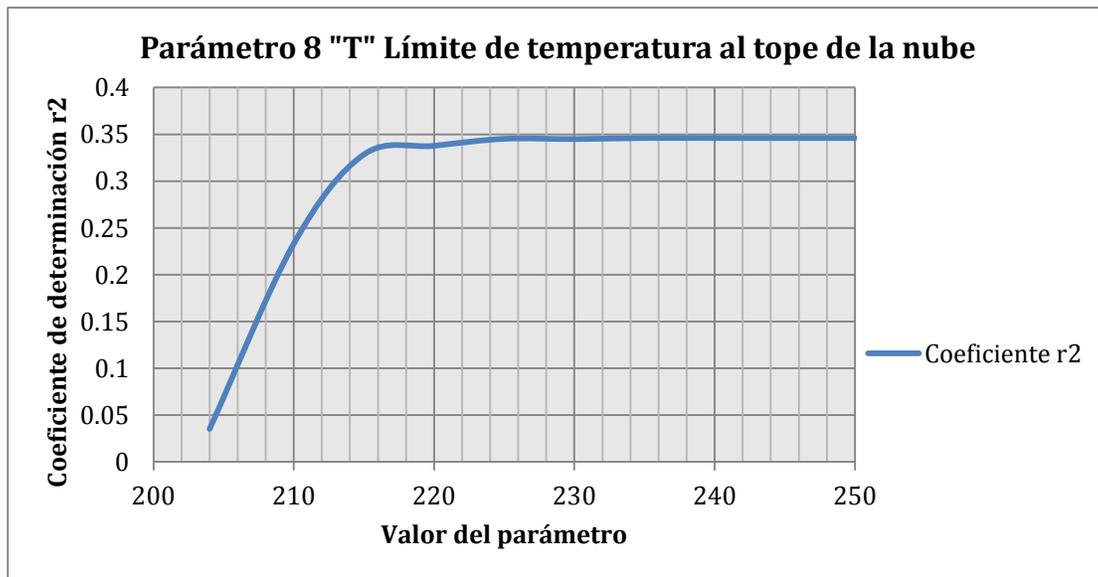


Figura 4.25 Análisis de sensibilidad parámetro 8

TABLA 4-23 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 9

Valor del parámetro 9	Coefficiente r2
1.2	0.3559
1.3	0.35295
1.4	0.34966
1.5	0.34602
1.6	0.34247
1.7	0.33889
1.8	0.33533
1.9	0.33181
2.0	0.32832

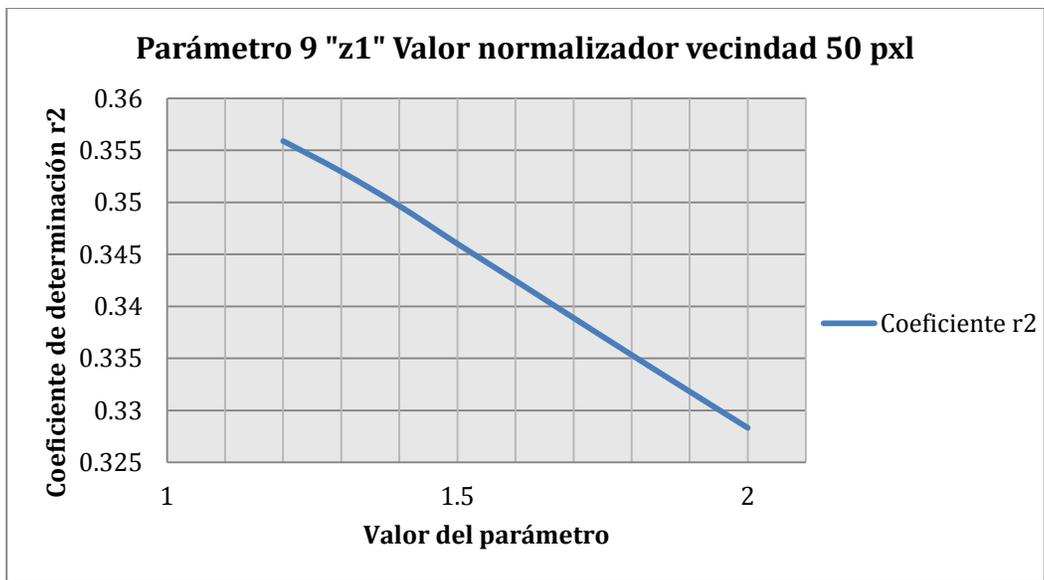


Figura 4.26 Análisis de sensibilidad parámetro 9

TABLA 4-24 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 10

Valor del parámetro 10	Coficiente r2
1.2	0.35696
1.3	0.35353
1.4	0.3499
1.5	0.34602
1.6	0.34237
1.7	0.33886
1.8	0.33559

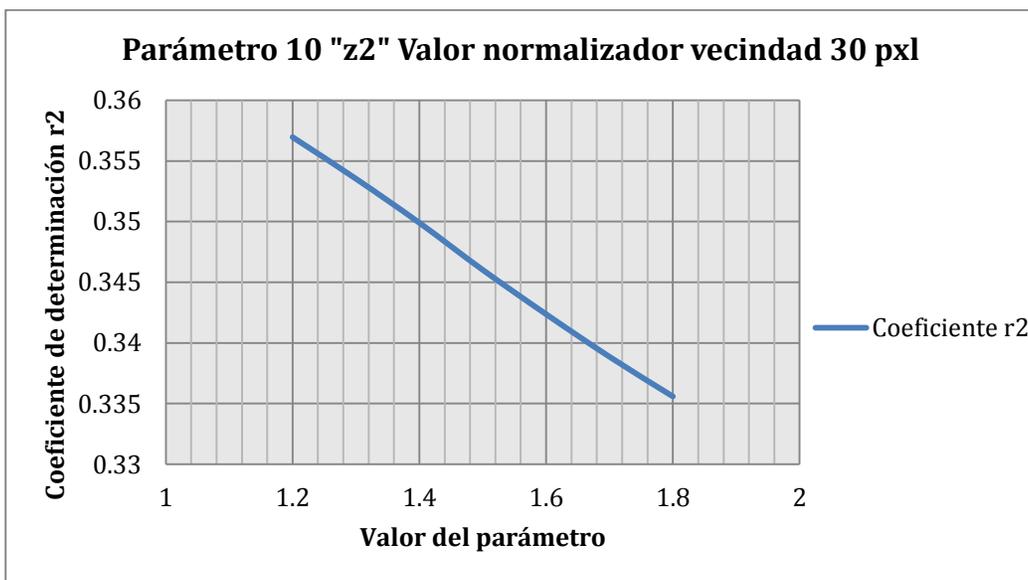
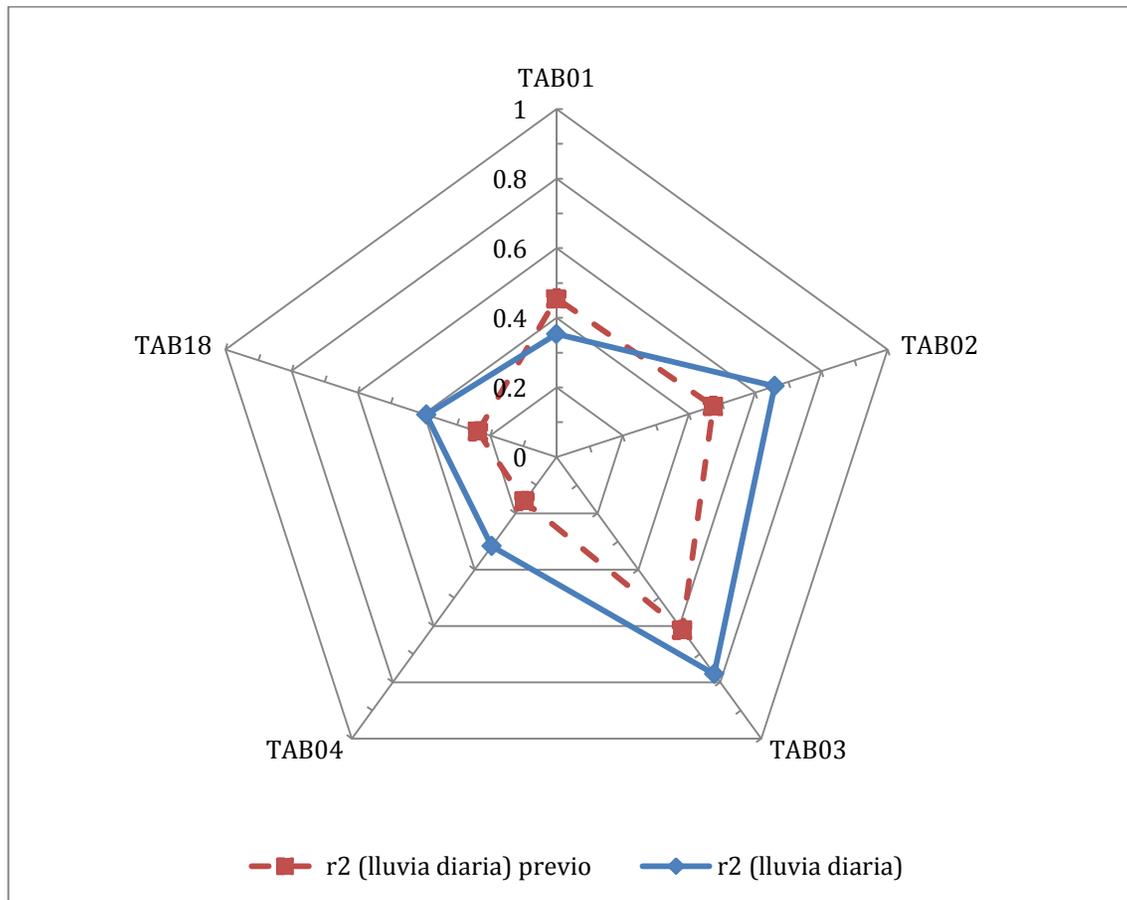


Figura 4.27 Análisis de sensibilidad parámetro 10

Al final del análisis de sensibilidad se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la tabla 4-25:

TABLA 4-25 RESULTADOS OBTENIDOS AL FINAL DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Mínimo		82.78	0.93	0.32
Máximo		134.19	4.02	0.77
Promedio		104.66	2.62	<b>0.50</b>
Hoja	Estación	Lluvia diaria (mm)		
		Error cuadrático medio (lluvia diaria)	Error relativo (lluvia diaria)	$r^2$ (lluvia diaria)
Hoja 01	TAB01	105.44	2.86	0.35
Hoja 01	TAB02	82.78	0.93	0.66
Hoja 01	TAB03	95.88	4.02	0.77
Hoja 01	TAB04	134.19	3.41	0.32
Hoja 01	TAB18	105.01	1.87	0.39
Mínimo		82.78	0.93	0.32
Máximo		134.19	4.02	0.77
Promedio		104.66	2.62	<b>0.50</b>



*Figura 4.28 Gráfica radial que refleja el comportamiento del coeficiente de determinación*

Lo que nos indica la gráfica radial de la figura 4.29, es el comportamiento del coeficiente de determinación ( $r^2$ ). Este oscila en un rango de entre 0 y 1 siendo 0 un ajuste nulo y 1 un ajuste perfecto.

En la gráfica podemos observar que en nuestro límite superior (los extremos de la gráfica) tenemos el 1 y en el límite inferior (el centro de la gráfica) el 0.

En color rojo tenemos la calibración con los parámetros definidos por el IINGEN y en azul tenemos la calibración con los parámetros obtenidos por el análisis de sensibilidad.

#### 4.4.10 Aplicación del Coeficiente de eficiencia (COE)

Para un análisis de eficiencia de un modelo hidrológico es necesario un análisis completo (multiple) por lo que se utilizó el coeficiente de eficiencia de Nash.

Para la obtención del coeficiente de eficiencia de Nash se consideró lo siguiente:

1. Se seleccionaron los datos de precipitación de las estaciones con datos diarios tanto observados como estimados.
2. Se calculó la media de las precipitaciones Observadas.
3. Se calculó por aparte el cuadrado de la estimada menos la media por día  $[(Es - Med)^2]$ , y se obtiene la sumatoria del total de los días de estudio.
4. Se calculó por aparte el cuadrado de la estimada menos la observada por día  $[(Es - Obs)^2]$ , y se obtiene la sumatoria del total de los días de estudio.
5. Para obtener el COE se resta de uno la división de la sumatoria obtenida en el punto 3 entre la sumatoria obtenida en el punto 4.

$$COE = 1 - \frac{\sum[Es - Obs]^2}{\sum[Es - Med]^2}$$

A continuación se muestra, en la tabla 4-26, una estimación del coeficiente de Eficiencia (COE) para las fechas del 8 al 13 de octubre del 2012

TABLA 4-26 APLICACIÓN DEL COEFICIENTE DE EFICIENCIA DE NASH

Fecha	Estimada	Observada	$(Es - Med)^2$	$(Es - Obs)^2$
08/8/2012	0.00	34.40	2280.06	1183.36
09/8/2012	84.20	129.50	1329.13	2051.43
10/8/2012	5.76	8.00	1763.08	5.01
11/8/2012	56.31	47.00	73.37	86.78
12/8/2012	0.70	23.30	2213.34	510.58
13/8/2012	97.25	44.30	2450.83	2804.32
		Media observada	Suma	Suma
		47.75	10109.828	6641.500825
				<b>COE</b>
				<b>0.343064959</b>

Como se mencionó en el punto 3.3.2, cuando el coeficiente de eficiencia (COE) es positivo nos indica un ajuste mejor que el que nos daría un ajuste con la media.

#### 4.4.11 Aplicación del método de la curva masa de precipitación.

Los resultados obtenidos de los coeficientes de eficiencia son interpretaciones matemáticas, por lo que es recomendable complementar estos resultados más físicos. El utilizar el método de la curva masa de la precipitación es de gran ayuda para el análisis de los resultados de forma rápida y visual.

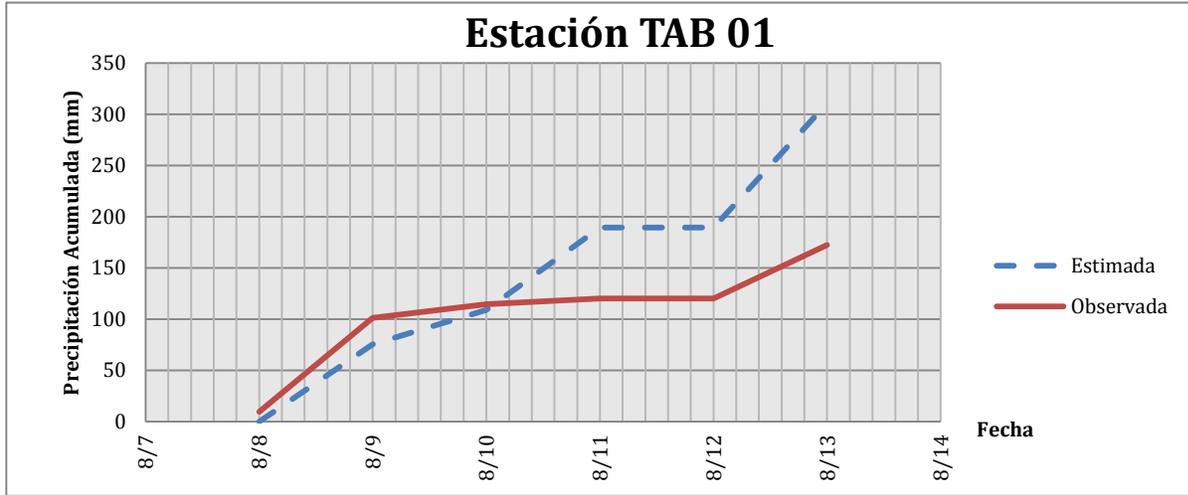
Gracias al análisis de curva masa en este ejercicio observamos el comportamiento de la precipitación tanto estimada como la observada, esta pieza es clave en nuestra calibración. Tanto el concepto como la metodología son sencillos.

Para la obtención de las curvas masa de la precipitación:

1. Se hicieron los acumulados de las precipitaciones observadas.
2. Se hicieron los acumulados de las precipitaciones estimadas.
3. Se obtuvo una gráfica conjunta para observar el comportamiento de los volúmenes de agua entre lo observado y lo estimado

Las gráficas en la figuras 4.30 a 4.34, fueron los resultados de este análisis para las estaciones más representativa.

En la figura 4.30, se puede observar cierta relación entre lo estimado y lo observado al principio de la gráfica, justo después de pasar los 100 mm acumulados el modelo sigue estimando precipitación mientras las estaciones nos dicen que esta cesó. La forma y tendencia se conserva al final de la gráfica lo que nos indica que cuando llovió el modelo lo estimó.



*Figura 4.29 Curva masa generada con las lluvias estimadas vs las lluvias observadas en la estación TAB01*

En el caso de la figura 4.31, que representa la relación de precipitaciones de la estación TAB02, se puede observar desde el principio de la gráfica hasta el final que el modelo en esta estación está subestimando. A lo largo de toda la gráfica el volumen de precipitaciones, conserva cierta tendencia y forma.

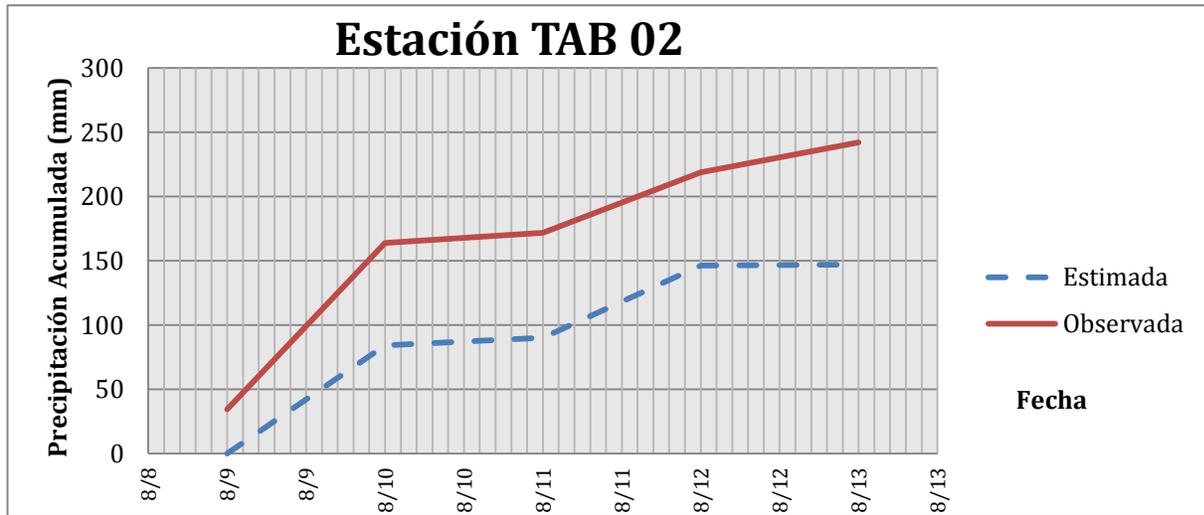


Figura 4.30 Curva masa generada con las lluvias estimadas vs las lluvias observadas en la estación TAB02

En la figura 4.32, se observa la relación de precipitación en la estación TAB03. Así como en la TAB01 se observa una tendencia a estimar por apenas debajo de lo observado, pero al llegar al acumulado de 100 mm de lluvia este tiene un comportamiento y forma diferente. Esta gráfica así como la anterior representa una buena calibración, ya que se podría pensar que tendrían un mejor ajuste multiplicándolas por un factor escalar, ya que presentan la forma y tendencia.

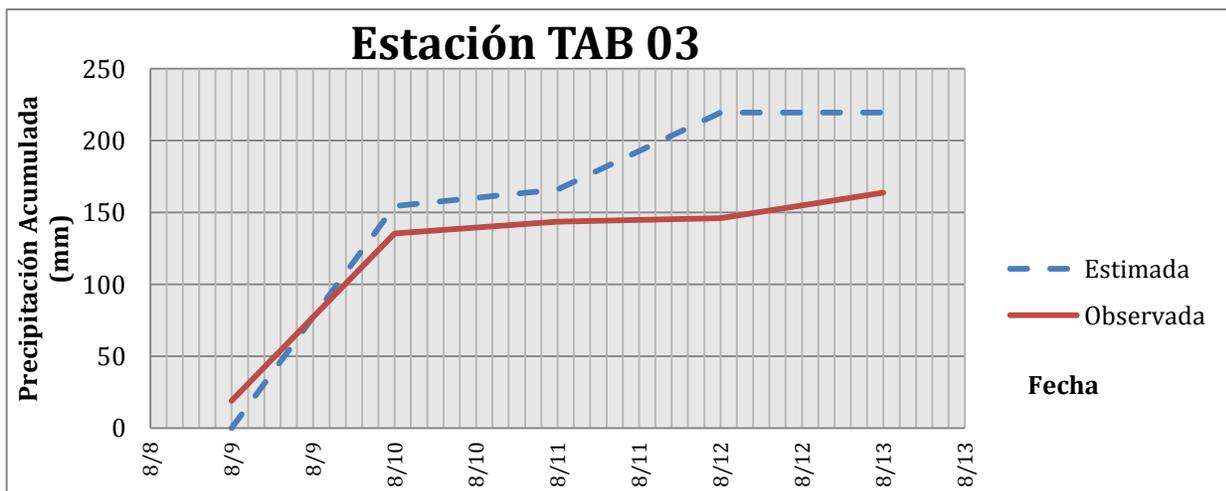


Figura 4.31 Curva masa generada con las lluvias estimadas vs las lluvias observadas en la estación TAB03

En la figura 4.33 se muestra la relación de volúmenes de precipitación de la estación TAB04.

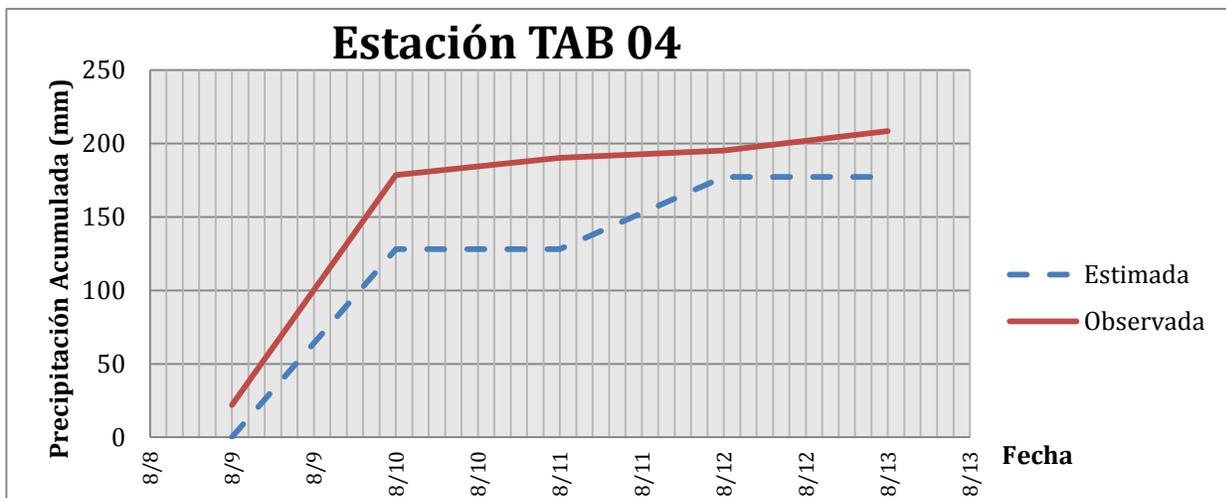


Figura 4.32 Curva masa generada con las lluvias estimadas vs las lluvias observadas en la estación TAB04

La estación TAB18 (figura 4.34) presenta una de las mejores gráficas de ajuste al tener una forma impecablemente parecida a sus acumulados. Aunque es particularmente curioso observar que en esta estación el modelo tiende a sobreestimar cuando en todos los casos anteriores es lo contrario. De igual manera se podría pensar en aplicar un coeficiente escalar de ajuste para mejorar la precisión del modelo.

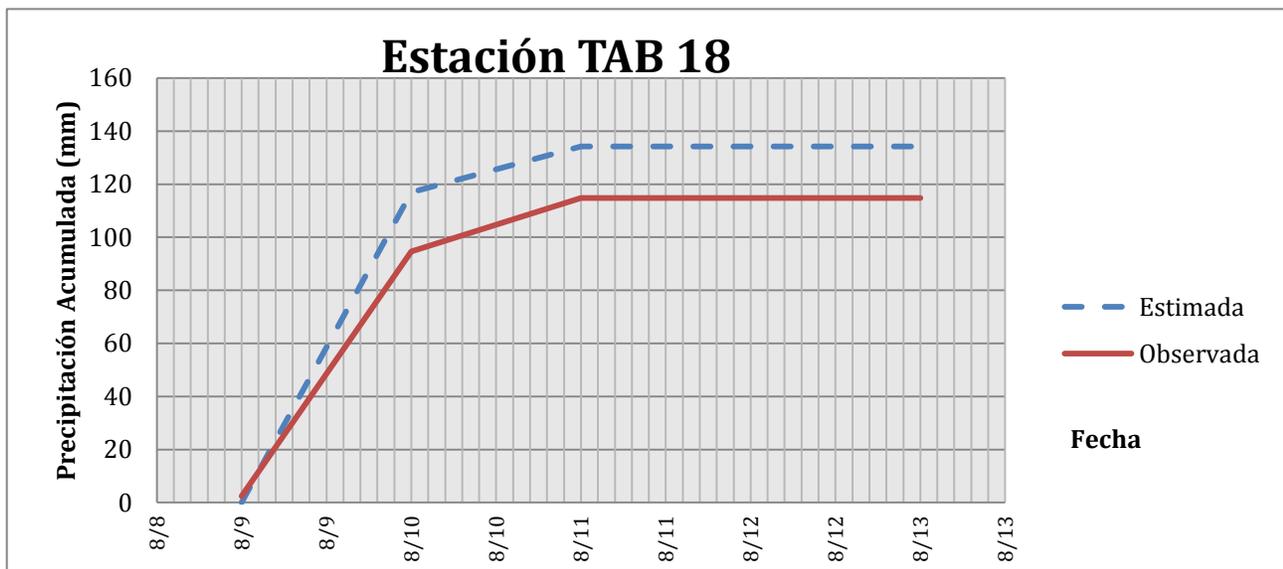


Figura 4.33 Curva masa generada con las lluvias estimadas vs las lluvias observadas en la estación TAB018

#### 4.4.12 Ajuste del modelo utilizando estaciones climatológicas

Hasta el momento todo lo que se ha descrito y aplicado en esta investigación es la estimación de lluvia que ofrecen los satélites. No es extraño que el resultado no sea el ideal ya que problemas de estimación con percepción remota tienen implícito un error de cálculo.

Para corregir este error utilizaremos las curvas masa que se obtuvieron en el punto 4.4.11 y ajustaremos la curva estimada a la curva observada, esto nos dará un factor de ajuste por estación el cual al ser aplicado generará un mejor ajuste entre lo estimado y lo observado. La metodología de ajuste fue la siguiente:

1. De dos curvas en una estación se observaron sus máximos y se dividió el máximo observado entre el máximo estimado. Generándose el factor de ajuste.
2. El factor de ajuste es aplicado a los valores de la curva masa estimada para generar la nueva estimación.
3. Se grafican las curvas para su mejor apreciación
4. Se obtienen los hietogramas de las curva masas para la aplicación del coeficiente de determinación ajustado

A continuación se exponen los resultados del análisis anterior expresados en la tabla # como los factores de ajuste por estación y los nuevos coeficientes de determinación obtenidos de la comparación de la lluvia observada en la estación con la estimación ajustada.

Tabla 4-27 Factores de ajuste y relaciones de coeficientes de determinación con los nuevos valores de lluvia

Ajuste con estaciones		
Estación	Factor de ajuste	$r^2$
TAB01	0.555	0.302
TAB02	1.648	0.781
TAB03	0.651	0.789
TAB04	1.176	0.799
TAB18	0.855	0.995
	Promedio	<b>0.733</b>

En las figuras 4.34 a la 4.38, se observan las nuevas curvas de ajuste obtenidas al multiplicar el factor de ajuste por estación a las estimaciones obtenidas.

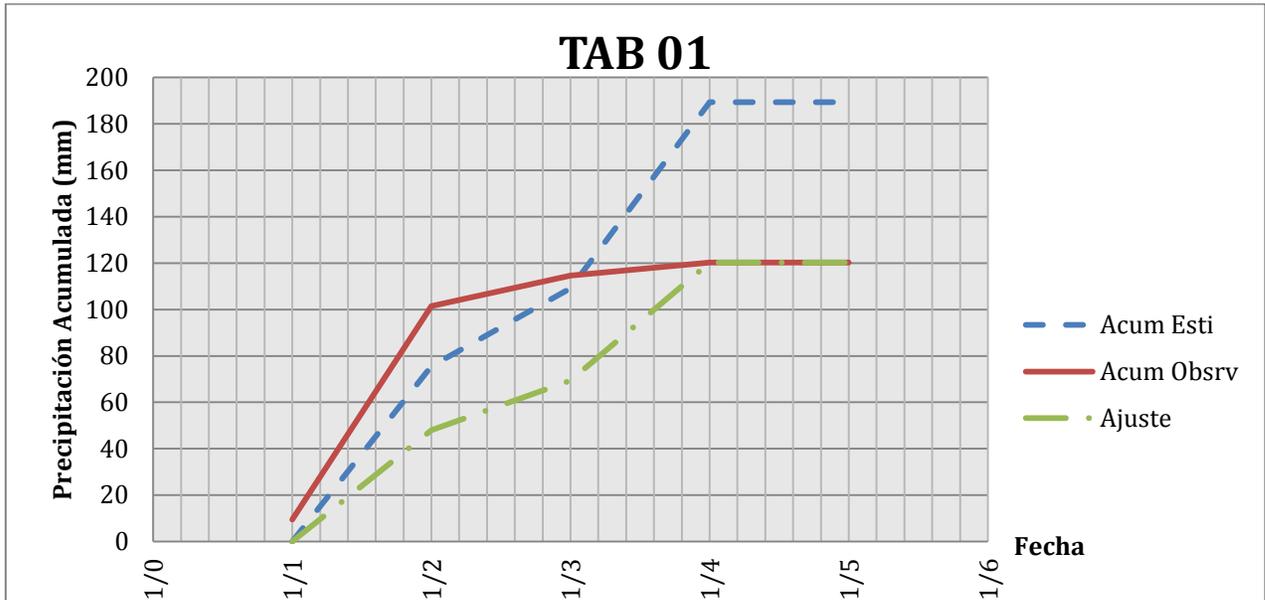


Figura 4.34 Curva masa de precipitación con curva de ajuste de la estación TAB01

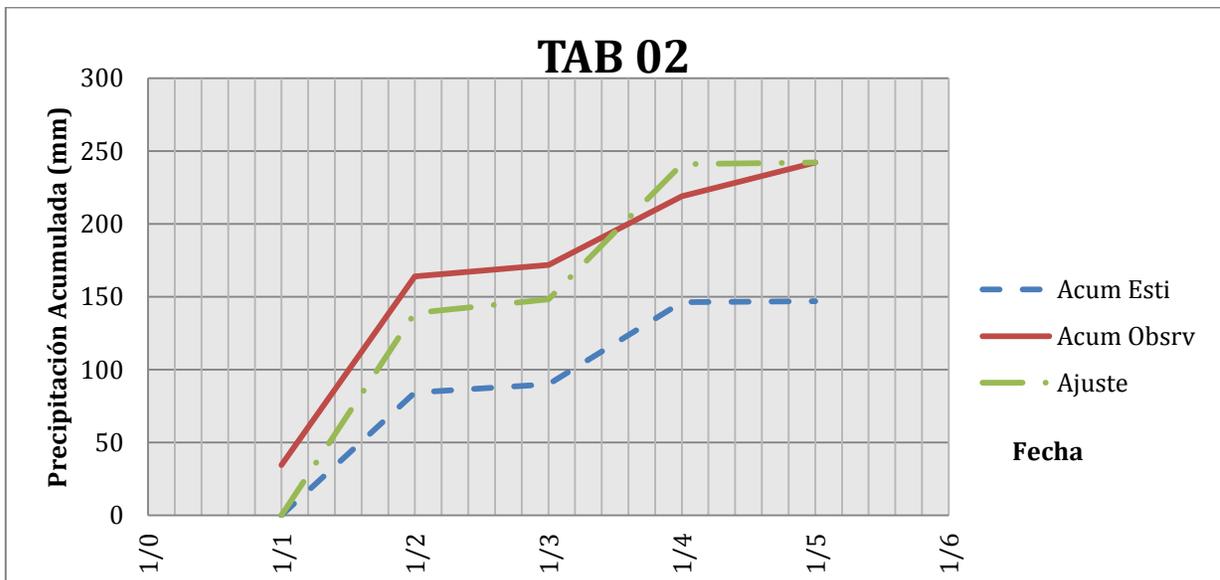


Figura 4.35 Curva masa de precipitación con curva de ajuste de la estación TAB02

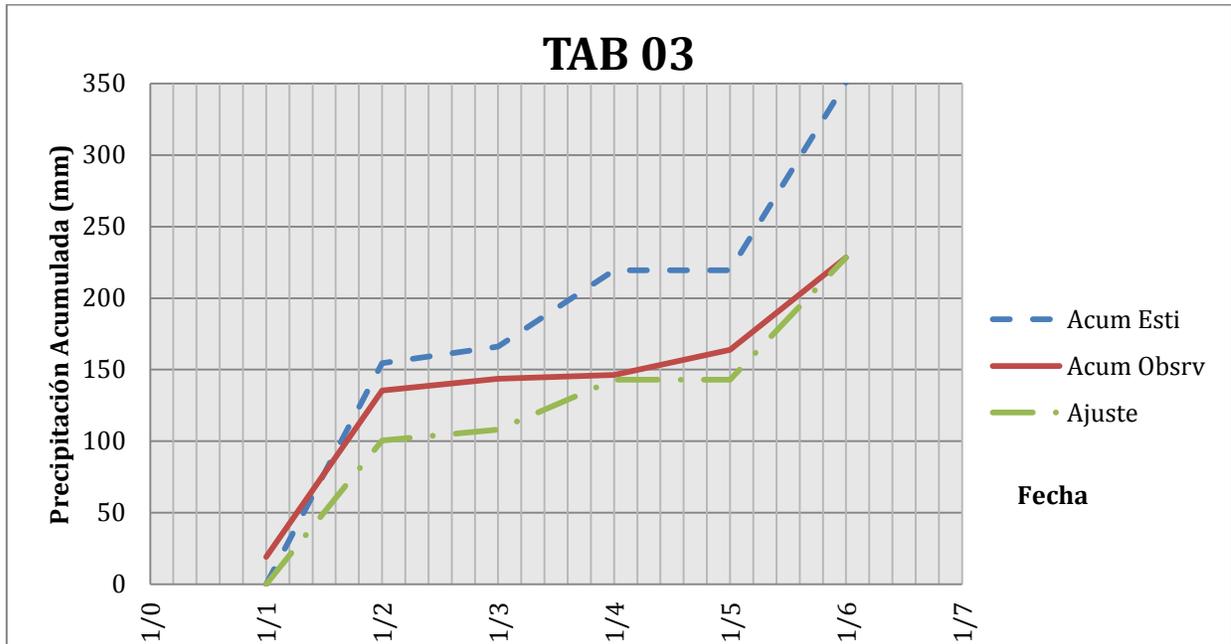


Figura 4.36 Curva masa de precipitación con curva de ajuste de la estación TAB03

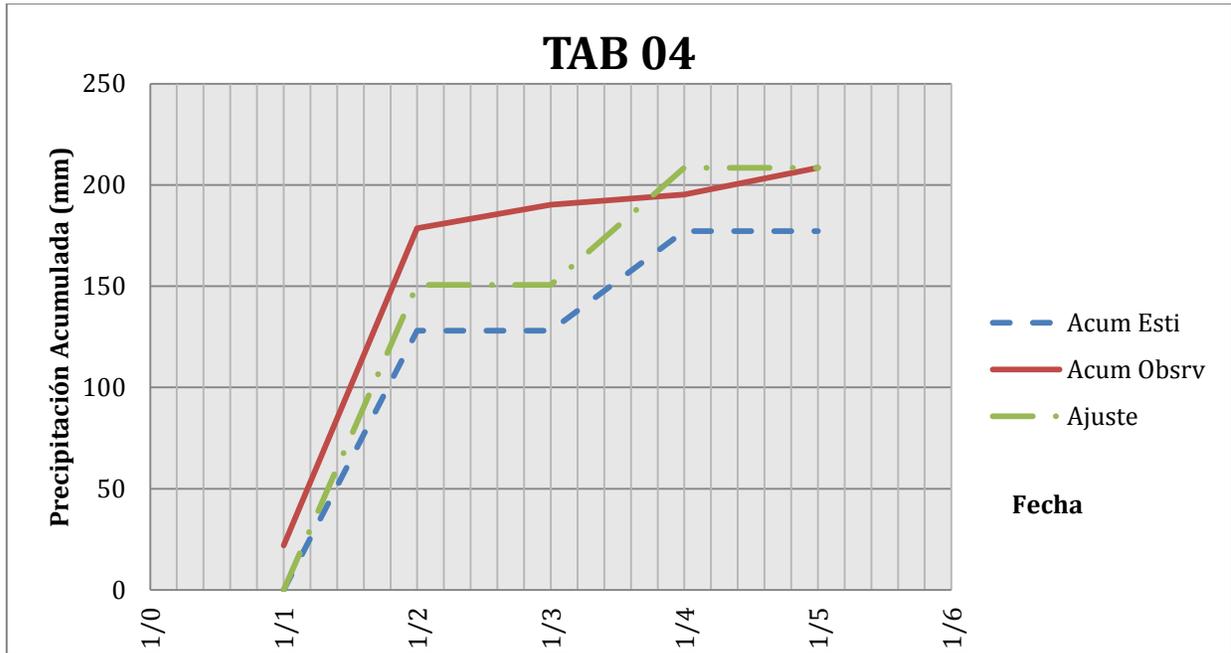


Figura 4.37 Curva masa de precipitación con curva de ajuste de la estación TAB04

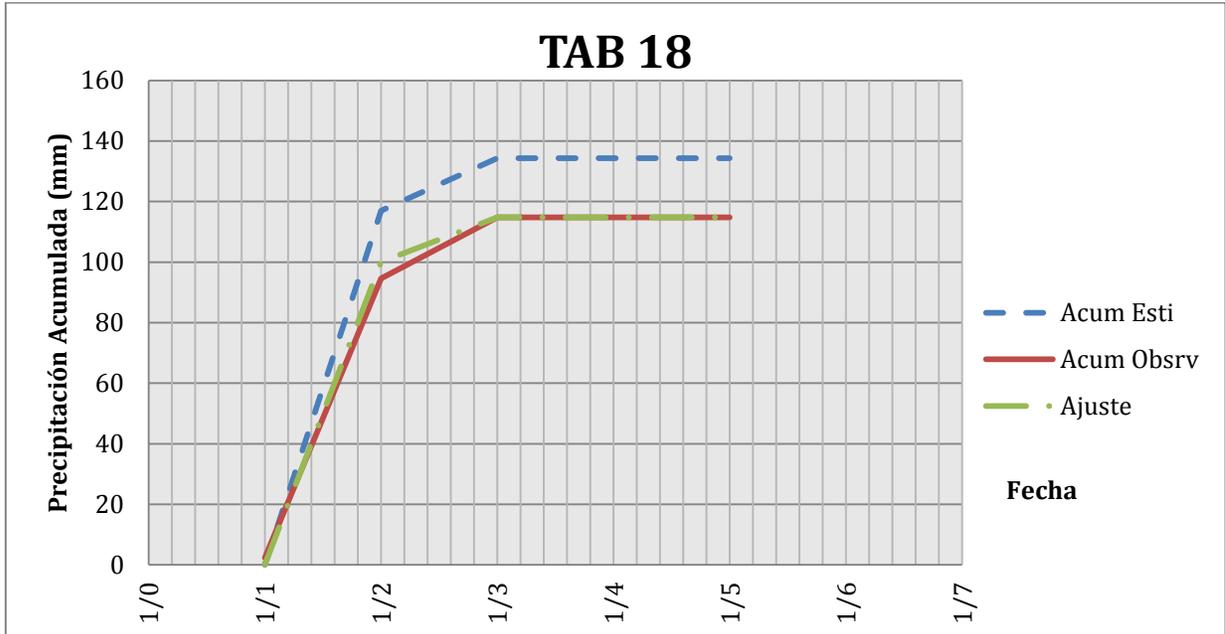


Figura 4.38 Curva masa de precipitación con curva de ajuste de la estación TAB18



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante entender que cualquier modelo numérico es susceptible a errores. Al no tener contacto directo con el medio físico se tiene que usar una serie de parámetros que nos e conocen con exactitud.

El modelo de estimación está en una etapa preliminar, los resultados mostraron una aproximación a los valores medidos que se considera no aceptable aun por lo que es necesario abundar más en este terreno, ya que los posibles resultados de un modelo como este podría ser un paso fundamental para un sistema de alerta temprana en el estado de tabasco para prevenir daños.

Los parámetros se modificaron conforme a las fórmulas explicadas en el capítulo 2.2.2.3, obteniendo la calibración actual, pero es recomendable que se mejore la calibración de esta etapa. Muchos países tienen funcionado un sistema similar al Hidroestimador que generar imágenes que representen láminas de lluvia en tiempo real, por lo que es recomendable estudiar sus modelos, compararlos con los nuestros y generar un modelo perfeccionado. El modelo en su versión actual tiende a subestimar en intensidades de lluvia grandes y sobre estimar en intensidades de lluvia pequeñas.

La súper o sub estimación se debe al manejo, interpretación y decodificación de los datos obtenidos de las imágenes de satélite. En concreto cuando se obtienen los valores normalizados ( $z_1$  y  $z_2$ ) ya que al tratar de identificar los centros de tormenta este busca el pixel con menor temperatura, lo promedia con los pixeles vecinos a este con un cierto radio y después se normaliza restando el valor del pixel a analizar y dividiéndolo por la

desviación estándar, el problema recae cuando la tormenta pueda tener más de un centro y este pueda no estar tan frío como el identificado como centro de tormenta por lo que le generará un valor negativo de  $z_1$  y por lo tanto no tendrá precipitación cuando pudiera este tenerla.

El interpretar las imágenes de satélite es parte esencial al generar valores normalizados ( $z_1$  y  $z_2$ ) que tomen en cuenta la distribución espacial de la tormenta y su evolución, lo que mejoraría la calibración del modelo.

Los factores de ajuste obtenidos con las estaciones terrenas fueron de gran ayuda en este trabajo, sin embargo estas se siguen considerando como ajustes puntuales lo que ajusta la estación y el pixel en donde se encuentra la estación pero los pixeles vecinos no, por lo que se recomienda la creación de un método para transmitir el factor de ajuste de los pixeles ajustados a los vecinos y así obtener una matriz de precipitaciones ajustadas.

Es necesario una evaluación del funcionamiento en las estaciones meteorológicas por parte de la CONAGUA y CFE, ya que se demostró en esta investigación que estas presentan irregularidades en los datos que reportan, lo cual influye en la calibración del modelo ya que no es posible realizarlo adecuadamente si no se cuenta con la información fidedigna de las estaciones ubicadas en la zona de estudio. Las estaciones meteorológicas forman un papel fundamental en la implantación de los modelos hidroclimatológicos, si bien no es posible instrumentar cada parte del territorio, se debería de tener un estricto control de calidad y mantenimiento. El trabajo de calibración propuesto para este modelo es proporcional con la calidad de la información proporcionada por las estaciones operadas por estas dos instituciones.

Al momento de observar las discrepancias entre la información generada por las estaciones automáticas y convencionales, se contactó al personal que administra esta información, quienes nos proporcionaron datos climáticos de mejor calidad lo cual indica que existe un problema durante el proceso y manipulación de la, ya que al parecer muchos datos se pierden en la acción de reportarlos.

Es necesario mejorar los canales de comunicación y verificar la calidad del proceso con estas instancias gubernamentales, y se podría hacer mediante el Instituto de ingeniería de la UNAM.

Si bien los defectos en la calidad de la información se deben a errores humanos también se notaron fallas técnicas en los equipos decodificadores.

Al analizar las imágenes de satélite uno de los mayores problemas fue el interpretar el tope de las nubes, ya que este genera un bloqueo visual de lo que pueda o no haber en la parte interna. Por ejemplo: Si en el pixel a analizar tenemos una nube baja generando tormenta y encima de ella una nube que no cumpla con las condiciones para que se presente la precipitación, en la imagen de satélite solo apreciaremos la nube superior obteniendo su temperatura (muy baja) y su contenido de vapor de agua (Casi nulo), lo que el modelo interpretaría como una precipitación nula mientras que en la realidad es lo contrario.

## Bibliografía

- 1.-APARICIO, FRANCISCO J., Fundamentos de hidrología de superficie
- 2.-BREÑA, AGUSTÍN F., principios y fundamentos de la hidrología de superficie
- 3.- MADEREY RASCON, LAURA ELENA, JIMENEZ ROMAN Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico
- 4.- FRANCISCO ELÍAS CASTILLO Agrometeorología
- 5- CAMPOS ARANDA, D.F., Procesos del ciclo hidrológico
- 6- Universidad Nacional de Asunción, Facultad politécnica  
<http://www.pol.una.py/?q=node/165>
- 7.- A Basic Introduction to Water Vapor Imagery  
[http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/misc/wv/wv\\_intro.html](http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/misc/wv/wv_intro.html)
- 8.- “ICECAP”: A GOES IMAGE PRODUCT DEPICTING AIRCRAFT ICING POTENTIAL AND MAXIMUM ICING ALTITUDE – Gary P. Ellrod NOAA/NESDIS office of research and applications
- 9.- EDUARDO RÍOS PATRÓN, INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Las cuencas Hidrológicas de México. Diagnóstico y priorización, México 2010.
- 10.- Meteorología y climatología, Fundación Española para la ciencia y la Tecnología, Unidad didáctica, Semana de la ciencia y la tecnología 2004
- 11.- GARCÍA, LUIS; VILA, DANIEL. Estimación de precipitación en una región de interés: aplicando CoSch a imágenes satelitales y datos pluviométricos.
- 12.- P. GOUROU Y L. PAPY. Compendio de Geografía General Editorial RIALP pag. 57
- 13.- Comisión Nacional del Agua Conagua - [www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx)

14. Organismo Frontera SUR -

<http://www.conagua.gob.mx/ocfs/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=31f127a3-aa1f-4173-b64d-3aefbd1eecbd%20Conócenos|1|0|0|0>

15.- “*Estimación de lluvia y escurrimiento en cuencas con pluviometría escasa con ayuda de imágenes de satélite*”- V. Díaz, J. J. Carrillo, G. Gutiérrez, G. E. Ortega & F. J. González - Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, D.F., México

16. Geostationary Operational Environmental Satellite - Wikipedia -

[http://es.wikipedia.org/wiki/Geostationary\\_Operational\\_Environmental\\_Satellite](http://es.wikipedia.org/wiki/Geostationary_Operational_Environmental_Satellite)

17.- NOAA Geostationary Satellite Server - <http://www.goes.noaa.gov/> -

18.- ESCALANTE SANDOVAL, Carlos Agustín y Lilia Reyes Chávez. Técnicas estadísticas en hidrología. 2ª. Ed., primera reimpresión, México, UNAM, Facultad de ingeniería, 2008.

19.- RAFAEL MUÑOZ CARPENA, AXEL RITTER RODRIGUEZ Hidrología agroforestal.

20.- P. KRAUSE, D.P. BOYLE, AND F. BÄSE. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment

21.-BERNARDINO ROIG SALA, ANNA VIDAL MELÓ. Fundamentos matemáticos de la ingeniería II

22.- ESCALANTE SANDOVAL, Carlos Agustín y Lilia Reyes Chávez. *Técnicas en hidrogeología*. 2ª. Ed., primera reimpresión, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2008, 298p.