



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN  
LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA**

**Walter Antonio Felipe Ajuchán**

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN  
LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**WALTER ANTONIO FELIPE AJUCHÁN**

ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Fredy Adolfo Alvarado Hernández
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 29 de febrero de 2016.

**Walter Antonio Felipe Ajuchán**

Guatemala, 31 de marzo de 2017

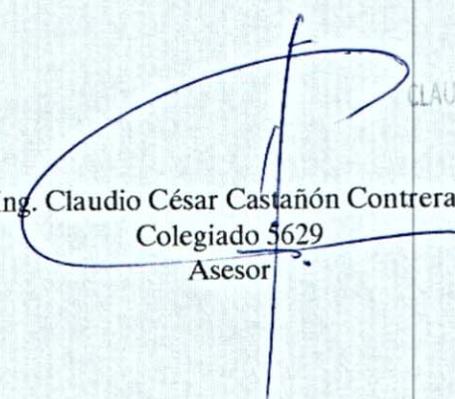
Ingeniero  
Claudio César Castañón Contreras  
Jefe Departamento de Hidráulica  
Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Castañón.

Luego de un cordial y breve saludo, mediante la presente le informo que he revisado el trabajo de graduación **DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Walter Antonio Felipe Ajuchán, habiéndolo encontrado satisfactorio en su contenido y resultados, por lo que me permito dar aprobación al mismo.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente,

  
Ing. Claudio César Castañón Contreras  
Colegiado 5629  
Asesor

CLAUDIO CESAR CASTAÑÓN CONTRERAS  
INGENIERO CIVIL  
COL. 5629



**USAC**  
 TRICENTENARIA  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
 FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
 24 de abril de 2017

Ingeniero  
 Hugo Leonel Montenegro Franco  
 Director Escuela Ingeniería Civil  
 Facultad de Ingeniería  
 Universidad de San Carlos

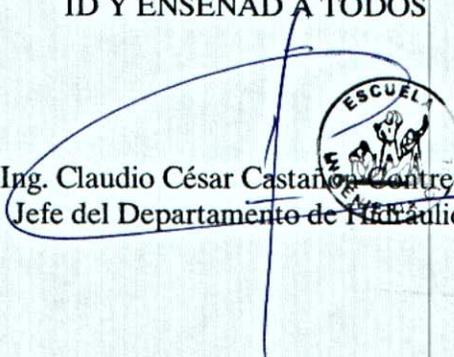
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Walter Antonio Felipe Ajuchán, quien contó con la asesoría del Ing. Claudio César Castañón Contreras.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO**  
**DE**  
**HIDRAULICA**  
**USAC**  
 Ing. Claudio César Castañón Contreras  
 Jefe del Departamento de Hidráulica

/bbdeb.



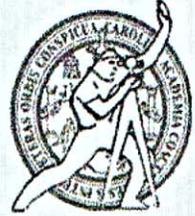
*Más de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Walter Antonio Felipe Ajuchán **DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN LLUVIA - ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DE RÍO CHIXOY, GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2017

/mrrm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

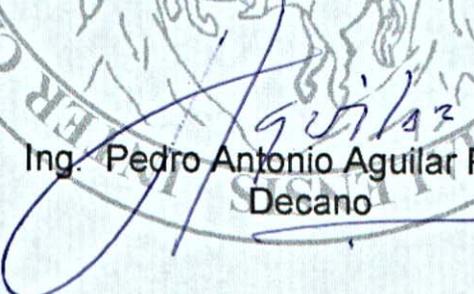


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.D.253.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DESARROLLO DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Walter Antonio Felipe Ajuchán** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, mayo de 2017

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la sabiduría para lograr esta meta.
<b>Mis padres</b>	Reginaldo Felipe y María Yanuaria Ajuchán. Por su amor y apoyo incondicional, este trabajo y toda mi vida serán siempre por y para ustedes.
<b>Mis hermanos</b>	Flor de María, Rolando, Hilda, Hermelinda y Byron. Por su apoyo y por ser un ejemplo por seguir en mi vida.
<b>Mi familia</b>	Abuelos, tíos y sobrinos. Por su cariño y darme ánimos para salir adelante.
<b>Mis primos</b>	Por su motivación y compañía durante toda mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por la oportunidad de estudiar en la mejor universidad del país.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme conocimientos que seguramente me servirán de mucho en mi vida profesional.
<b>Centro Educativo Técnico Laboral KINAL</b>	Por haberme enseñado a agradecer a Dios, el valor del estudio y hacer el trabajo bien hecho.
<b>Ing. Claudio Castañón</b>	Por su incondicional apoyo para poder desarrollar este trabajo.
<b>INDE</b>	Por su valioso apoyo para el desarrollo de este estudio.
<b>Mis amigos de la Universidad</b>	Eliú Méndez, Heike Wellmann, Alfredo Sánchez, David Ambrosio, John Lewis, Luis Santizo, Edwin Zárate, Yanner Juárez, Sergio Cardona, Bryan Sánchez, Melvin Pérez, Selvyn Abac, Guillermo Díaz, y a mis demás amigos. Por su ejemplo de esfuerzo y excelencia.
<b>Mis amigos de siempre</b>	Abner Martínez, Luis Gonzáles, Armin Gonzáles y Pedro Chavac.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Lluvia .....	1
1.1.1. Lluvia por convergencia .....	1
1.1.2. Lluvia orográfica .....	2
1.1.3. Lluvia convectiva .....	2
1.2. Escorrentía .....	5
1.2.1. Fuentes de escorrentía .....	5
1.3. Relación lluvia-escorrentía .....	6
1.4. Variabilidad climática .....	7
1.5. Impactos de la variabilidad climática .....	7
1.5.1. Impacto en la demanda de agua y el suministro de agua potable .....	8
1.5.2. Impacto en la salud pública .....	8
1.5.3. Impacto en la agricultura .....	8
1.5.4. Impacto en la generación eléctrica .....	9
1.6. Inundaciones .....	9
1.6.1. Análisis de riesgo de inundaciones.....	10

1.7.	Condiciones socioambientales en Guatemala y en la zona de estudio.....	11
1.7.1.	Índice de influencia humana en los ecosistemas terrestres de Guatemala.....	12
2.	ZONA DE ESTUDIO EN LA CUENCA.....	13
2.1.	Descripción de la zona de estudio .....	13
2.1.1.	Delimitación geográfica de la zona de estudio .....	13
2.1.1.1.	Departamentos incluidos .....	14
2.1.1.2.	Municipios incluidos .....	14
2.1.2.	Hidrografía.....	17
2.1.3.	Suelo .....	19
2.1.3.1.	Alfisoles .....	19
2.1.3.2.	Andisoles.....	19
2.1.3.3.	Entisoles.....	20
2.1.3.4.	Inceptisoles .....	20
2.1.3.5.	Mollisoles.....	20
2.1.4.	Vegetación .....	22
2.1.5.	Fisiografía.....	22
2.1.6.	Clima .....	25
2.1.6.1.	Características climáticas de la zona ...	25
2.2.	Estaciones meteorológicas e hidrométricas en el área de estudio.....	29
3.	PROCESAMIENTO DE DATOS .....	31
3.1.	Esquema general del proceso de modelado con la metodología IHACRES.....	31
3.2.	Recolección de datos .....	33
3.3.	Definición de los periodos de datos por utilizar .....	33

3.4.	Estimación de datos medios.....	34
3.4.1.	Estimación de la lluvia media del área de estudio ..	35
3.4.2.	Estimación de la temperatura media del área de estudio .....	38
3.4.3.	Datos de escorrentía utilizados para el estudio .....	41
3.4.4.	Datos medios estimados para el desarrollo de la modelación de la cuenca .....	41
3.4.4.1.	Diagramas de caja o <i>Box Plot</i> .....	41
4.	DESARROLLO DEL MODELADO CON LA METODOLOGÍA IHACRES .....	45
4.1.	Generalidades del <i>software</i> IHACRES .....	45
4.2.	Procesos de IHACRES.....	45
4.3.	Datos de entrada .....	48
4.4.	Datos resultantes.....	49
4.5.	Desarrollo de un modelo lluvia-escorrentía en el <i>software</i> IHACRES.....	49
4.5.1.	Importar datos.....	50
4.5.2.	Cargar datos .....	56
4.5.3.	Definición de periodo de calibración .....	57
4.5.4.	Calibraciones .....	58
4.5.4.1.	Módulo lineal.....	59
4.5.4.2.	Módulo no lineal.....	61
4.5.4.2.1.	Búsqueda de rejilla .....	62
4.5.4.2.2.	Análisis de rejilla 1 .....	63
4.5.5.	Simulación del modelo.....	66
4.5.6.	Otros resultados del modelo de salida.....	67
4.5.6.1.	Gráficos .....	67
4.5.6.2.	Resúmenes de los datos de salida.....	70

5.	RESULTADOS.....	73
5.1.	Definición de los periodos de calibración .....	74
5.2.	Primeras simulaciones .....	75
5.2.1.	Simulaciones para el periodo de datos 1985-2015 .....	75
5.2.1.1.	Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012 .....	75
5.2.1.2.	Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 1997 al 1 de enero de 2000 .....	76
5.2.2.	Simulaciones para el periodo de datos 1992-2015 .....	76
5.2.2.1.	Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012 .....	77
5.2.2.2.	Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 1997 al 1 de enero de 2000 .....	77
5.3.	Simulaciones con los datos de lluvia corridos un día hacia adelante .....	77
5.3.1.	Simulaciones para el periodo de datos 1992-2015 .....	78
5.3.1.1.	Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012 (MODELO 1) .....	78
5.3.1.2.	Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 1997 al 1 de enero de 2000 (MODELO 2) .....	82

5.4.	Modelos finales definidos .....	83
5.5.	Aplicación de los modelos desarrollados para pronóstico de datos de escorrentía .....	84
5.5.1.	¿Cómo pronosticar datos de escorrentía?.....	84
5.5.2.	Pronóstico de escorrentía con datos de lluvia y temperatura .....	85
5.5.3.	Pronóstico de escorrentía solamente con datos de lluvia .....	88
5.6.	Aplicación de los modelos desarrollados para completación de datos de escorrentía .....	90
5.6.1.	Completación de datos .....	92
5.7.	Modelado a escala mensual (MODELO 3) .....	96
5.8.	Resultados gráficos del estudio .....	98
CONCLUSIONES .....		103
RECOMENDACIONES .....		107
BIBLIOGRAFÍA.....		109
APÉNDICES .....		111



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Lluvia promedio anual en la república de Guatemala.....	4
2.	Departamentos en la zona de estudio.....	15
3.	Municipios en la zona de estudio .....	16
4.	Hidrografía en la zona de estudio .....	18
5.	Tipo de suelos en la zona .....	21
6.	Vegetación en la zona.....	23
7.	Fisiografía en la zona.....	24
8.	Humedad en la zona .....	27
9.	Temperatura en la zona .....	28
10.	Estaciones meteorológicas en la zona .....	30
11.	Esquema general del proceso de modelación .....	32
12.	Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la lluvia media del periodo 1985-2015.....	36
13.	Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la lluvia media del periodo 1992-2015.....	37
14.	Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la temperatura media del periodo 1985-2015.....	39
15.	Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la temperatura media del periodo 1992-2015.....	40
16.	<i>Box Plot</i> de los datos de lluvia total mensual, en mm, del periodo 1992-2015.....	42
17.	<i>Box Plot</i> de los datos de temperatura promedio mensual, en grados Celsius, del periodo 1992-2015.....	43

18.	<i>Box Plot</i> de los datos de escorrentía promedio mensual, en m <sup>3</sup> /s, del periodo 1992-2015 en la estación Chisiguán .....	43
19.	Resumen vacío de datos cargados.....	51
20.	Ventana para importación de datos .....	51
21.	Importación de datos de lluvia .....	52
22.	Mensaje de aceptación de importación de datos .....	53
23.	Importación de datos de escorrentía.....	53
24.	Ingreso de área de influencia de datos .....	54
25.	Importación de datos de temperatura .....	55
26.	Mensaje de importación correcta.....	55
27.	Resumen de datos cargados .....	56
28.	Gráficos de datos cargados .....	57
29.	Ingreso de periodo de calibración.....	58
30.	Ventana para calibración de módulos del modelo .....	59
31.	Calibración de módulo lineal.....	60
32.	Correlación de datos.....	61
33.	Calibración de módulo no lineal.....	62
34.	Rejilla desarrollada .....	63
35.	Análisis de la primera rejilla encontrada .....	64
36.	Resultados de calibración de módulo no lineal .....	65
37.	Mensaje de finalización de análisis de rejilla .....	65
38.	Resultados de calibración de módulo lineal y no lineal.....	66
39.	Resultado de la simulación .....	67
40.	Ventana para generación de gráficos .....	68
41.	Gráficos de escorrentía observada y modelada en diferentes ejes .....	69
42.	Ventana para generación de gráficos .....	69
43.	Gráficos de lluvia observada y escorrentía modelada en un mismo eje con diferentes escalas .....	70
44.	Resumen estadístico del modelo.....	71

45.	Resumen de la simulación del modelo.....	72
46.	Resumen de la calibración del modelo.....	72
47.	Correlación de datos .....	79
48.	Resumen estadístico del modelo .....	81
49.	Correlación de datos .....	82
50.	Resumen estadístico del modelo .....	83
51.	Resumen estadístico del modelo .....	86
52.	Resultado de la simulación .....	86
53.	Escorrentía modelada frente a escorrentía pronosticada.....	87
54.	Resumen estadístico del modelo .....	89
55.	Resultado de la simulación .....	89
56.	Escorrentía modelada frente a escorrentía pronosticada.....	90
57.	Resumen estadístico del modelo .....	93
58.	Resultado de la simulación .....	93
59.	Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 1 .....	94
60.	Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 2 .....	95
61.	Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 3 .....	95
62.	Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 4 .....	96
63.	Resumen estadístico del modelo .....	97
64.	MODELO 1: Para flujos de crecida, en m <sup>3</sup> /s .....	99
65.	MODELO 2: Para flujos bajos, en m <sup>3</sup> /s .....	100
66.	MODELO 3: Modelo a escala mensual, en m <sup>3</sup> /s .....	101

## TABLAS

I.	Estaciones utilizadas para el estudio .....	29
II.	Correspondencia entre los años que genera el <i>software</i> y el año del periodo de datos de estudio.....	80
III.	Periodos de prueba.....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>U1</b>	Autocorrelación del flujo de corriente.
<b>R<sup>2</sup></b>	Coeficiente de determinación.
<b>X1</b>	Correlación cruzada.
<b>f</b>	Dependencia de la temperatura de la velocidad de secado.
<b>Q</b>	Escorrentía.
<b>°C</b>	Grado celsius.
<b>km</b>	Kilómetro.
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetro cuadrado.
<b>P</b>	Lluvia.
<b>m</b>	Metro.
<b>cumecs</b>	Metros cúbicos por segundo.
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metros cúbicos por segundo.
<b>msnm</b>	Metros sobre nivel del mar.
<b>mm</b>	Milímetro.
<b>mm/yr</b>	Milímetros por año.
<b>N</b>	Norte.
<b>%</b>	Porcentajes.
<b>p</b>	Potencia de la humedad del suelo.
<b>tref</b>	Temperatura de referencia.
<b>c</b>	Término de balance de masa.
<b>I</b>	Umbral de humedad para la producción de flujo.

<b>R2_sqrt</b>	Variación de $R^2$ dando menos peso a los flujos máximos.
<b>R2_log</b>	Variación de $R^2$ dando igual peso a todos los percentiles del flujo.
<b>R2_inv</b>	Variación de $R^2$ dando más peso a los flujos bajos.
<b>tw</b>	Velocidad de secado a temperatura de referencia.

## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del mercado mayorista. Entidad encargada de la coordinación de centrales generadoras de energía eléctrica en Guatemala.
<b>ANU</b>	Universidad Nacional de Australia ( <i>Australian National University</i> ).
<b>DATUM WGS 84</b>	Sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto en la Tierra.
<b>Estación hidrométrica</b>	Estación de medición que registra niveles y caudales de ríos.
<b>Estación meteorológica</b>	Estación de medición de variables climáticas.
<b>iCAM</b>	Centro integrado de evaluación y gestión de cuencas ( <i>Integrated Catchment Assessment and Management Centre</i> ).
<b>IHACRES</b>	Identificación de datos de hidrogramas unitarios y componentes de flujo de precipitación, evaporación y caudales ( <i>Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data</i> ).

<b>INDE</b>	Instituto Nacional de Electrificación.
<b>INSIVIMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b><i>Software</i></b>	Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas que permiten a la computadora ejecutar distintas tareas.
<b>UTM</b>	Sistema de coordenada universal transversal de Mercator.
<b>MAGA</b>	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrollaron dos modelos de la relación dinámica entre la lluvia y la escorrentía en la cuenca alta del río Chixoy, para realizar pronósticos de datos de escorrentía en la zona, utilizando la metodología de modelado IHACRES. Uno de los modelos desarrollados pronostica con mucha eficiencia los picos altos y el otro hace lo mismo con las mediciones bajas.

En el primer capítulo se describen conceptos fundamentales que ayudan a comprender la manera en la que el clima se comporta en Guatemala, conceptos como la variabilidad climática y el impacto que puede provocar si ocurren eventos naturales extremos que no sean pronosticados.

En el segundo capítulo se hace la delimitación geográfica del área que se utilizó para la modelación lluvia-escorrentía. En el tercer capítulo se hace el procesamiento de los datos recolectados, en el cual se definen los periodos de datos que se utilizaron para los diferentes análisis y se describe el proceso utilizado para la estimación de los datos medios históricos que sirvieron para el modelado de toda la zona de estudio.

En el cuarto capítulo se presenta el proceso que se debe realizar para desarrollar un proyecto con el *software* utilizado en el estudio. En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos después de múltiples simulaciones, se muestran los modelos finales desarrollados y la manera de aplicarlos para pronóstico y completación de datos de escorrentía a escala diaria.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar un modelo que represente la relación dinámica entre la lluvia y la escorrentía en la cuenca alta del río Chixoy.

### **Específicos**

1. Determinar el ajuste que presenta el modelo desarrollado con las condiciones naturales históricas reales de la cuenca, mediante el uso de la metodología de modelado IHACRES.
2. Identificar la manera en la que la variabilidad climática afecta el comportamiento de la relación lluvia-escorrentía.
3. Crear una herramienta útil para estudios de análisis de riesgo de inundaciones en la cuenca alta del río Chixoy.
4. Ayudar al desarrollo de pronósticos de datos de escorrentía en la zona de estudio.
5. Contribuir al entendimiento del ciclo hidrológico en la cuenca alta del río Chixoy.



## INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática y las condiciones socioambientales que actualmente se viven en Guatemala y en todo el mundo, hacen que la vulnerabilidad a los fenómenos naturales haya aumentado. El caudal que escurre en las cuencas debido a las lluvias, es uno de varios factores hidrológicos que se ven afectados por la variabilidad climática, en Guatemala se ha estudiado muy poco el proceso lluvia-escorrentía en las cuencas, por lo que es un país bastante vulnerable a inundaciones.

El uso de *software* diseñado para la creación de modelos que caractericen la relación lluvia-escorrentía, facilita el estudio del clima en cualquier zona en la que se cuente con suficientes estaciones de medición de datos meteorológicos e hidrométricos. Existe una amplia gama de *software* que permite la creación de este tipo de modelos; en este estudio se utiliza la metodología de modelado IHACRES, desarrollada principalmente por la ANU y el iCAM.

En el presente estudio se desarrolla la calibración de modelos que ayudan a describir el comportamiento de la relación dinámica entre la lluvia y la escorrentía de los últimos años en una parte de la cuenca alta del río Chixoy. Esto será de mucha ayuda para pronosticar datos de escorrentía a escala diaria y mensual en la estación hidrométrica utilizada para el análisis, tomando en cuenta los registros históricos de las estaciones meteorológicas en funcionamiento distribuidas en toda la zona de estudio.

Si se desarrollan modelos similares en otras cuencas del país, además de ser una buena herramienta para estudios de análisis de riesgo de inundaciones

y para entender el ciclo hidrológico de la zona, pueden ser una buena herramienta para proyectar datos de escorrentía que pueden ser utilizados en el campo de la generación hidroeléctrica del país. Ya que entidades como el Administrador del mercado mayorista (AMM), requieren de proyecciones de datos de escorrentía diaria, mensual, semanal y anual, para determinar la energía de la que se dispondrá en las centrales hidroeléctricas del país y así realizar programas de la operación de todas las centrales generadoras en Guatemala.

Para el estudio se desarrollan modelos a escala diaria y mensual, pero la metodología utilizada para el modelado también permite realizar simulaciones a escala semanal y anual, que permitirían pronosticar datos de escurrimiento en esas escalas de tiempo. Lo que se presenta en este estudio puede ser una excelente base para desarrollar modelos lluvia-escorrentía en las demás cuencas del país y así contribuir al entendimiento del ciclo hidrológico actual tomando en cuenta los impactos que la variabilidad climática ha marcado a lo largo de la historia en Guatemala. Además, también contribuye al campo de la generación hidroeléctrica del país.

# 1. GENERALIDADES

Para comprender el desarrollo de este trabajo es necesario conocer algunos conceptos hidrológicos generales, a continuación se muestran los más importantes de ellos, los cuales se enfocarán en la república de Guatemala.

## 1.1. Lluvia

“Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua”.<sup>1</sup> La precipitación puede presentarse en varias formas como granizo, nieve, bolas de hielo, llovizna, lluvia, entre otras. En Guatemala generalmente la precipitación solamente se da en forma de lluvia, llovizna y granizo y por la frecuencia con que ocurre, la más importante es la lluvia. Existen tres tipos de lluvias: ciclónica, orográfica y convectiva, a continuación se definen.

### 1.1.1. Lluvia por convergencia

Se subdivide en tres tipos: por convergencia, ciclones y frentes.

La primera se da en el caso en que dos masas de, aproximadamente, la misma temperatura y que viajan en direcciones opuestas, se chocan en un mismo nivel. Dicho encuentro hace que las dos masas se eleven.

---

<sup>1</sup> APARICIO, Francisco. *Fundamentos de hidrología de superficie*. pág. 113.

El ciclón es una masa de aire circular con baja presión que gira en el sentido contrario al de las manecillas del reloj en el hemisferio norte. La masa tiene en su centro el ojo del ciclón, en el cual la presión es baja comparada con la masa de aire, lo que hace que este sistema funcione como una chimenea haciendo ascender el aire. El anticiclón es de alta presión circular, que gira en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte.

Un frente se forma cuando una masa de aire en movimiento encuentra otra masa de aire con diferente temperatura. Si la masa de aire en movimiento es fría y encuentra una masa con mayor temperatura, el aire de la segunda masa, por ser menos denso, se eleva sobre la primera capa formando un frente frío. Si la masa de aire en movimiento con mayor temperatura encuentra una masa de aire frío, se forma entonces un frente cálido.<sup>2</sup>

### **1.1.2. Lluvia orográfica**

Esta lluvia resulta del ascenso sobre una cadena montañosa de aire húmedo que generalmente viene desde el mar. En terrenos quebrados la influencia orográfica es tan marcada que los patrones de las tormentas generalmente tienden a parecerse a los de la precipitación media anual.<sup>3</sup>

### **1.1.3. Lluvia convectiva**

En este tipo de lluvias el ascenso es causado por la elevación del aire cálido y húmedo, como resultado de una inestabilidad vertical en un área de baja presión, en decir, es el ascenso de aire sobrecalentado. Las lluvias convectivas son puntuales, intensas, de corta duración y varían rápidamente de

---

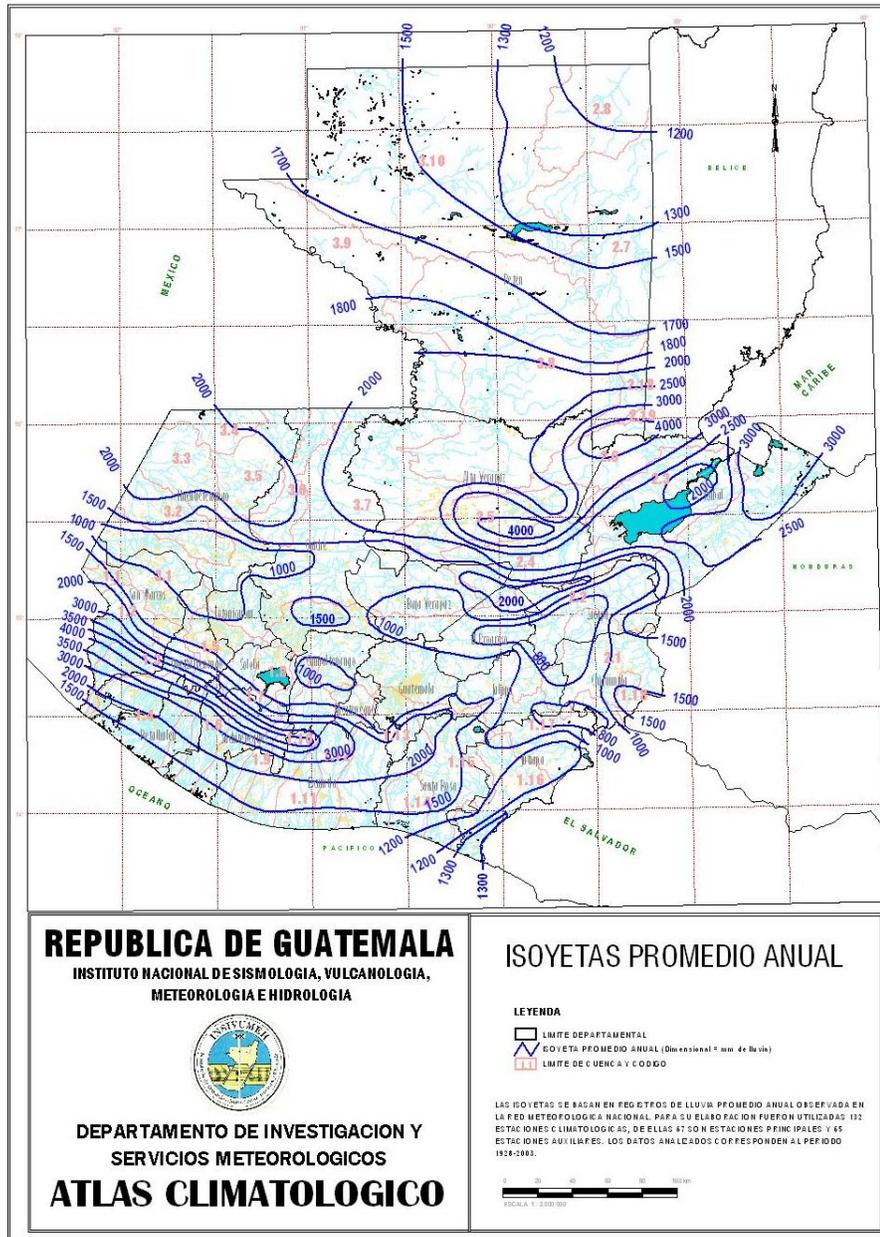
<sup>2</sup> MONSALVE, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. págs. 81 y 82.

<sup>3</sup> LINSLEY, Ray y otros. *Hidrología para ingenieros*. pág. 50.

ligeras lloviznas a aguaceros intensos. Estas lluvias son las que más frecuentemente se presentan en toda la república de Guatemala.

En Guatemala la lluvia es bastante variable de un lugar a otro, incluso en áreas pequeñas la cantidad de lluvia promedio anual varía. En la figura que se presenta a continuación se puede observar cómo las lluvias son bastante variadas en todo el país.

Figura 1. Lluvia promedio anual en la república de Guatemala



Fuente: INSIVUMEH. *Atlas hidrológico de la república de Guatemala.*

[http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS\\_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas\\_Climatologico/isojetas.jpg](http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/isojetas.jpg). Fecha de consulta: marzo de 2017.

## **1.2. Escorrentía**

La escorrentía o escurrimiento es la porción de la lluvia que corre sobre o por debajo de la superficie y llega a una corriente para luego ser drenada hacia un cuerpo de agua.

### **1.2.1. Fuentes de escorrentía**

Las fuentes principales de la escorrentía en cauces se pueden clasificar en tres tipos: escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y escorrentía subterránea.

Cuando la lluvia llega al suelo se comienza el proceso de infiltración hasta que el suelo se satura y pierde capacidad de infiltración. Luego de la saturación se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Esta escorrentía, llamada flujo en la superficie del terreno se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos. En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Una vez que llega a un cauce bien definido se convierte en escorrentía en corrientes. El flujo sobre el terreno, junto con la escorrentía en corrientes, forma la escorrentía superficial.

A la parte del agua de lluvia que se infiltra y escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él, se le llama escorrentía subsuperficial. La otra parte de la lluvia que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escorrentía subterránea.

La escorrentía superficial es la que llega con mayor rapidez a la salida de la cuenca y la escorrentía subterránea es la que más tiempo tarda en llegar. La escorrentía subsuperficial está entre las dos anteriores, puede ser tan rápida como la superficial o tan lenta como la subterránea dependiendo de las características del suelo.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán datos históricos de escorrentía superficial, los cuales han sido documentados en las estaciones hidrométricas del INDE.

### **1.3. Relación lluvia-escorrentía**

Uno de los principales objetivos de la hidrología superficial es determinar la cantidad de escorrentía que una determinada lluvia generará. Debido a que en gran parte del mundo no se cuenta con los registros de escorrentía, se han establecido métodos que permiten estimar la cantidad de escorrentía mediante datos de lluvia y características de la cuenca. Existen varios métodos como: la fórmula racional, método de envolventes, de hidrogramas unitarios, entre otros.

Debido a que para este trabajo sí se cuenta con datos de lluvia y escorrentía adecuados y que lo que se busca es desarrollar un modelo estadístico, los métodos anteriormente mencionados no se utilizarán.

El modelo se realizará con el mismo fin de los métodos ya existentes, para estimar la cantidad de escorrentía que las lluvias producen en determinadas épocas del año, en una parte de la cuenca alta del río Chixoy.

#### **1.4. Variabilidad climática**

Desde hace varios años la región centroamericana ha venido experimentando cambios bastante notables en su clima, tanto en temperatura como en la variabilidad interanual de las lluvias. Se ha notado que se han alterado los patrones normales de lluvia, y también la periodicidad, intensidad y duración de diversos fenómenos climáticos extremos.<sup>4</sup>

Los fenómenos climáticos extremos afectan a menudo la infraestructura, la producción agrícola y la salud, lo cual provoca alteraciones en el desarrollo de la región afectada por los cambios notables de clima. Por esto se hace necesario conocer el patrón histórico de lluvias y la esorrentía que estas producen para tener una idea bastante clara de cómo se comporta el clima en alguna región específica. Una de las formas de conocer esto es realizando un estudio estadístico de datos registrados en estaciones meteorológicas e hidrométricas para obtener un modelo que idealice el comportamiento histórico del clima y en específico de las lluvias que son los datos que se necesitan en varias aplicaciones de ingeniería.

#### **1.5. Impactos de la variabilidad climática**

Los fenómenos climáticos extremos, tanto secos como lluviosos, pueden causar grandes impactos en varias de las principales actividades del país. Reducir los impactos que a continuación se describen debería ser uno de los principales objetivos de los estudios hidrológicos en las distintas zonas climáticas de Guatemala y esto solamente se logra realizando estudios de análisis de riesgos.

---

<sup>4</sup> TABORA, Fabiola y otros. *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica*, 2011. págs. 117-126.

### **1.5.1. Impacto en la demanda de agua y el suministro de agua potable**

Según estudios realizados en Centroamérica, se espera un declive en la disponibilidad del recurso hídrico en los próximos años. En algunos países de la región, como Guatemala, se esperan desequilibrios entre la demanda y la oferta del agua potable.<sup>5</sup>

### **1.5.2. Impacto en la salud pública**

El mayor impacto en la salud se da en los periodos de menor precipitación, en estos se agudizan los brotes de enfermedades infecciosas y de transmisión vectorial como el dengue y el paludismo. También se incrementa el número de personas con enfermedades gastrointestinales como la tifoidea y la paratifoidea.

### **1.5.3. Impacto en la agricultura**

La región centroamericana está expuesta a una alta variabilidad climática interanual. Los fenómenos de El Niño y La Niña, que se presentan con frecuencia en la región ocasionan pérdidas significativas en el sector agrícola.

Los periodos de mayor precipitación incrementan la escorrentía superficial, provocando mayor erosión en los suelos, inundaciones y aumento en enfermedades patógenas en los cultivos. Los periodos de menor precipitación afectan la capacidad productiva de las tierras.

---

<sup>5</sup> TABORA, Fabiola y otros. *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica, 2011.* pág. 39.

#### **1.5.4. Impacto en la generación eléctrica**

Los fenómenos climáticos son una fuente muy importante de generación eléctrica en Guatemala. Las generadoras hidroeléctricas funcionan cuando tienen el recurso hídrico suficiente, lo cual se da en las épocas lluviosas. La falta de recursos hídricos hace necesario el uso de otros tipos de generación eléctrica los cuales podrían dañar las condiciones ambientales del país.

Todos los impactos que causa la variabilidad climática, descritos en esta sección, se basan en el *Estudio de los recursos hídricos en Centroamérica* de la Asociación mundial para el agua, citado en la bibliografía del presente documento.

#### **1.6. Inundaciones**

Las inundaciones generalmente se producen por fenómenos climáticos extremos lluviosos y pueden afectar fácilmente la infraestructura de la región, así como la economía y la salud de los pobladores. Otra causa de inundaciones es el desborde de cauces y las consecuencias que genera son similares a las que ocasionan las inundaciones provocadas por lluvias.

La zona de Guatemala más vulnerable a inundaciones es la vertiente del Pacífico, como consecuencia de las condiciones topográficas con cuencas de respuesta rápida (corto recorrido y fuertes pendientes) y una relativamente alta precipitación en las partes altas, concentrada en seis meses del año. Otras zonas susceptibles a inundaciones son las cuencas de los ríos Polochic y Motagua. En las cuencas que drenan al Golfo de México (zona de Petén) se

producen grandes inundaciones, pero la baja densidad de población disminuye el efecto negativo que puedan causar.<sup>6</sup>

La zona de la cuenca alta del río Chixoy no está catalogada como un área con riesgo de inundaciones, excepto algunas regiones de El Quiché y Huehuetenango.

En Guatemala se han instalado sistemas de alerta temprana para reducir el impacto de fenómenos naturales como inundaciones, pero son muy pocas las regiones que cuentan con estos sistemas.

En la zona de estudio no se cuenta con este tipo de sistemas por lo que realizar un análisis de riesgo de inundaciones es un poco difícil, ya que tampoco existen estudios que describan el comportamiento de la escorrentía que se produce debido a las lluvias. Construir sistemas de alerta temprana conlleva un gasto muy grande, por lo que realizar modelos con datos históricos para distintas regiones del país, que muestren la escorrentía en función de las lluvias, ayudará a realizar análisis de riesgos los cuales pueden reducir el impacto de este y otros fenómenos naturales que se presenten en las regiones analizadas.

### **1.6.1. Análisis de riesgo de inundaciones**

Para analizar el riesgo de inundaciones se consideran factores basados en variables físicas y humanas. El primer factor es el peligro, y depende solamente de las variables físicas como las precipitaciones, independiente del uso de suelo del sector posible de inundarse. El segundo factor es la vulnerabilidad, y representa las variables socioeconómicas y tecnológicas, la

---

<sup>6</sup> CARRERA, Jaime y otros. *Situación del recurso hídrico en Guatemala, 2005*. pág. 23.

vulnerabilidad es igual de un área a otra si el tipo de suelo y su uso no cambian, pero también puede diferir en una misma área si el uso del suelo es diferente.

Como se mencionó anteriormente, en la zona de estudio solamente unos municipios de El Quiché y Huehuetenango presentan riesgo de inundación. Específicamente, los municipios son: Sacapulas en El Quiché y Aguacatán en Huehuetenango, según datos obtenidos del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA).

Lo que se busca con este trabajo es generar datos que puedan ser utilizados para realizar estudios de análisis de riesgo de inundaciones en los demás municipios de la región en que se modelará estadísticamente el comportamiento de la relación lluvia-escorrentía con datos históricos.

### **1.7. Condiciones socioambientales en Guatemala y en la zona de estudio**

Los niveles de degradación del ambiente y las enormes desigualdades económicas y sociales son los resultados de una gestión deficiente del territorio nacional. Aunque es muy necesario mejorar la calidad de vida de los guatemaltecos, esto se debe hacer sin alterar para mal las condiciones ambientales actuales del país. Se debe buscar que las personas sepan consumir no más de lo que producen tanto en agricultura, ganadería, y otros. Además, se debe educar a las personas para que cuiden las áreas protegidas que muchas veces son explotadas para extraer la madera de sus árboles u otras riquezas naturales y así lograr reducir la invasión de los ecosistemas terrestres del país.

### **1.7.1. Índice de influencia humana en los ecosistemas terrestres de Guatemala**

El índice de influencia humana en 2005 para Guatemala revela que únicamente el 3 % de la superficie de la tierra tiene una influencia baja.

Una quinta parte del país tiene una influencia media baja, principalmente en el departamento de Petén; dos quintas partes tienen una influencia media, como los departamentos de Totonicapán, Sololá, Huehuetenango, San Marcos, Quiché, Izabal, Chimaltenango y Quetzaltenango. Más de un tercio del territorio tiene influencia media alta, principalmente en Jalapa, Suchitepéquez, Chiquimula, Retalhuleu, Baja Verapaz, El Progreso, Jutiapa, Zacapa, Santa Rosa y Alta Verapaz. Únicamente el 4 % de los ecosistemas terrestres del país tiene una ocupación alta, tal es el caso del departamento de Guatemala.<sup>7</sup>

Lo anterior indica que el índice de influencia humana en la zona de estudio, que comprende principalmente los departamentos de Quiché, Totonicapán y Huehuetenango, se califica como influencia media, esto hace que algunas partes de la zona sean vulnerables a inundaciones en épocas lluviosas.

---

<sup>7</sup> CLEAVES, Cecilia y GÁLVEZ, Juventino. *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012*. pág. 95.

## **2. ZONA DE ESTUDIO EN LA CUENCA**

En este capítulo se muestran algunas de las características más importantes de la zona de estudio, esto ayudará a conocer la situación actual de temas como: hidrografía, suelo, vegetación, entre otros aspectos que se muestran a continuación, referidos a la zona de estudio.

### **2.1. Descripción de la zona de estudio**

La cuenca del río Chixoy se encuentra ubicada en la zona central de Guatemala, la parte alta y media de la cuenca cubre los departamentos Quiché, Alta Verapaz y Baja Verapaz y algunas partes de Huehuetenango y Totonicapán. La altura máxima se estima en 3 800 msnm, en los Cuchumatanes, y la mínima en 650 msnm, en el embalse de Pueblo Viejo Chixoy. Este estudio se enfoca en una parte de las tres regiones de la cuenca, la alta del río Chixoy. A continuación se presenta la zona específica de estudio, además, algunas de sus características.

#### **2.1.1. Delimitación geográfica de la zona de estudio**

La zona de la cuenca alta del río Chixoy elegida para la realización de este estudio, cubre completamente las subcuencas del río Blanco y Pucal-Cacá, además, una parte de la subcuenca del río Cubulco. La zona total de estudio tiene un área de 2 292 km<sup>2</sup>, que va desde la parte más alta, en el municipio de Todos Santos Cuchumatán, hasta la parte más baja, en la estación hidrométrica Chisiguán, ubicada en el municipio de Sacapulas.

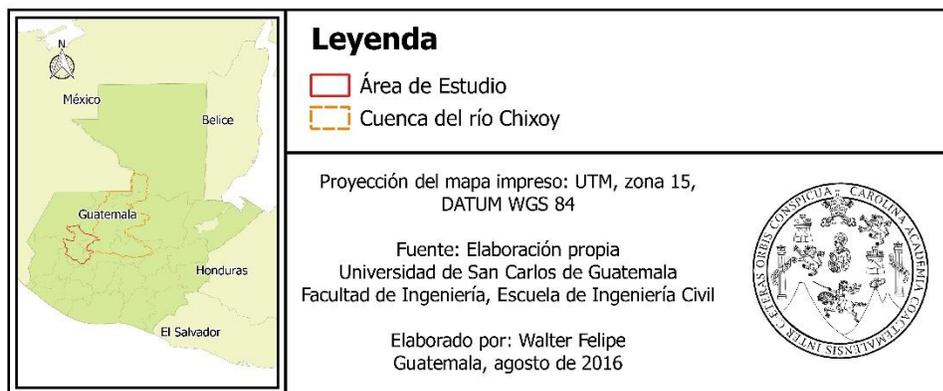
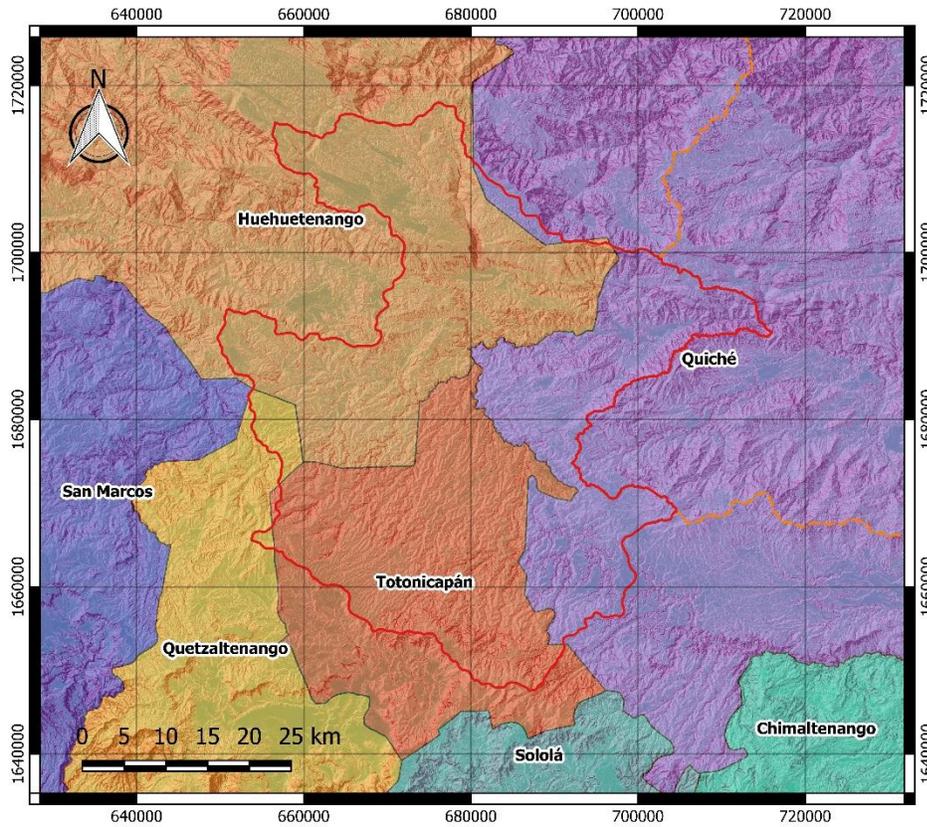
### **2.1.1.1. Departamentos incluidos**

Los departamentos incluidos en la zona de estudio son: Quiché, Totonicapán, Huehuetenango, San Marcos y Quetzaltenango, solamente parte de ellos, no se cubre en su totalidad la superficie de cada departamento.

### **2.1.1.2. Municipios incluidos**

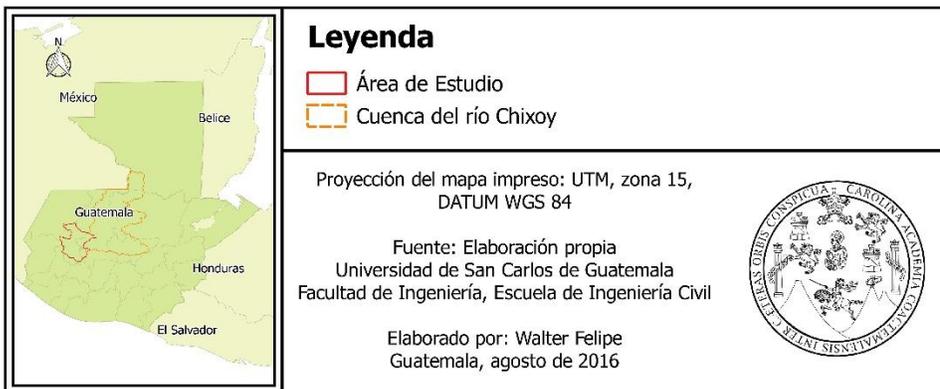
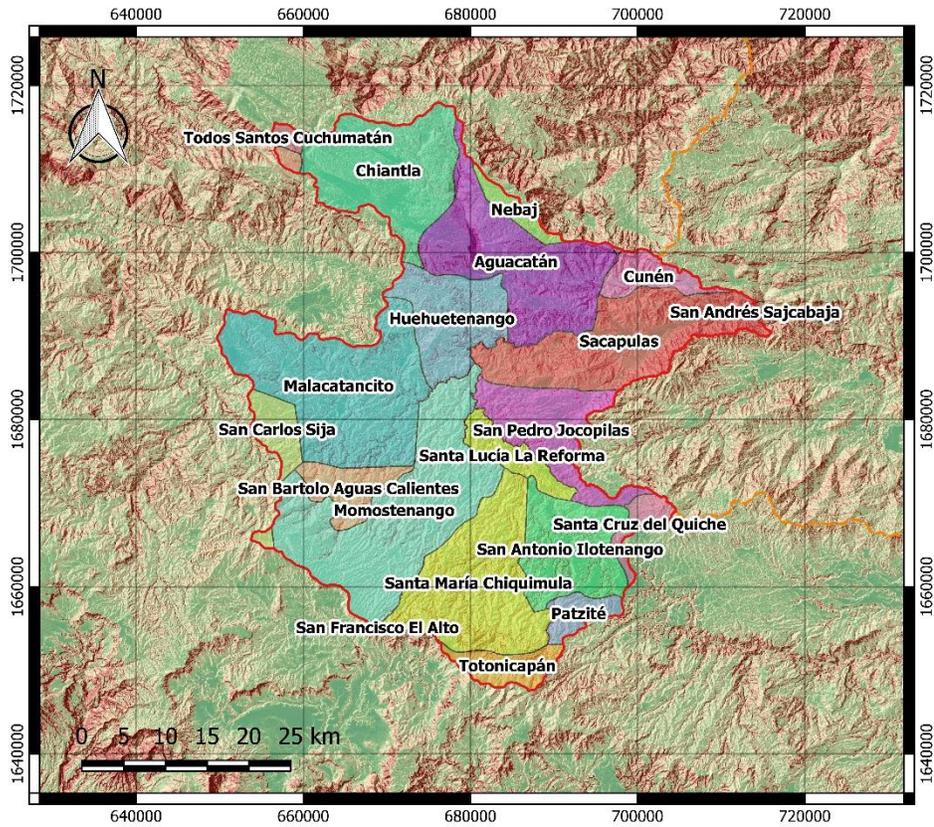
Los municipios que son parte de la zona de estudio son: de El Quiché: Nebaj, San Juan Cotzal, Cunén, San Andrés Sajcabajá, San Pedro Jocopilas, San Antonio Ilostenango, Santa Cruz del Quiché, Patzité y Sacapulas. De Totonicapán; Momostenango, Santa Lucía la Reforma, San Bartolo Aguas Calientes, Santa María Chiquimula, San Francisco el Alto y Totonicapán,.De San Marcos: Sipacapa, de Huehuetenango; Chiantla, Todos Santos Cuchumatán, Aguacatán, San Sebastián Huehuetenango, Malacatancillo y Huehuetenango, de Quetzaltenango: San Carlos Sija.

Figura 2. Departamentos en la zona de estudio



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

Figura 3. Municipios en la zona de estudio



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

### **2.1.2. Hidrografía**

La hidrografía se refiere a la descripción de los mares, los lagos, los ríos y a cualquier otro cuerpo de agua que existe en un lugar. Es importante para este estudio saber cuáles son los cuerpos de agua presentes en la zona para realizar un correcto análisis y para entender los resultados obtenidos.

La corriente principal de la zona de estudio se inicia en la parte alta con varios ríos: Pucal, Cal, Huajcol, Hondo, Las Palmeras, Paja, Sacboj, Chop, Joj, Jocol, Pachum, Chioj, Pachac, Pacarnat, entre otros, los cuales en conjunto se unen al río Negro o Chixoy. Al río Chixoy se unen otros: La Estancia, Blanco, Vega Grande, entre los más importantes. La parte más baja del río Chixoy es uno de los puntos más importantes para el presente estudio, ya que ahí se ubica la estación hidrométrica Chisiguán, de la cual se obtuvieron los datos para el desarrollo del modelo lluvia-escorrentía de la zona.



### **2.1.3. Suelo**

Los suelos predominantes en la zona de estudio son los alfisoles, andisoles, entisoles, aunque, existe la presencia en menor porcentaje de inceptisoles y mollisoles.

#### **2.1.3.1. Alfisoles**

Los alfisoles se caracterizan por presentar un horizonte subsuperficial de enriquecimiento secundario de arcillas, desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica, y asociado con un horizonte superficial claro, generalmente pobre en material orgánico o de poco espesor. Los suelos que pertenecen a este tipo de suelo presentan una alta saturación con bases en todo el perfil.

#### **2.1.3.2. Andisoles**

Los andisoles son suelos formados sobre materiales piroclásticos, o sea, provenientes de una nube de cenizas o fragmentos de lava que circulan a través del aire; depositados por erupciones volcánicas cuya principal característica es la variedad de material parental debido a la naturaleza de los materiales expulsados en las erupciones. El origen de estos suelos se debe al rápido enfriamiento de los materiales expulsados, que no permite la cristalización de los minerales con un alto grado de ordenación.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> CITAB. *Atlas de suelos en la provincia de Buenos Aires*. págs. 1-5.

### **2.1.3.3. Entisoles**

Los entisoles incluyen los suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos, lo que quiere decir que no poseen reacciones fisicoquímicas y biológicas que conduzcan a su transformación. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica.

### **2.1.3.4. Inceptisoles**

Los inceptisoles son aquellos suelos que están empezando a mostrar el desarrollo de los horizontes puesto que los suelos son bastante jóvenes, todavía en evolución.

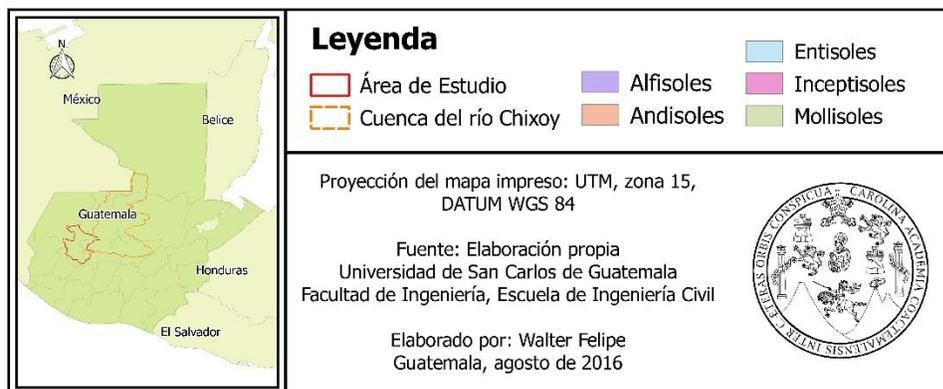
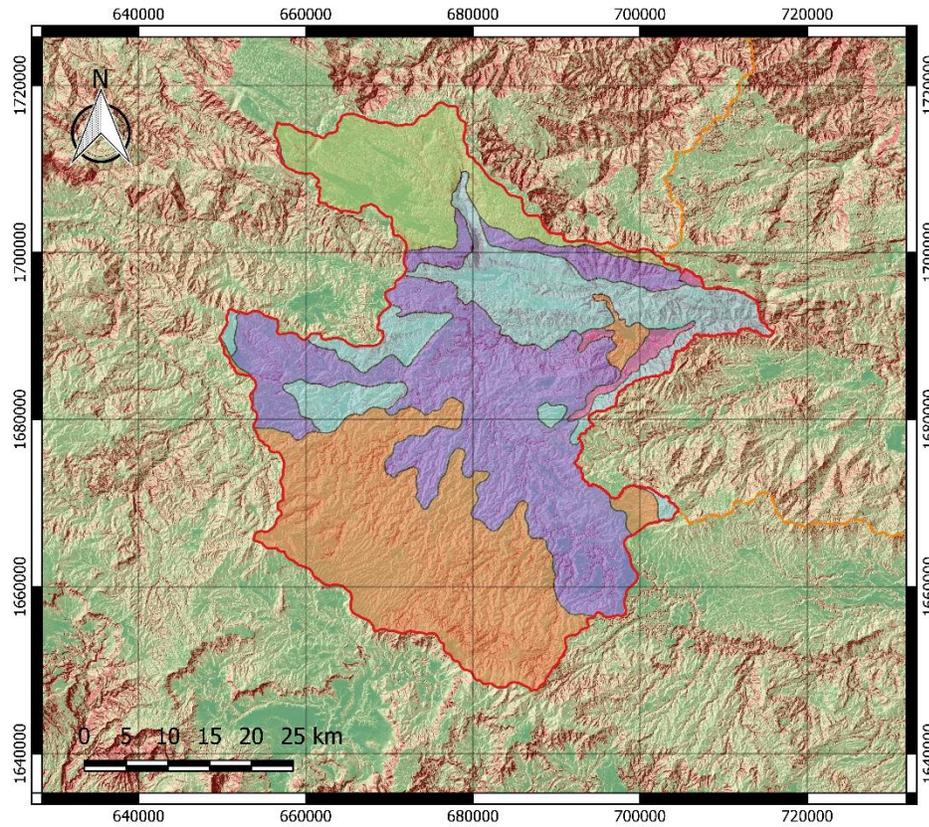
### **2.1.3.5. Mollisoles**

Los molisoles son básicamente suelos negros o pardos que se han desarrollado a partir de sedimentos minerales en climas templado húmedo a semiárido (lluvias anuales de 200 a 400 mm), aunque también se presentan en regímenes fríos y cálidos con una cobertura vegetal integrada fundamentalmente por gramíneas (trigo, arroz, maíz, avena, etc.).<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> CITAB. *Atlas de suelos en la provincia de Buenos Aires*. págs. 1-5.

Figura 5. Tipo de suelos en la zona



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

#### **2.1.4. Vegetación**

La zona de estudio cuenta con grandes áreas que son utilizadas para cultivos anuales, lo que seguramente ha provocado deforestación para que la luz del sol necesaria para la mayoría de cultivos llegue a ellos, lo cual desde el punto de vista ecológico, le causa daños al ambiente. Por otra parte, también cuenta con grandes extensiones de bosques de coníferas, lo cual ecológica y económicamente le trae beneficios a la zona.

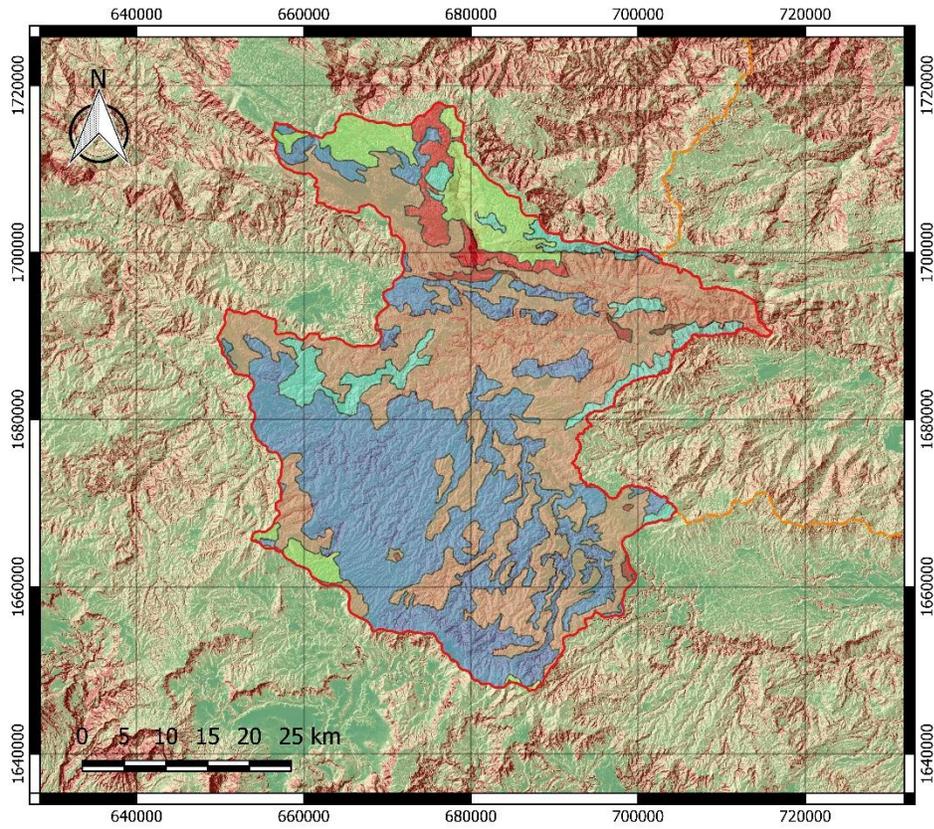
Además de lo anterior, la zona cuenta con pequeñas extensiones de bosques de latifoliadas como: caoba, cedro, hormigo, entre otros. Los anteriores son los principales tipos de vegetación que se presentan, en un muy pequeño porcentaje también existe vegetación de pastos naturales y algunos otros tipos de vegetación no categorizados.

#### **2.1.5. Fisiografía**

La fisiografía es la descripción de la naturaleza a partir del estudio del relieve y de la biósfera, simultáneamente con el estudio de la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera.

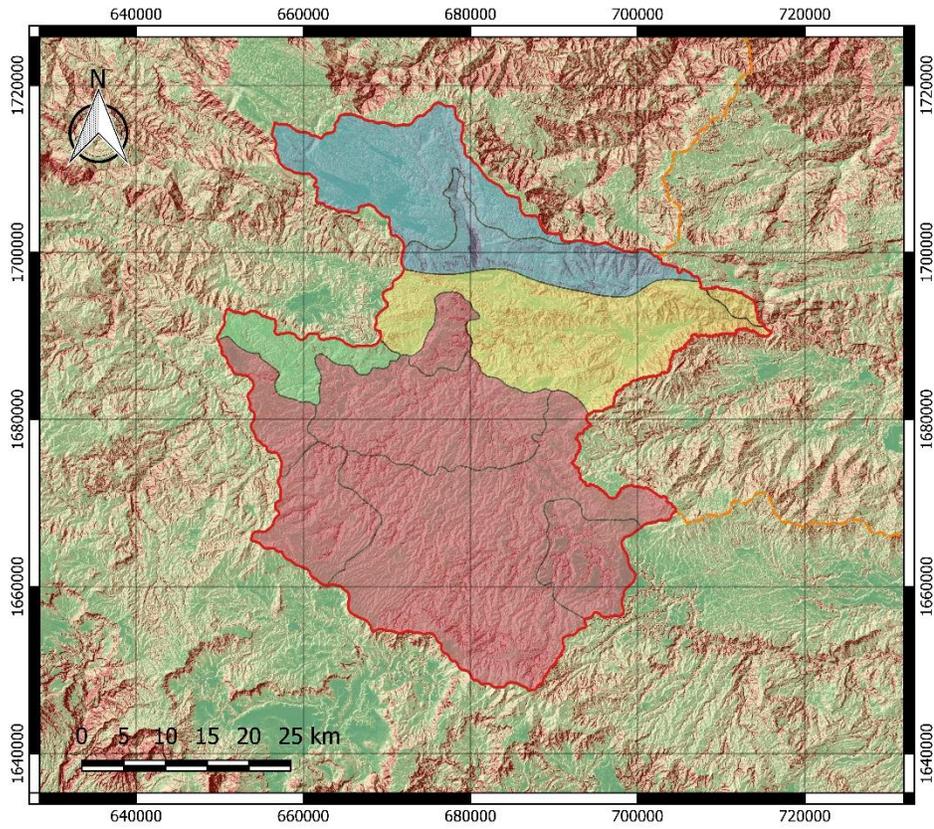
El área de estudio se encuentra entre las zonas fisiográficas: cordillera de los Cuchumatanes, montañas de Cuilco y del Selegua, sierra de Chuacús y la zona montañosa occidental (Tacaná-Tecpán).

Figura 6. Vegetación en la zona



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

Figura 7. **Fisiografía en la zona**



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

## **2.1.6. Clima**

El sector oeste de Guatemala, que tiene influencia del océano Pacífico, presenta dos temporadas claramente definidas. La época de lluvia, que abarca los meses de mayo a octubre, y la época seca, de noviembre a abril. En algunas zonas montañosas del país y las extensas llanuras del Petén, las diferencias de lluvia son menos notables a lo largo del año.

### **2.1.6.1. Características climáticas de la zona**

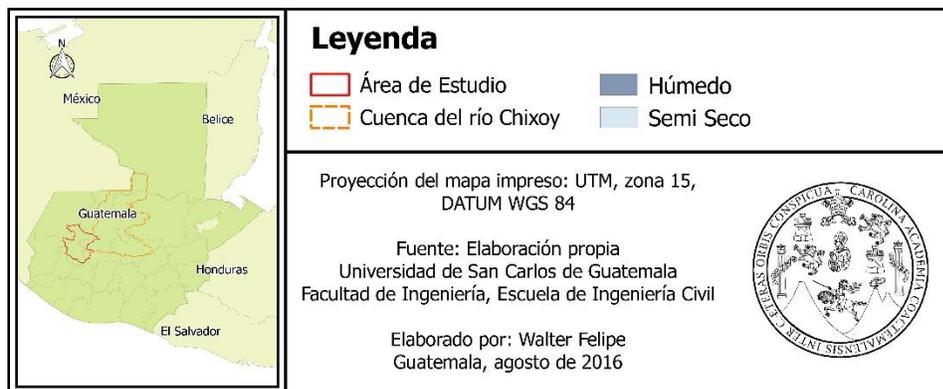
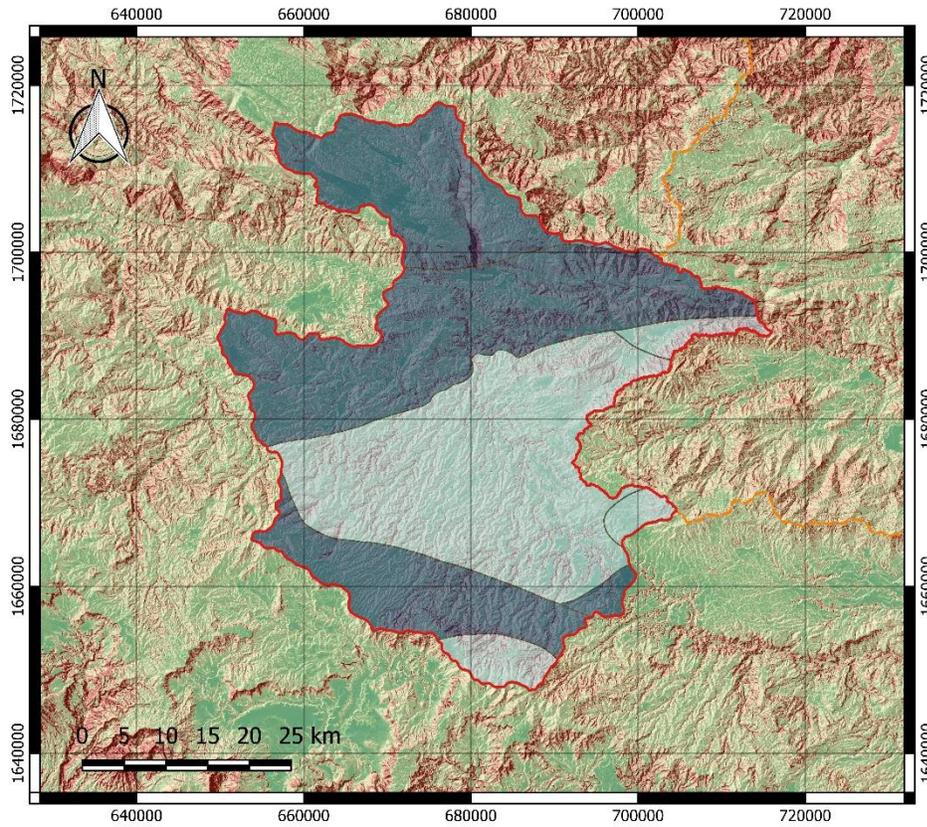
La lluvia promedio del zona de estudio es de 1 100 mm anuales; sin embargo, la complejidad orogénica del país y su interacción con la influencia de los océanos, hace que exista una gran diversidad de zonas de vida dentro del área de estudio, que van desde zonas con lluvias de 900 mm anuales, cerca de Sacapulas, hasta zonas con lluvias de 1 500 mm anuales, cerca de Momostenango. Además, los patrones climáticos se ven modificados año con año debido probablemente a los efectos de la variabilidad climática.

En Guatemala se han definido seis regiones en donde las condiciones climáticas en cada una de ellas son bastante similares. Las seis regiones definidas son: las planicies del norte, franja transversal del norte, meseta y altiplanos, la bocacosta, la planicie costera del pacifico y la zona oriental.

La zona en estudio se encuentra en la región de la meseta y los altiplanos, la cual comprende la mayor parte de los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Guatemala, sectores de Jalapa, Alta Verapaz y Baja Verapaz.

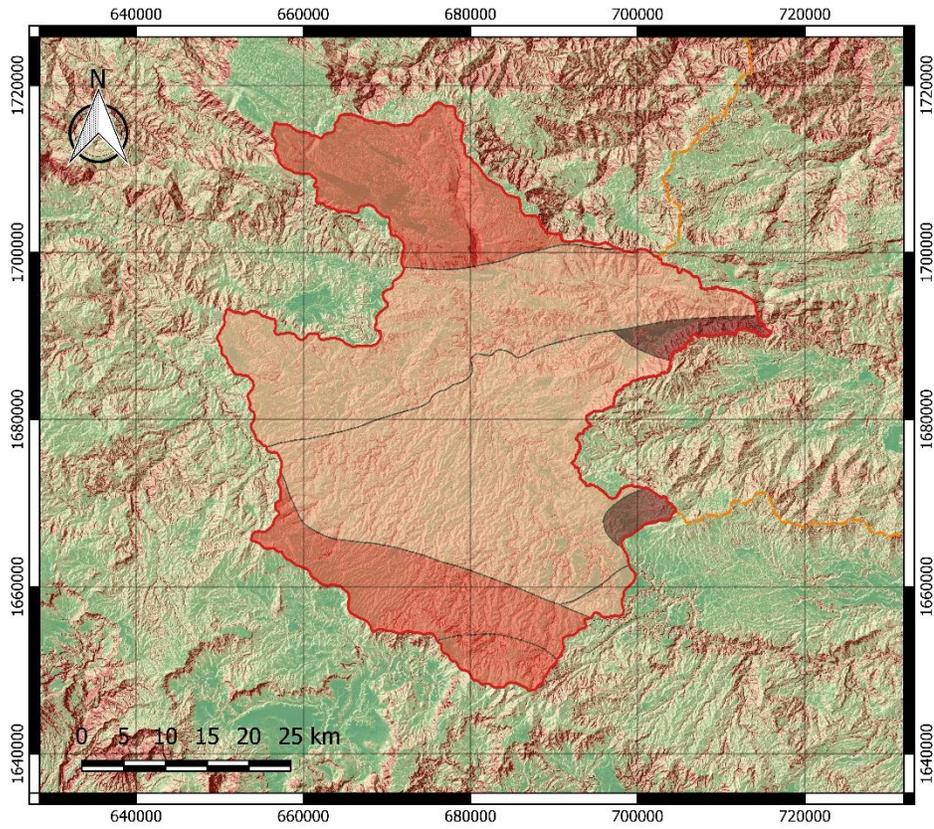
En esta región las montañas presentan mucha variabilidad con elevaciones mayores o iguales a 1 400 msnm, generando diversidad de microclimas. Las lluvias no son tan intensas, los registros más altos se obtienen de mayo a octubre, como es característico en todo el país, el resto del año estas pueden ser bajas. En diversos puntos de esta región se registran los valores más bajos de temperatura del país, según información del INSIVUMEH.

Figura 8. Humedad en la zona



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el software QGIS Essen.

Figura 9. Temperatura en la zona



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

## 2.2. Estaciones meteorológicas e hidrométricas en el área de estudio

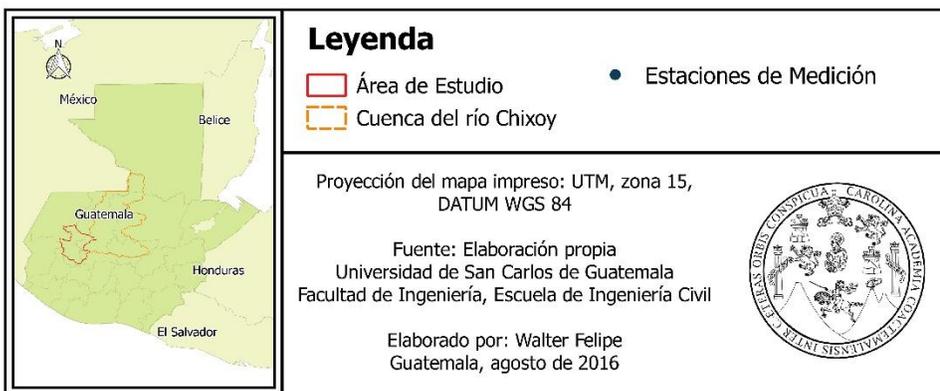
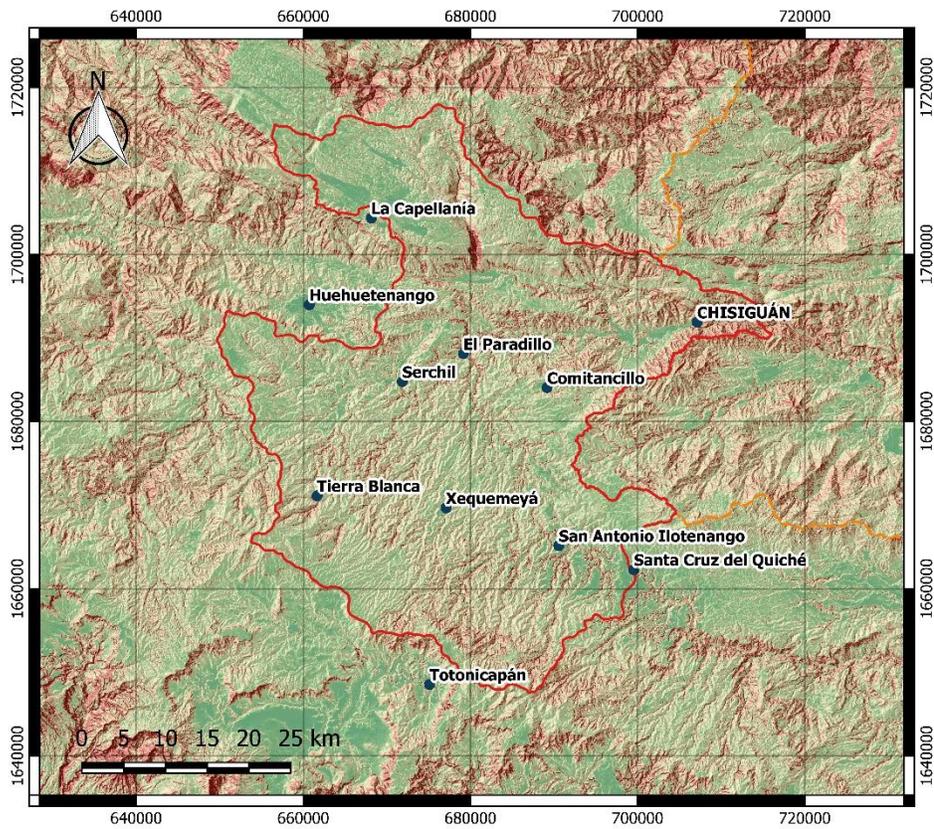
Para el desarrollo de este estudio, se utilizan datos de registro históricos del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Las estaciones que se encuentran dentro de la zona de estudio y que son utilizadas en el desarrollo del modelo se muestran en la siguiente tabla. En la tabla, las estaciones meteorológicas se identifican como (MET) y las estaciones hidrométricas como (HID). En la figura 10, se muestra la manera en que las estaciones de medición están distribuidas dentro de la zona.

Tabla I. Estaciones utilizadas para el estudio

No.	Estación	Tipo	Institución	Latitud	Longitud	Altura [msnm]
1	Totonicapán	MET	INDE	14°54'20"	91°22'20"	2 400
2	Santa Cruz del Quiché	MET	INDE	15°01'41"	91°08'38"	2 000
3	San Antonio Ilotenango	MET	INDE	15°03'17"	91°13'38"	1 942
4	Xequemeyá	MET	INDE	15°05'47"	91°21'09"	2 140
5	Tierra Blanca	MET	INDE	15°06'38"	91°29'45"	2 325
6	Comitancillo	MET	INDE	15°13'32"	91°14'20"	1 760
7	Serchil	MET	INDE	15°14'00"	91°24'00"	1 600
8	El Paradillo	MET	INDE	15°15'47"	91°19'54"	1 450
9	Huehuetenango	MET	INSIVUMEH	15°19'02"	91°30'11"	1 870
10	La Capellanía	MET	INDE	15°24'38"	91°26'00"	3 135
11	Chisiguán	HID	INDE	15°17'42"	91°04'16"	1 175

Fuente: elaboración propia, con base en datos del INDE e INSIVUMEH.

Figura 10. Estaciones meteorológicas en la zona



Fuente: elaboración propia, utilizando información del MAGA y el *software* QGIS Essen.

### **3. PROCESAMIENTO DE DATOS**

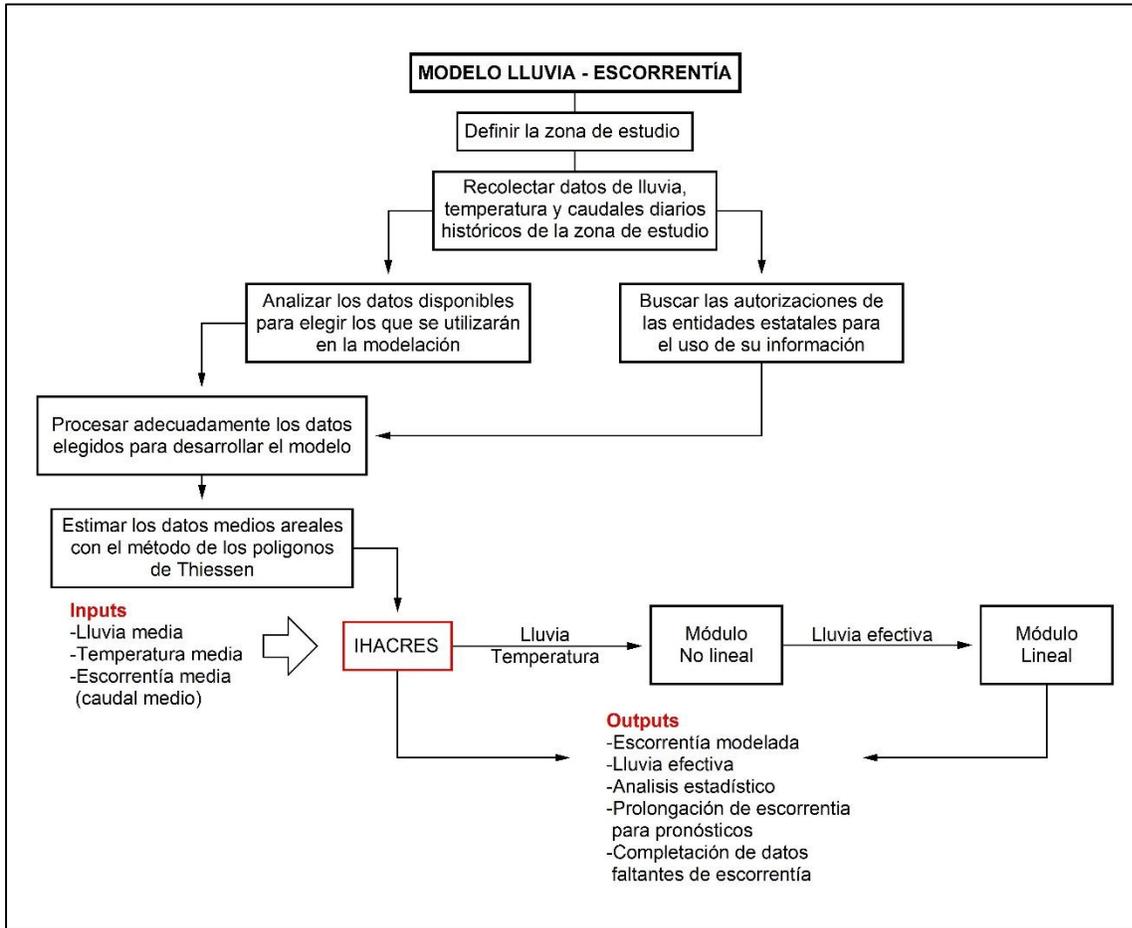
En este capítulo se detalla el procesamiento realizado con los datos originales recolectados. Al inicio del capítulo se muestra un esquema general que detalla el proceso que se realizó para obtener la base de datos para ingresar al *software* IHACRES y realizar las simulaciones necesarias con el objetivo de obtener los mejores modelos de la relación dinámica ente la lluvia y la escorrentía para la zona de estudio. Además, en el esquema se muestra de forma general la metodología que el *software* utiliza para obtener los resultados de la modelación.

El desarrollo de la segunda parte del esquema de la figura 11, desde el ingreso de los datos al *software* hasta la obtención de los modelos finales, se verá con detalle en el desarrollo del capítulo cuatro del presente estudio.

#### **3.1. Esquema general del proceso de modelado con la metodología IHACRES**

En la figura 11 se muestra el esquema del proceso utilizado para el desarrollo de los modelos lluvia-escorrentía presentados en este estudio, en el cual también se muestra el proceso que realiza dentro del *software* IHACRES.

Figura 11. Esquema general del proceso de modelación



Fuente: elaboración propia.

El esquema anterior muestra el proceso realizado desde la definición de la zona de estudio, hasta el ingreso de los datos al *software* IHACRES. Se muestran detalladamente todos los pasos que se deben realizar para obtener un modelo lluvia-escorrentía que se puede utilizar para muchos propósitos generalmente hidrológicos. En el esquema también se muestran los datos que se deben ingresar en el *software* y los resultados que se pueden obtener de él, alimentándolo con una buena base de datos hidrológicos históricos.

### **3.2. Recolección de datos**

La información hidrológica para el desarrollo del modelo lluvia-escorrentía se obtuvo de las bases de datos del INDE a través del Departamento de Hidrología y del INSIVUMEH. Para los datos de escorrentía se obtuvo información de las estaciones hidrométricas: Serchil, La Estancia, Pacaranat, El Paradillo y Chisiguán. Para los datos de lluvia se obtuvo información de las estaciones meteorológicas: Serchil, La Capellanía, Totonicapán, Tierra Blanca, Santa Cruz del Quiché, Xequemeyá, San Antonio Ilotenango, Comitancillo, Huehuetenango y El Paradillo. Para los datos de temperatura se contó con información de las estaciones meteorológicas: Serchil, Totonicapán, Tierra Blanca, Xequemeyá, San Antonio Ilotenango, Huehuetenango y El Paradillo.

Las unidades de medida de los datos recolectados y las que se utilizan para todo el desarrollo del estudio son: para los datos de lluvia, milímetros (mm); para los datos de escorrentía, metros cúbicos por segundo, (cumecs); y para los datos de temperatura, grados Celsius (°C).

### **3.3. Definición de los periodos de datos por utilizar**

Según el análisis de la consistencia en los datos disponibles, se definieron dos periodos para los cuales se desarrollaron varias simulaciones de modelos lluvia-escorrentía para cada uno de ellos, esto con el objetivo de determinar la simulación y el periodo que presentaran la mayor eficiencia. Con lo anterior se definen los resultados que se presentan en el quinto capítulo de este estudio.

El primer periodo de modelación se definió entre 1985 y 2015, para el cual se utilizaron los datos de lluvia de las estaciones: La Capellanía, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché, Xequemeyá, San Antonio Ilotenango, Comitancillo,

Huehuetenango y El Paradillo; además, los datos de temperatura de las estaciones: Totonicapán, Xequemeyá, Huehuetenango y El Paradillo.

El segundo periodo se definió entre 1992 y 2015, para el cual se utilizaron los datos de lluvia de las estaciones: Serchil, La Capellanía, Totonicapán, Tierra Blanca, Santa Cruz del Quiché, Xequemeyá, San Antonio Ilorenango, Comitancillo, Huehuetenango y El Paradillo; además, los datos de temperatura de las estaciones: Serchil, Totonicapán, Tierra Blanca, Xequemeyá, Huehuetenango y El Paradillo.

Para los dos periodos descritos anteriormente se utilizaron los datos de escorrentía de la estación Chisiguan, la cual se eligió por su ubicación en uno de los puntos más bajos de la zona de estudio, lo cual permitió realizar un solo análisis completo de la zona de estudio.

### **3.4. Estimación de datos medios**

Con los periodos de datos ya definidos y conociendo las estaciones que se utilizan en el estudio, fue necesario estimar los datos de lluvia y temperatura medios areales diarios, los cuales son necesarios para ingresar al *software* IHACRES y obtener una modelación de la relación de lluvia y la escorrentía.

Para obtener los datos medios areales, se utilizó el método de los polígonos de Thiessen, en el cual se estimó un promedio ponderado de todas las estaciones para cada día de los periodos por analizar. El desarrollo de los polígonos de Thiessen se realizó utilizando el *software* QGIS Essen y refinando los resultados en el *software* VectorWorks.

### 3.4.1. Estimación de la lluvia media del área de estudio

El valor promedio para cada dato de lluvia se obtuvo mediante el método de los polígonos de Thiessen, de la siguiente manera:

$$Pm = \frac{\sum \%S_i * Pd_i}{100\%} \quad (3.1)$$

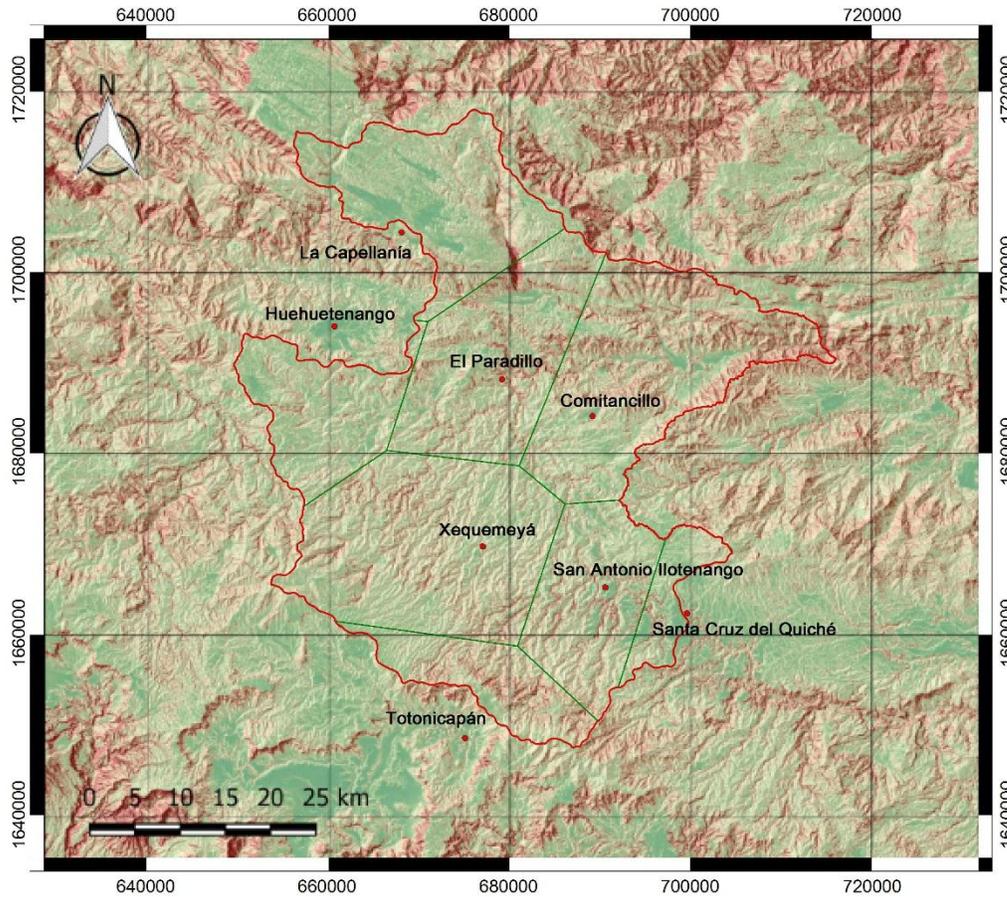
Donde:

- $Pm$  Lluvia media areal diaria, expresada en milímetros
- $\%S_i$  Porcentaje de influencia de la estación  $i$  sobre el área total de estudio
- $Pd_i$  Lluvia diaria de la estación  $i$ , expresada en milímetros

El proceso de estimación para datos medios de lluvia en la zona de estudio se realizó para los dos periodos definidos en la sección anterior, la manera en que se distribuyeron los polígonos de Thiessen para cada periodo se muestra en las figuras 12 y 13. Los resultados obtenidos de este análisis son los que se ingresaron en la variable  $\%S_i$  de la ecuación (3.1), para obtener la lluvia media.

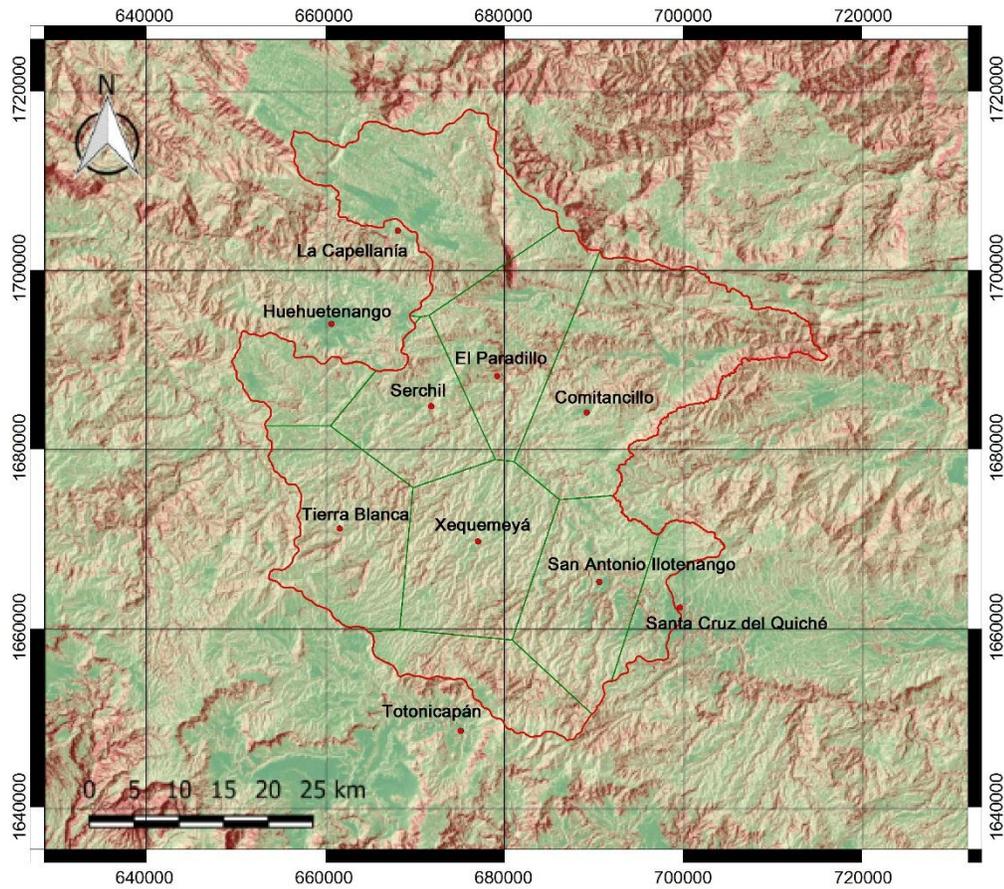
Las estaciones utilizadas se mencionan en la sección (3.3); para el análisis de lluvia del periodo de 1985 a 2015, son todas las estaciones de las que se obtuvo información histórica, excepto de Tierra Blanca y Serchil, las cuales no registraron información en los primeros años de este periodo. Para el análisis del periodo de 1992 a 2015, se utilizaron todas las estaciones de las que se obtuvieron datos.

Figura 12. Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la lluvia media del periodo 1985-2015



Fuente: elaboración propia, utilizando los *software* QGIS Essen y VectorWorks.

Figura 13. **Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la lluvia media del periodo 1992-2015**



Fuente: elaboración propia, utilizando los *software* QGIS Essen y VectorWorks.

### 3.4.2. Estimación de la temperatura media del área de estudio

El valor promedio para cada dato de temperatura se obtuvo de la misma manera que la lluvia media, utilizando el método de los polígonos de Thiessen, de la siguiente forma:

$$Tm = \frac{\sum \%S_i * Td_i}{100\%} \quad (3.2)$$

Donde:

$Tm$  Temperatura media areal diaria, expresada en grados celsius

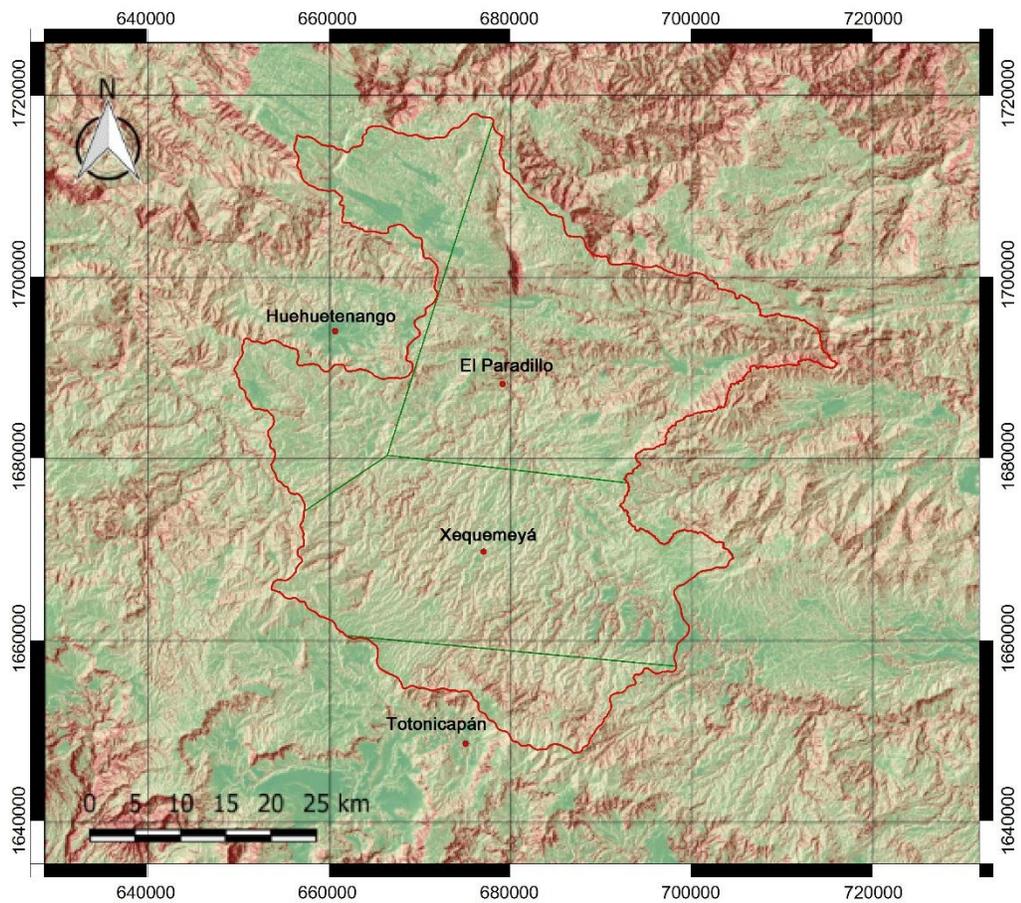
$\%S_i$  Porcentaje de influencia de la estación  $i$  sobre el área total de estudio

$Td_i$  Temperatura diaria de la estación  $i$ , expresada en grados celsius

Para la estimación de la temperatura media de la zona, se realizó el mismo procedimiento que se siguió en la estimación de la lluvia media. La distribución de los polígonos de Thiessen, para los diferentes periodos de estudio, se muestra en las figuras 14 y 15, y de la misma forma que en la estimación de la lluvia media, los resultados del análisis de los polígonos son los que se ingresan en la variable  $\%S_i$  de la ecuación (3.2), para obtener la temperatura media.

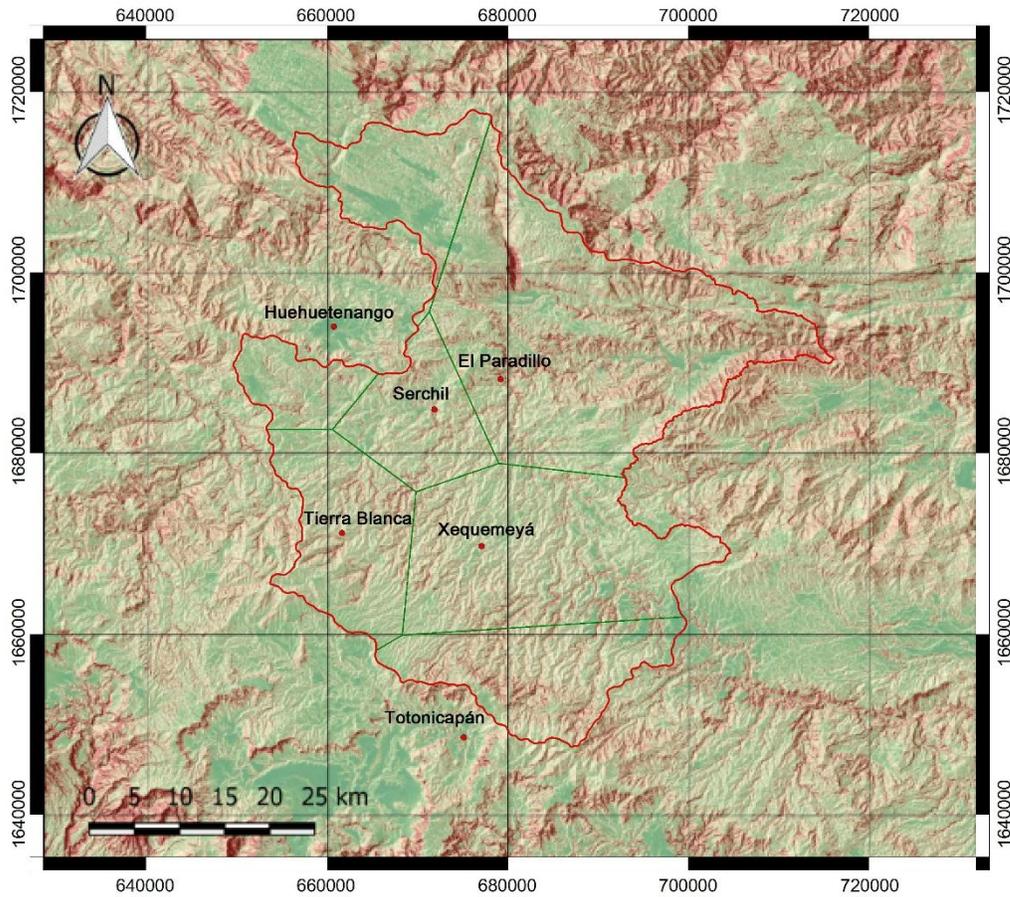
Para el análisis de temperatura del periodo de 1985 a 2015, se utilizaron todas las estaciones de las que se obtuvo información histórica, excepto de las estaciones Tierra Blanca y Serchil, las cuales no registraron información en los primeros años de este periodo y San Antonio Ilotenango, la cual registró datos únicamente en los últimos años de los periodos de estudio. Para el análisis del periodo de 1992 a 2015, se utilizaron todas las estaciones de las que se obtuvieron datos, excepto la de San Antonio Ilotenango.

Figura 14. **Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la temperatura media del periodo 1985-2015**



Fuente: elaboración propia, utilizando los *software* QGIS Essen y VectorWorks.

Figura 15. Representación de los polígonos de Thiessen para la estimación de la temperatura media del periodo 1992-2015



Fuente: elaboración propia, utilizando los *software* QGIS Essen y VectorWorks.

### **3.4.3. Datos de esorrentía utilizados para el estudio**

Los datos de esorrentía utilizados para el modelado de la relación dinámica en la cuenca alta del río Chixoy se obtuvieron directamente de la estación hidrométrica Chisiguán a través del INDE. La estación Chisiguán está ubicada en la parte más baja del área de estudio. Con los datos medios ya calculados de lluvia y temperatura para toda la cuenca y teniendo los registros diarios medios de esorrentía históricos, se procede a desarrollar el modelo de la relación dinámica de la lluvia con la esorrentía con el *software* IHACRES.

### **3.4.4. Datos medios estimados para el desarrollo de la modelación de la cuenca**

A continuación se muestran, por medio de diagramas de caja, los datos medios de lluvia y temperatura estimados mediante el método de los polígonos de Thiessen, además de los datos de esorrentía media obtenidos directamente de la estación hidrométrica utilizada para la modelación.

Se muestran los datos medios obtenidos para el periodo de 1992 a 2015, que como se muestra en los capítulos siguientes, es el que brinda los mejores resultados para el estudio. Los datos se representan a escala mensual con el objetivo de idealizar la manera en que son distribuidos a través del periodo de estudio de una manera ordenada en una sola gráfica.

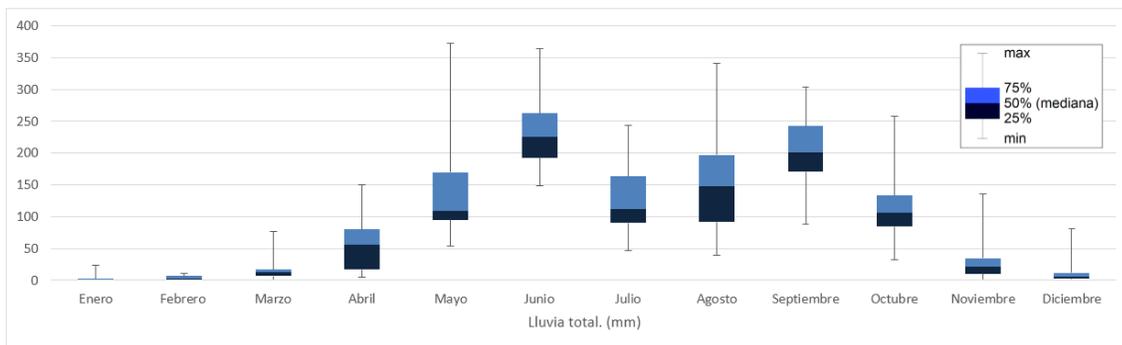
#### **3.4.4.1. Diagramas de caja o *Box Plot***

Son una representación visual que describe varias características importantes al mismo tiempo, tales como la dispersión y la simetría.

Este tipo de diagrama consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico. Este rectángulo está dividido por un segmento horizontal o vertical, según sea la alineación del rectángulo, que indica dónde se posiciona la mediana y, por lo tanto, su relación con el primer y tercer cuartil.

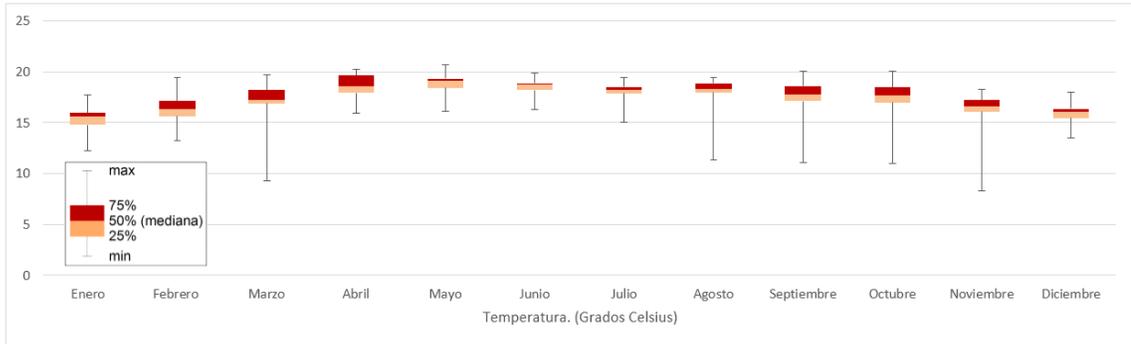
Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes, los cuales tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato que no se encuentre dentro de este rango es dibujado e identificado individualmente. Para este caso se optó por diagramas de caja alineados verticalmente como se muestra en las siguientes gráficas.

Figura 16. **Box Plot de los datos de lluvia total mensual, en mm, del periodo 1992-2015**



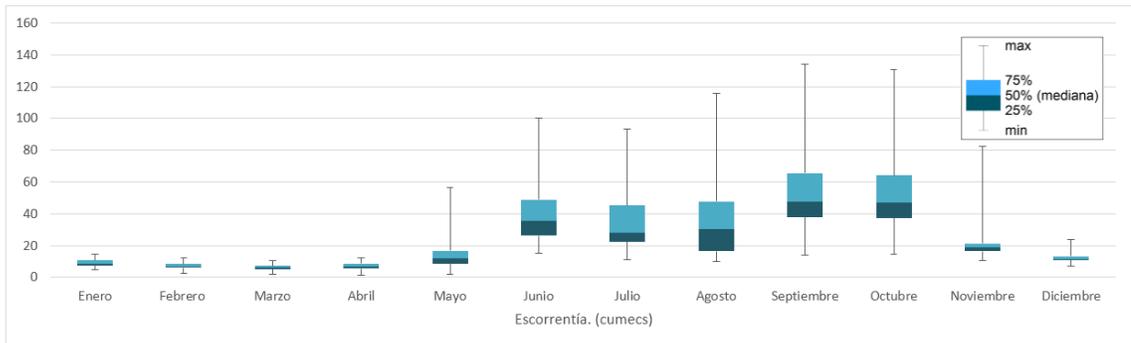
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Box Plot** de los datos de temperatura promedio mensual, en grados Celsius, del periodo 1992-2015



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Box Plot** de los datos de escorrentía promedio mensual, en m<sup>3</sup>/s, del periodo 1992-2015 en la estación Chisiguán



Fuente: elaboración propia.



## **4. DESARROLLO DEL MODELADO CON LA METODOLOGÍA IHACRES**

En este capítulo se muestra con detalle el proceso utilizado para la obtención de los modelos lluvia-escorrentía presentados como resultados finales de este estudio. Lo que se muestra a continuación se puede utilizar como base para desarrollar modelos del mismo tipo en diferentes zonas del país, con el objetivo de comprender cada día un poco más, el comportamiento del ciclo hidrológico en Guatemala o en cualquier parte del mundo.

### **4.1. Generalidades del *software* IHACRES**

IHACRES es una metodología que se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de hidrología de agua superficial, en este estudio se aplica a la estimación de la escorrentía que generan las lluvias incluyendo el efecto de la temperatura.

El modelo consiste en un módulo de pérdida no lineal que convierte la lluvia observada en lluvia efectiva y en un módulo de enrutamiento lineal que convierte la lluvia efectiva en escorrentía. El *software* fue desarrollado principalmente por la ANU y el iCAM y se puede descargar de forma gratuita en la página (<http://toolkit.ewater.org.au>).

### **4.2. Procesos de IHACRES**

El módulo de pérdida no lineal utiliza un sistema de contabilización del déficit de captación de humedad (*DCH*), que divide la lluvia efectiva, la

evapotranspiración real (ET) y los cambios en la humedad de captación. Cada paso de tiempo del  $DCH$  se calcula como:

$$DCH(t) = DCH(t - 1) - P(t) + E(t) + U(t) \quad (4.1)$$

Donde:

$DCH$  Déficit de captación de humedad

$t$  Intervalo de tiempo (1 día)

$P$  Lluvia

$E$  Evapotranspiración real (ET)

$U$  Drenaje (lluvia efectiva)

Las unidades son milímetros por el paso del tiempo. El valor mínimo de  $DCH$  es cero, lo que significa que la zona de captación está completamente saturada, mientras que un valor mayor que cero indica que hay un déficit de humedad, o sea, que a medida que el valor aumenta, la cuenca se vuelve progresivamente más seca.

Se supone que la lluvia efectiva es instantánea, función lineal del  $DCH$  dada por:

$$\frac{dU}{dP} = 1 - \min\left(1, \frac{DCH}{d}\right) \quad (4.2)$$

Donde:

$U$  Drenaje

$P$  Lluvia

$DCH$  Déficit de captación de humedad

$d$  Umbral de flujo

Si el  $DCH$  es mayor que el umbral, no se produce flujo. La lluvia efectiva en cada paso del tiempo viene dada por la integral de la ecuación (4.2).

La evapotranspiración se calcula como:

$$ET(t) = eT(t) \exp\left(2\left(1 - \frac{DCH_f(t)}{g}\right)\right) \quad (4.3)$$

Donde:

$T$  Temperatura

$DCH_f$  Valor de la  $DCH$  antes de tomar en cuenta las pérdidas de  $ET$

$ET$  Evapotranspiración real

$e$  Factor de conversión de temperatura a  $ETP$  y es un umbral de tensión

$ETP$  Evapotranspiración potencial

$g$  Valor del  $DCH$  por encima del cual la tasa de  $ET$  comenzará a disminuir debido a la insuficiente disponibilidad de agua para la transpiración de la planta

Para reducir la correlación de parámetros,  $g$  se calcula como:

$$g = fd \quad (4.4)$$

Donde:

$f$  Factor de multiplicación en el umbral de flujo  $d$

Entonces, todo el proceso descrito en esta sección se puede resumir en lo indicado en la segunda parte del esquema de la figura 11, es decir que los datos de lluvia y temperatura son utilizados para el desarrollo del módulo no lineal, en el cual se le restan a las lluvias observadas las pérdidas por evapotranspiración, obteniendo así, las lluvias efectivas.

Las lluvias efectivas se enrutan a través de dos almacenes de hidrogramas unitarios paralelos, en el módulo lineal del proceso, para convertir la lluvia efectiva en el caudal. El módulo lineal se compone de dos tipos de flujo, el rápido y el lento. La suma de los hidrogramas unitarios lentos y rápidos da como resultado el caudal modelado final.

#### **4.3. Datos de entrada**

IHACRES requiere tres series de datos de series temporales. Los datos necesarios son:

- Lluvia observada (en milímetros o pulgadas).
- Temperatura observada (en grados celsius, fahrenheit o kelvin).
- Escorrentía observada (en metros cúbicos por segundo, litros por segundo, o pies cúbicos por segundo).

La lluvia y la temperatura las utiliza como datos de entrada y la escorrentía la utiliza para la calibración del modelo. Estos datos deben estar en formato de texto delimitado por comas.

Cada serie de datos se puede almacenar en archivos diferentes o en un solo archivo, el *software* presenta varias opciones que facilitan la manipulación de los archivos. Los datos se pueden ingresar en (minutos, horas y días).

Dependiendo de las unidades de medida usadas para los conjuntos de datos anteriores, el programa puede requerir el ingreso del área de influencia de los datos, en el caso de este estudio se ingresó el dato total del área de estudio expresada en kilómetros.

#### **4.4. Datos resultantes**

El principal resultado del modelado con IHACRES, es la nueva escorrentía modelada expresada en las mismas dimensionales en que se ingresaron los datos observados históricos, los datos obtenidos de escorrentía pueden ser prolongados para obtener pronósticos, el periodo que el *software* permite prologar depende de la calidad y el periodo de los datos disponibles. Además, el modelo también realiza la completación de datos faltantes de escorrentía observados.

#### **4.5. Desarrollo de un modelo lluvia-escorrentía en el *software* IHACRES**

En esta sección se muestra la manera en que se utiliza el *software* para la obtención de un modelo lluvia-escorrentía, se desarrolla el modelado para el periodo de datos de 1992 a 2015, se utiliza un periodo de calibración desde el 1 de enero de 2009 hasta el 1 de enero de 2012, tomando en cuenta las recomendaciones que se hacen en el manual de usuario del *software* IHACRES. Para esta simulación la serie de lluvia se corrió un día hacia adelante con el fin de obtener una mejor eficiencia en el modelo, la razón por la que se realizó el corrimiento se explica detalladamente en el capítulo de resultados. La simulación que se desarrolla es la que presentó uno de los dos mejores resultados del estudio. Lo que se muestra a continuación es una demostración de la forma en que se utiliza el *software* IHACRES.

En resumen el *software* consta de siete pasos básicos para desarrollar un proyecto:

- Paso 1: importar los datos observados
- Paso 2: cargar los datos observados
- Paso 3: verificar la consistencia de los datos
- Paso 4: definir el periodo o los periodos de calibración
- Paso 5: calibrar el módulo no lineal
- Paso 6: calibrar el módulo lineal
- Paso 7: ejecutar el modelo calibrado

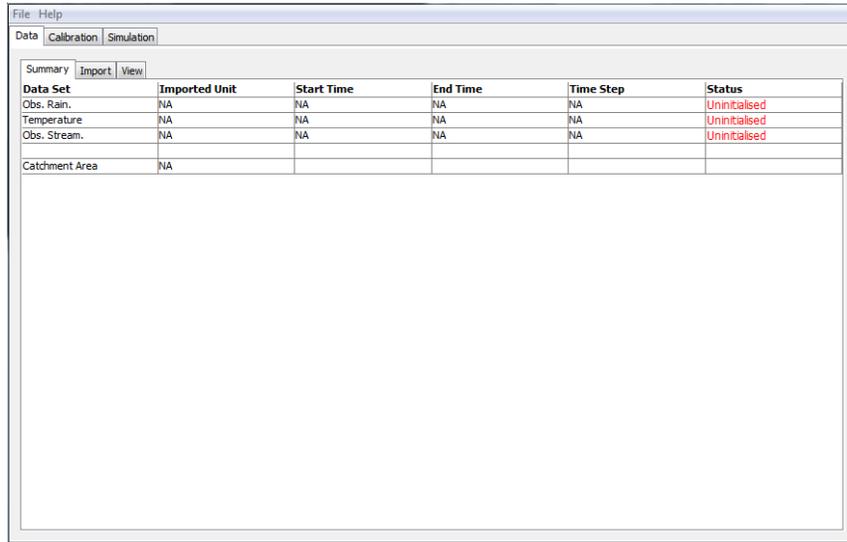
Los pasos anteriores están descritos de forma general, a continuación se muestra con mayor detalle el procedimiento que se debe realizar dentro de IHACRES.

#### **4.5.1. Importar datos**

Este es el primer paso para desarrollar el proyecto. Para realizar la importación de los datos, primero se deben haber creado los archivos base en formato delimitado por comas, los cuales se pueden realizar con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel para, posteriormente, abrirlos en el *software* IHACRES.

Al abrir el *software*, aparece la pantalla que se muestra en la figura 19, en la que se puede observar que aun no se tienen datos cargados. Entonces, se debe seleccionar la pestaña (importar), y aparecerá la pantalla de la figura 20.

Figura 19. Resumen vacío de datos cargados

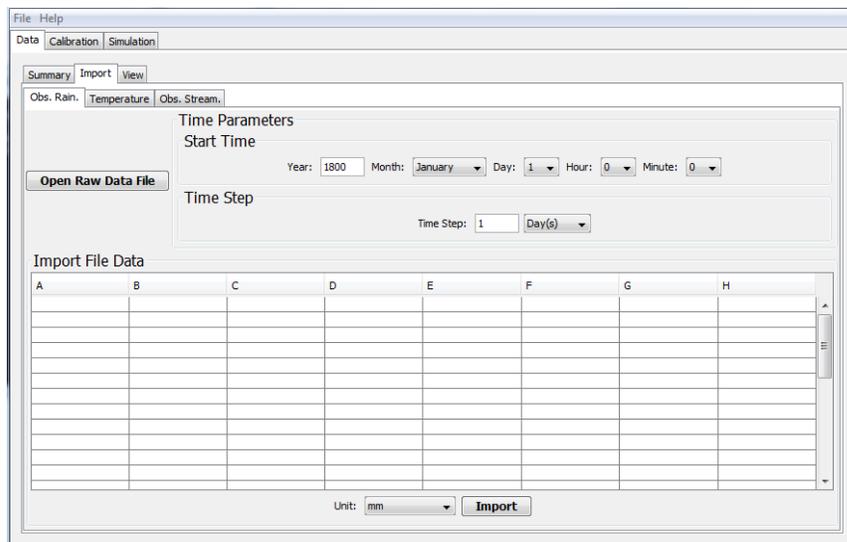


The screenshot shows the 'Data' menu in the IHACRES software. The 'Summary' tab is active, displaying a table with the following data:

Data Set	Imported Unit	Start Time	End Time	Time Step	Status
Obs. Rain.	NA	NA	NA	NA	Uninitialised
Temperature	NA	NA	NA	NA	Uninitialised
Obs. Stream.	NA	NA	NA	NA	Uninitialised
Catchment Area	NA				

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

Figura 20. Ventana para importación de datos



The screenshot shows the 'Import' tab in the IHACRES software. The 'Time Parameters' section includes:

- Start Time: Year: 1800, Month: January, Day: 1, Hour: 0, Minute: 0
- Time Step: 1 Day(s)

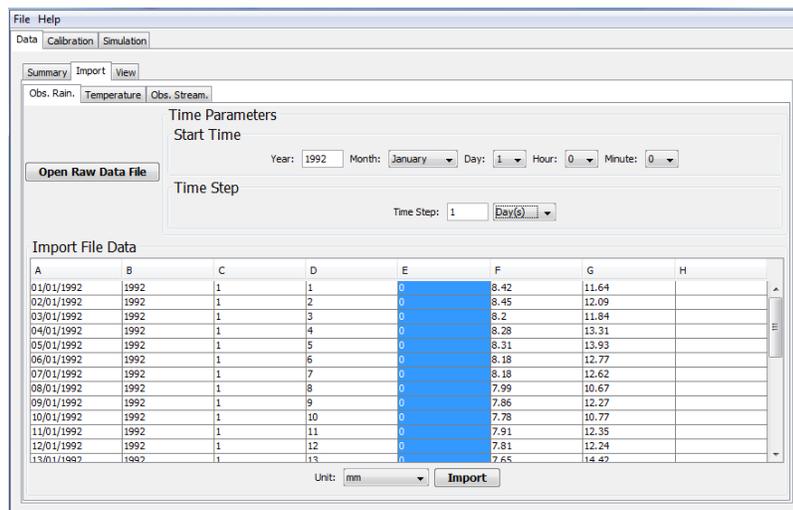
The 'Import File Data' section features a table with columns A through H and multiple rows. At the bottom, there is a 'Unit' dropdown set to 'mm' and an 'Import' button.

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

La pantalla que se muestra en la figura anterior, es la que se utiliza para importar los datos y crear un archivo compatible con el *software*. En ella se importan las tres series observadas de datos: lluvia, escorrentía y temperatura, preferiblemente en ese orden.

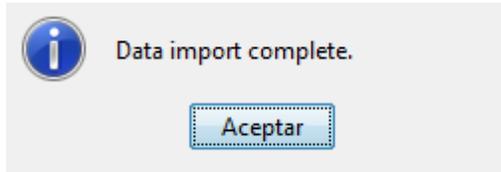
Para realizar la importación, primero se deben abrir los archivos creados anteriormente, en formato delimitado por comas, uno a la vez. Por ejemplo, en la figura 21, se muestra la manera de importar los datos de lluvia, primero se debe abrir el archivo en donde se encuentra la serie de datos, luego se debe especificar la fecha de inicio de la serie y la unidad de medida de los datos históricos, luego se selecciona la columna en la que se encuentran los datos de lluvia, pulsando cualquier celda de la columna correcta. A continuación se pulsa el botón (importar), una vez finalizada la importación, aparecerá una ventana con el mensaje que se muestra en la figura 22, en la que se debe pulsar el botón (aceptar).

Figura 21. Importación de datos de lluvia



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

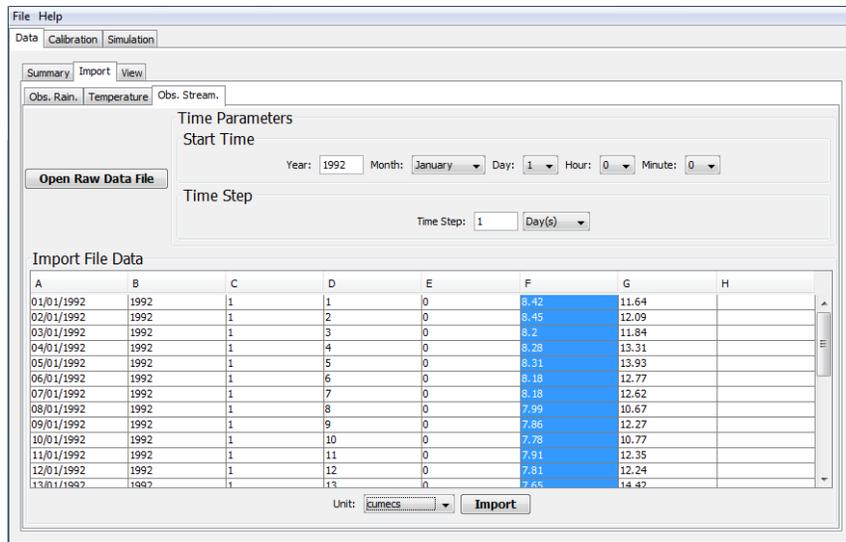
Figura 22. Mensaje de aceptación de importación de datos



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

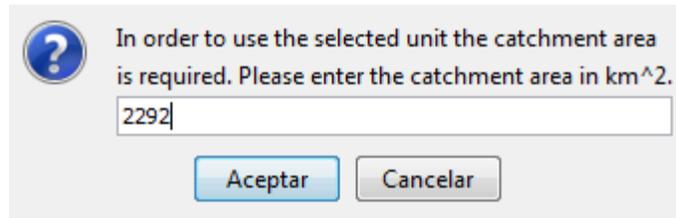
Después de aceptar la importación de los datos de lluvia, se procede a la importación de los datos de escorrentía y de temperatura. En los datos de escorrentía, como se muestra en la figura 23, se realiza el mismo procedimiento que en los datos de lluvia, con la única diferencia de que al momento en que aparece el cuadro de diálogo de la figura 24, se debe ingresar el área de influencia de los datos, en este caso es el área total de estudio.

Figura 23. Importación de datos de escorrentía



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 24. **Ingreso de área de influencia de datos**

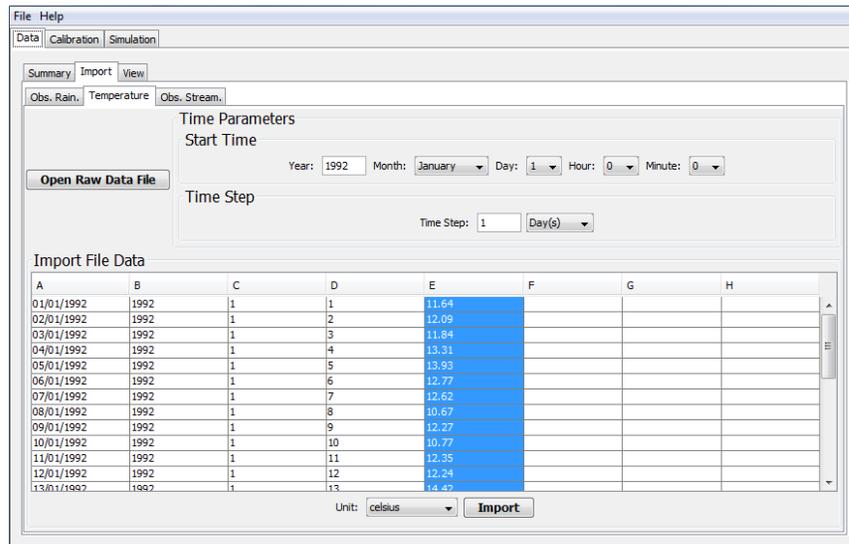


Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Por último se importan los datos de temperatura, de la misma forma que los datos de lluvia, como se muestra en la figura 25. Con las tres series de datos cargadas correctamente, aparecerá una ventana con el mensaje de la figura 26, en la que se pulsa el botón (aceptar).

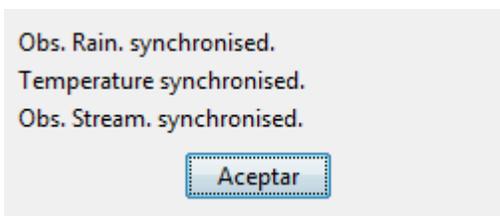
Con las tres series de datos cargadas en el *software*, se debe guardar el archivo en la dirección que se desee, el archivo se guardará con la extensión (.ipr), este archivo es el que se utiliza para continuar con el modelado.

Figura 25. Importación de datos de temperatura



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 26. Mensaje de importación correcta

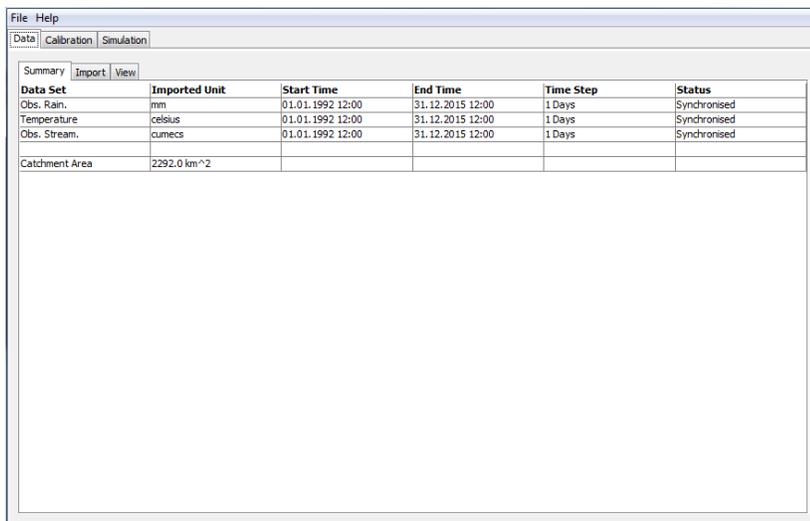


Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.2. Cargar datos

Luego de importar los datos y crear un archivo con la extensión (.ipr), compatible con el *software* IHACRES, se debe empezar con el proyecto de modelado, para ello se debe abrir nuevamente el *software* y en la pantalla de inicio de pulsa la pestaña (*File*), y se abre el archivo creado; aparecerá el resumen de los datos cargados en una pantalla como la de la figura 27. Si se desea, se pueden observar los datos en forma gráfica, pulsando la pestaña (*View*), y se mostrará una pantalla como la que se muestra en la figura 28, en la cual se puede ver el periodo completo de datos, o bien, el periodo que se desee, el cual se debe especificar en los paneles (*low y hi*), indicando la fecha de inicio y final del periodo deseado respectivamente. Los paneles (*low y hi*), se utilizan para el mismo objetivo en cualquier proceso que se realice en el *software*.

Figura 27. Resumen de datos cargados

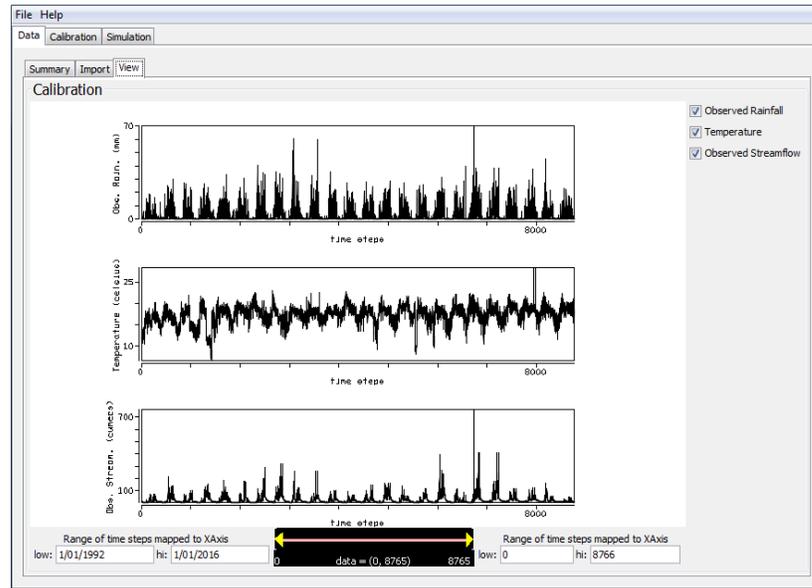


The screenshot shows the IHACRES software interface with a menu bar (File, Help) and a toolbar (Data, Calibration, Simulation). Below the toolbar is a sub-menu (Summary, Import, View) and a table displaying the loaded data summary. The table has six columns: Data Set, Imported Unit, Start Time, End Time, Time Step, and Status. The data rows are: Obs. Rain (mm, 01.01.1992 12:00 to 31.12.2015 12:00, 1 Days, Synchronised), Temperature (celsius, 01.01.1992 12:00 to 31.12.2015 12:00, 1 Days, Synchronised), Obs. Stream (cumecs, 01.01.1992 12:00 to 31.12.2015 12:00, 1 Days, Synchronised), and Catchment Area (2292.0 km^2).

Data Set	Imported Unit	Start Time	End Time	Time Step	Status
Obs. Rain.	mm	01.01.1992 12:00	31.12.2015 12:00	1 Days	Synchronised
Temperature	celsius	01.01.1992 12:00	31.12.2015 12:00	1 Days	Synchronised
Obs. Stream.	cumecs	01.01.1992 12:00	31.12.2015 12:00	1 Days	Synchronised
Catchment Area	2292.0 km <sup>2</sup>				

Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 28. Gráficos de datos cargados



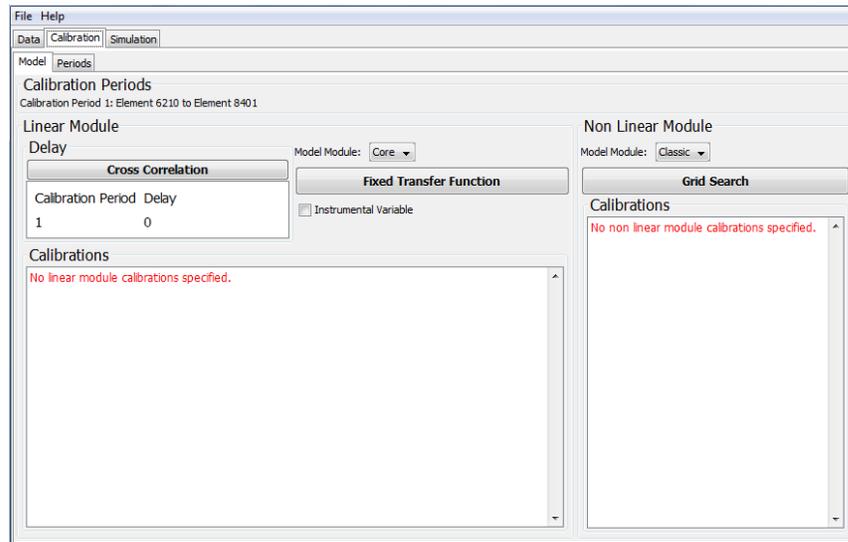
Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES

#### 4.5.3. Definición de periodo de calibración

Con los datos cargados al programa, se debe definir el periodo que se utilizará para la calibración del modelo y para ello se pulsa la pestaña (*Calibration*) y luego la pestaña (*Periods*). En la nueva pantalla que aparece se debe definir el o los periodos de calibración, en el caso de esta simulación, se utilizó solamente un periodo de calibración, el cual se ingresa en los paneles (*low* y *hi*), y posteriormente pulsando el botón (*Enter*), del teclado del ordenador. Por último, se agrega el tiempo de calentamiento pulsando el botón (*Set*), en la parte inferior izquierda de la pantalla, se utiliza un periodo recomendado por los desarrolladores del *software*. Habiendo hecho lo anterior, se pulsa el botón (*Add Calibration Period*), en la parte derecha de la pantalla, y con esto se tiene el



Figura 30. **Ventana para calibración de módulos del modelo**



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.4.1. **Módulo lineal**

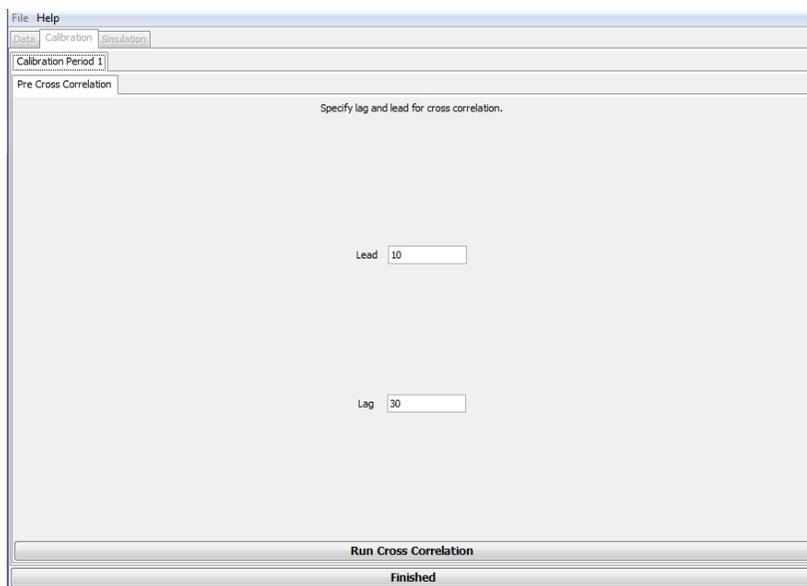
Primero se debe calibrar el modulo lineal, para ello se debe pulsar el botón (*Cross Correlation*), aparecerá una pantalla como la que se muestra en la figura 31, en la que se debe pulsar el botón (*Run Cross Correlation*) y aparecerá una nueva pantalla como la de la figura 32. En el caso de esta simulación, la gráfica establece que los datos de lluvia corresponden a los de escorrentía del mismo día, que es lo que se busca en este estudio, por lo que solamente se pulsa el botón (*Finished*), reaparecerá la pantalla que se muestra en la figura 30 para continuar con la calibración del módulo no lineal.

Si en la gráfica que se muestra en la figura 32, la línea de color negro apareciera desfasada hacia la derecha en relación con las otras dos líneas, la interpretación sería que hay un retraso entre la lluvia y la escorrentía. La

consecuencia es que, en cualquier dado día, la escorrentía se correlaciona mejor con la lluvia de ayer que con la de hoy (si el número que se genera en el panel inferior es uno).

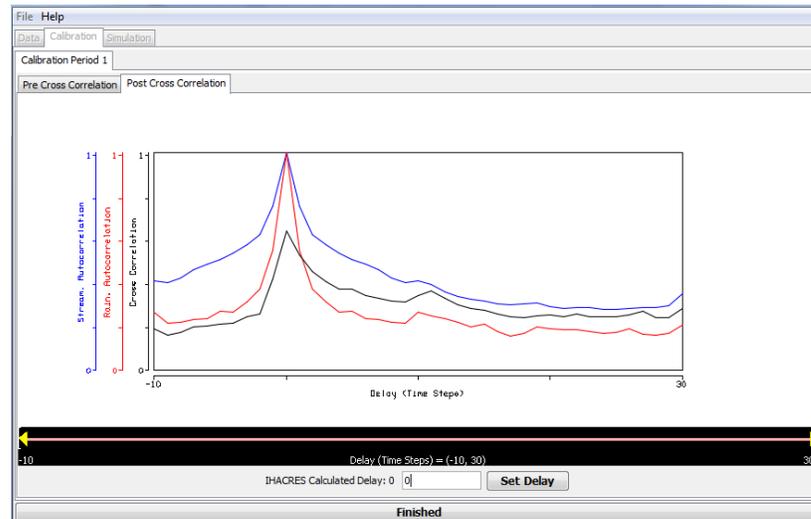
Para anular la estimación del retraso, si así lo decide el investigador, se pulsa el botón (*Set Delay*), de la pantalla de la figura 32, antes de finalizar la calibración de el modulo lineal, y se cambia el número uno por el cero en el cuadro de diálogo que se genera, luego se finaliza el proceso. En el caso de esta simulación, no se realizó la anulación del retraso, la manera en la que se realizó la anulación se muestra en capítulo de resultados de este estudio, el retraso que mostraron los datos originales fue de un día.

Figura 31. **Calibración de módulo lineal**



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 32. Correlación de datos



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

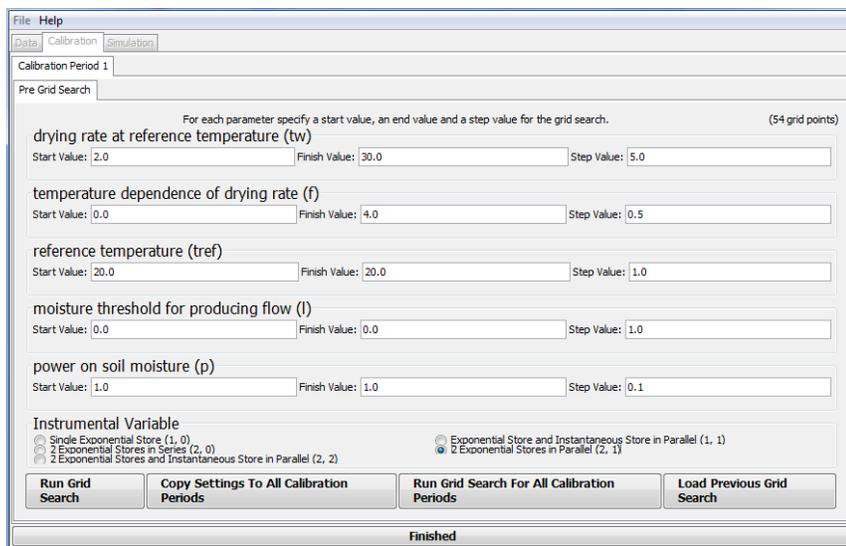
#### 4.5.4.2. Módulo no lineal

La segunda y última calibración que se debe realizar en el modelado con la metodología IHACRES, es la del módulo no lineal, luego de finalizar la calibración del módulo lineal, como se menciona anteriormente, aparece nuevamente la pantalla de la figura 30, en ella, primero se debe activar el panel (*instrumental variable*) y luego pulsar el botón (*Grid Search*), aparecerá la pantalla que se muestra en la figura 33. En la nueva pantalla se deben establecer los parámetros requeridos, en el caso de esta y las demás simulaciones que se realizan en este estudio, los mejores resultados se obtuvieron al utilizar los parámetros que el *software* genera por defecto.

Luego de definir los parámetros se debe elegir y activar entre los modelos disponibles el que mejor describa la relación lluvia-escorrentía de la cuenca, para esto se deben probar todos los modelos disponibles. Para la zona de

estudio, en todas las simulaciones realizadas, el mejor modelo es el que se muestra activado en la figura 33, luego se pulsa el botón (*Run Grid Search*), aparecerá una barra mostrando el progreso que al finalizar genera la pantalla que se muestra en la figura 34.

Figura 33. Calibración de módulo no lineal



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.4.2.1. Búsqueda de rejilla

La figura 34 es el resultado de la búsqueda de rejilla, en esta pantalla se debe realizar el siguiente proceso; se inicia con seleccionar la primera celda de la décima columna, la que contiene los datos de la eficiencia del modelo, y se pulsa el botón (*Sort by Selected Column*), con lo anterior los resultados se ordenarán de forma descendente. Luego se debe marcar la primera celda de la columna uno y pulsar el botón ancho (*Analyse*) y aparecerá la pantalla que se muestra en la figura 35.

Figura 34. **Rejilla desarrollada**

An...	ma...	dry...	te...	ref...	mol...	po...	Bia...	Rel...	R.S...	R2...	R2...	R2...	Mo...	U 1	X 1	(U ...	ARPE	Tau 1	Tau 2	Vol...	Vol...
<input checked="" type="checkbox"/>	0.003	12.000	3.000	20.000	0.000	1.000	-5.346	-0.012	0.746	0.840	0.872	0.785	0.957	0.191	0.136	0.000	0.073	61.562	0.883	0.446	0.554
<input type="checkbox"/>	0.003	12.000	3.500	20.000	0.000	1.000	-3.927	-0.009	0.746	0.840	0.872	0.779	0.961	0.187	0.131	0.000	0.072	61.643	0.906	0.435	0.565
<input type="checkbox"/>	0.003	12.000	2.500	20.000	0.000	1.000	-6.735	-0.015	0.746	0.840	0.873	0.790	0.953	0.194	0.141	0.000	0.075	61.494	0.860	0.458	0.542
<input type="checkbox"/>	0.003	12.000	4.000	20.000	0.000	1.000	-2.486	-0.005	0.745	0.840	0.871	0.774	0.964	0.183	0.126	0.000	0.071	61.731	0.928	0.424	0.576
<input type="checkbox"/>	0.003	12.000	2.000	20.000	0.000	1.000	-8.088	-0.018	0.745	0.839	0.873	0.796	0.948	0.197	0.145	0.000	0.078	61.444	0.837	0.470	0.530
<input type="checkbox"/>	0.003	17.000	2.000	20.000	0.000	1.000	-7.485	-0.016	0.744	0.843	0.879	0.830	0.957	0.176	0.126	0.000	0.064	69.453	0.976	0.413	0.587
<input type="checkbox"/>	0.002	17.000	2.500	20.000	0.000	1.000	-6.227	-0.014	0.744	0.843	0.879	0.826	0.961	0.173	0.121	0.000	0.063	69.732	1.000	0.402	0.598
<input type="checkbox"/>	0.002	17.000	3.000	20.000	0.000	1.000	-4.967	-0.011	0.744	0.842	0.878	0.823	0.964	0.169	0.116	0.000	0.062	70.013	1.023	0.392	0.608
<input type="checkbox"/>	0.003	17.000	1.500	20.000	0.000	1.000	-8.735	-0.019	0.744	0.842	0.879	0.834	0.952	0.179	0.131	0.000	0.066	69.189	0.951	0.425	0.575
<input type="checkbox"/>	0.003	12.000	1.500	20.000	0.000	1.000	-9.397	-0.021	0.743	0.838	0.873	0.802	0.943	0.199	0.149	0.000	0.081	61.416	0.814	0.483	0.517
<input type="checkbox"/>	0.002	17.000	3.500	20.000	0.000	1.000	-3.709	-0.008	0.743	0.842	0.878	0.820	0.967	0.164	0.111	0.000	0.061	70.275	1.047	0.382	0.618
<input type="checkbox"/>	0.003	17.000	1.000	20.000	0.000	1.000	-9.969	-0.022	0.743	0.842	0.880	0.839	0.947	0.182	0.135	0.000	0.068	68.946	0.927	0.437	0.563
<input type="checkbox"/>	0.004	7.000	4.000	20.000	0.000	1.000	-2.789	-0.006	0.742	0.829	0.854	0.680	0.950	0.212	0.152	0.000	0.099	50.696	0.727	0.515	0.485
<input type="checkbox"/>	0.005	7.000	3.500	20.000	0.000	1.000	-4.264	-0.009	0.742	0.828	0.854	0.688	0.946	0.214	0.156	0.000	0.103	50.825	0.706	0.527	0.473
<input type="checkbox"/>	0.002	22.000	1.500	20.000	0.000	1.000	-7.867	-0.017	0.741	0.843	0.882	0.852	0.958	0.162	0.115	0.000	0.059	75.826	1.058	0.386	0.614
<input type="checkbox"/>	0.002	17.000	4.000	20.000	0.000	1.000	-2.435	-0.005	0.741	0.841	0.877	0.817	0.969	0.160	0.106	0.000	0.061	70.427	1.069	0.373	0.627
<input type="checkbox"/>	0.002	22.000	2.000	20.000	0.000	1.000	-6.748	-0.015	0.741	0.843	0.881	0.849	0.962	0.159	0.111	0.000	0.058	76.309	1.082	0.375	0.625
<input type="checkbox"/>	0.004	12.000	1.000	20.000	0.000	1.000	-10.000	-0.023	0.741	0.837	0.872	0.808	0.937	0.200	0.152	0.000	0.085	61.412	0.791	0.496	0.504
<input type="checkbox"/>	0.002	22.000	1.000	20.000	0.000	1.000	-9.001	-0.020	0.741	0.843	0.882	0.855	0.953	0.166	0.120	0.000	0.060	75.331	1.032	0.397	0.603
<input type="checkbox"/>	0.003	17.000	0.500	20.000	0.000	1.000	-11.000	-0.025	0.741	0.841	0.879	0.843	0.941	0.184	0.139	0.000	0.071	68.729	0.902	0.450	0.550
<input type="checkbox"/>	0.003	22.000	2.500	20.000	0.000	1.000	-16.611	-0.013	0.741	0.842	0.880	0.845	0.965	0.185	0.106	0.000	0.057	76.404	1.104	0.366	0.634

Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.4.2.2. **Análisis de rejilla 1**

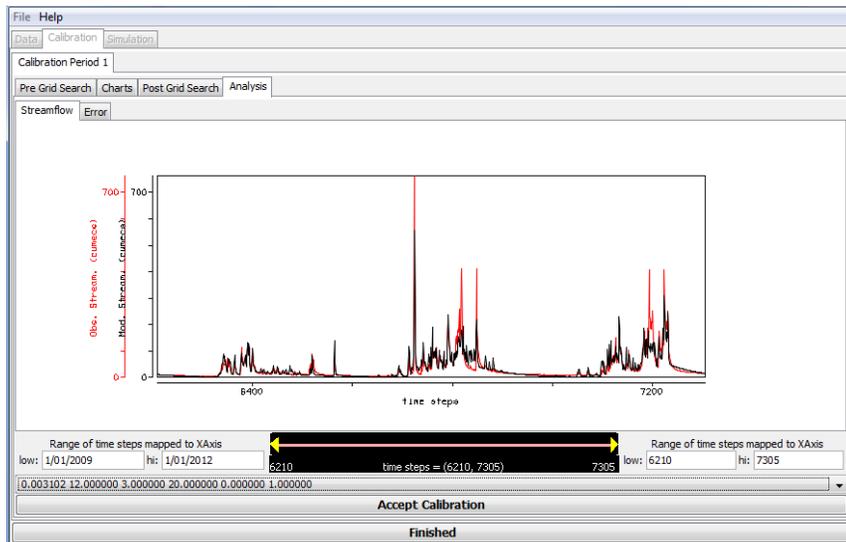
La figura 35 muestra los resultados del análisis de la primera rejilla y en ellos se observa la gráfica del hidrograma del periodo que se está utilizando para la calibración del modelo general.

Si se está conforme con los resultados obtenidos en esta calibración, se debe pulsar el botón ancho (*Accept Calibration*), para aceptar la calibración; aparecerá el cuadro de la figura 36, que muestra los resultados de la calibración en el que se debe pulsar el botón (aceptar), al aceptar los resultados de la figura 36, aparecerá nuevamente la pantalla de la figura 35 y ahora se debe pulsar el botón ancho (*Finished*). Luego aparecerá el cuadro de diálogo que se muestra en la figura 27, que pregunta si se desea finalizar con la búsqueda de rejilla actual. Si se realizaron cambios en los parámetros de la figura 33, es

conveniente guardar esa búsqueda de rejilla en la carpeta que se desee antes de pulsar el botón (Sí) de la figura 37, para poderla utilizar en nuevas simulaciones, ya que los datos de la búsqueda actual se eliminarán automáticamente. El archivo de la rejilla se guarda con la extensión (.igs).

Ahora sí, si así se desea, se pulsa el botón (Sí) de la figura 37 para finalizar con la calibración del módulo lineal. Al finalizar la calibración se muestra el resumen de los resultados de las dos calibraciones en una nueva pantalla como se observa en la figura 38.

Figura 35. **Análisis de la primera rejilla encontrada**



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 36. **Resultados de calibración de módulo no lineal**

The following non linear module parameters have been set for calibration period 1.

mass balance term (c)	0.003102
drying rate at reference temperature (tw)	12.000000
temperature dependence of drying rate (f)	3.000000
reference temperature (tref)	20.000000
moisture threshold for producing flow (l)	0.000000
power on soil moisture (p)	1.000000

The following linear module parameters have been set for calibration period 1.

Recession rate 1 ( $\alpha^{(s)}$ )	-0.984	Time constant 1 ( $\tau^{(s)}$ )	61.562
Recession rate 2 ( $\alpha^{(a)}$ )	-0.322	Time constant 2 ( $\tau^{(a)}$ )	0.883
Peak response 1 ( $\beta^{(s)}$ )	0.007	Volume proportion 1 ( $\nu^{(s)}$ )	0.446
Peak response 2 ( $\beta^{(a)}$ )	0.375	Volume proportion 2 ( $\nu^{(a)}$ )	0.554

Aceptar

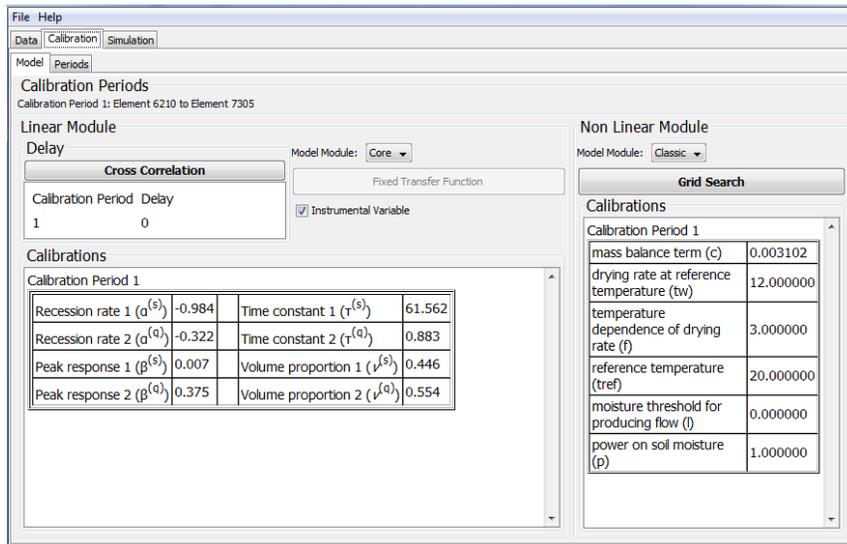
Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 37. **Mensaje de finalización de análisis de rejilla**

 Are you sure you want to finish the current grid search? This action will remove all current grid search data.

Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 38. Resultados de calibración de módulo lineal y no lineal

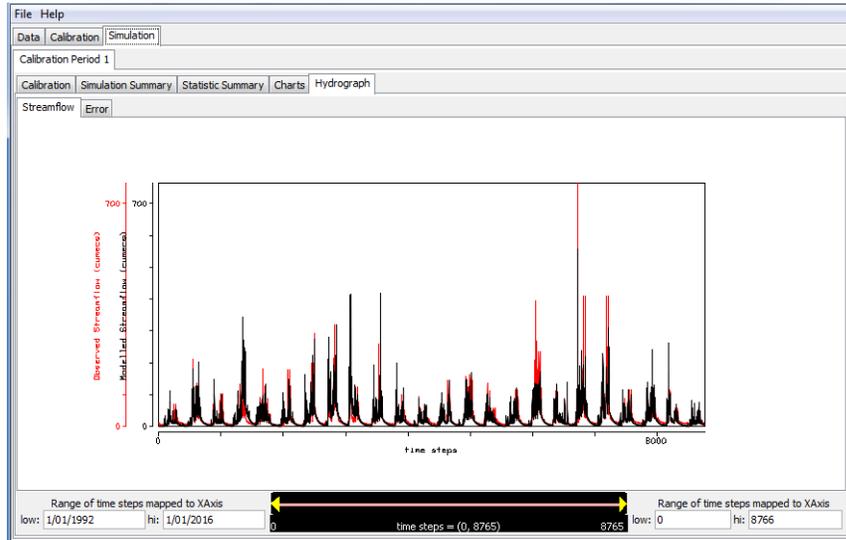


Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.5. Simulación del modelo

Habiendo desarrollado todos los pasos anteriores, se puede empezar a ejecutar la simulación del modelo desarrollado. Para realizar la simulación se pulsa la pestaña (*Simulation*), y luego se debe esperar a que el ordenador desarrolle el modelo. El resultado final del proyecto es un hidrograma en el que se muestran los datos de salida de la escorrentía modelada y los datos históricos de escorrentía ingresados al inicio del proceso, esto se muestra en la figura 39. Los resultados de la simulación se pueden ver también por periodos, los periodos que se deseen se pueden definir en los paneles (*low* y *hi*).

Figura 39. Resultado de la simulación



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.6. Otros resultados del modelo de salida

##### 4.5.6.1. Gráficos

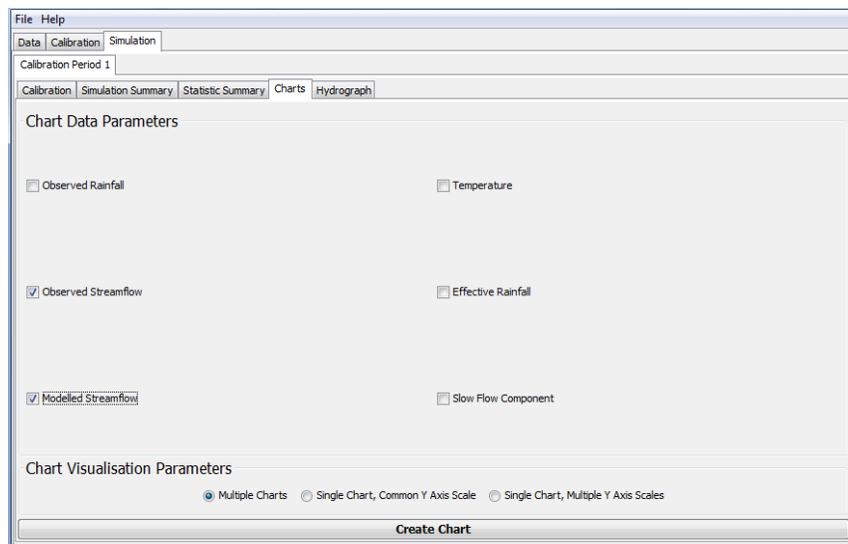
Adicional al hidrograma, el modelo también permite generar, dentro del *software*, diferentes gráficos que se pueden utilizar para realizar análisis aproximados rápidos de muchas variables de interés. Para generar los gráficos se pulsa la pestaña (*Charts*) y se mostrarán varias opciones que se muestran en la figura 40.

Como ejemplo, en la figura 40 se muestran los paneles que se deben seleccionar para la generación de los gráficos de la escorrentía modelada y escorrentía histórica observada, desarrollados en diferentes ejes, como se puede observar en la figura 41.

En la figura 42, se muestra la manera de generar la representación de dos diferentes datos en una misma gráfica, con diferentes ejes y diferentes escalas. En este caso se representan los datos de escorrentía modelada y lluvia histórica observada en un mismo gráfico, como se observa en la figura 43.

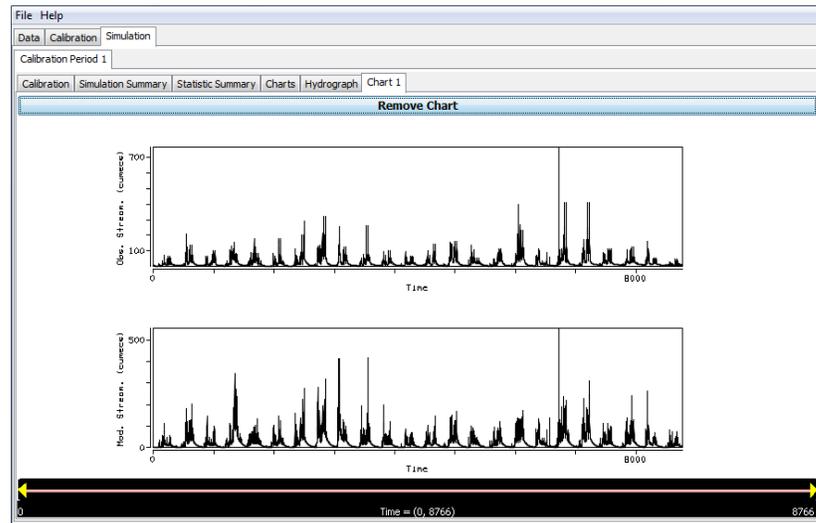
De la misma manera en que se generan los gráficos mostrados en las figuras 41 y 43, se pueden generar múltiples gráficos explorando las diferentes opciones disponibles que se muestran en las figuras 40 y 42.

Figura 40. **Ventana para generación de gráficos**



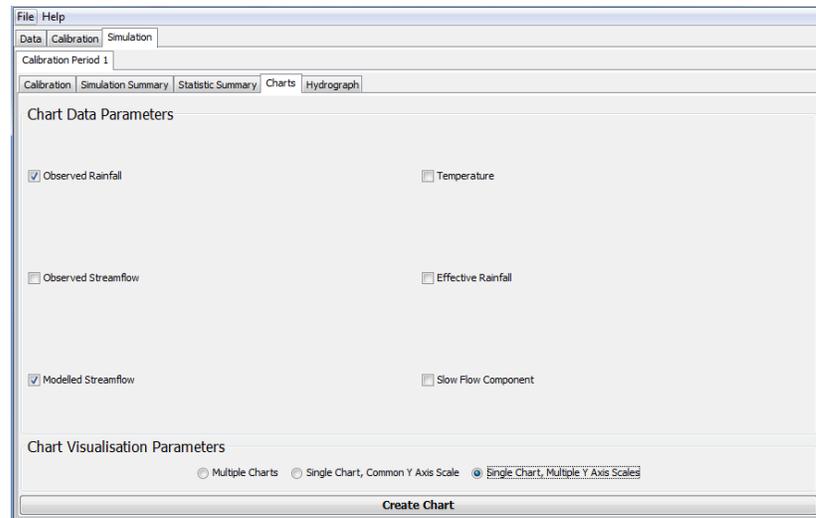
Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 41. Gráficos de escorrentía observada y modelada en diferentes ejes



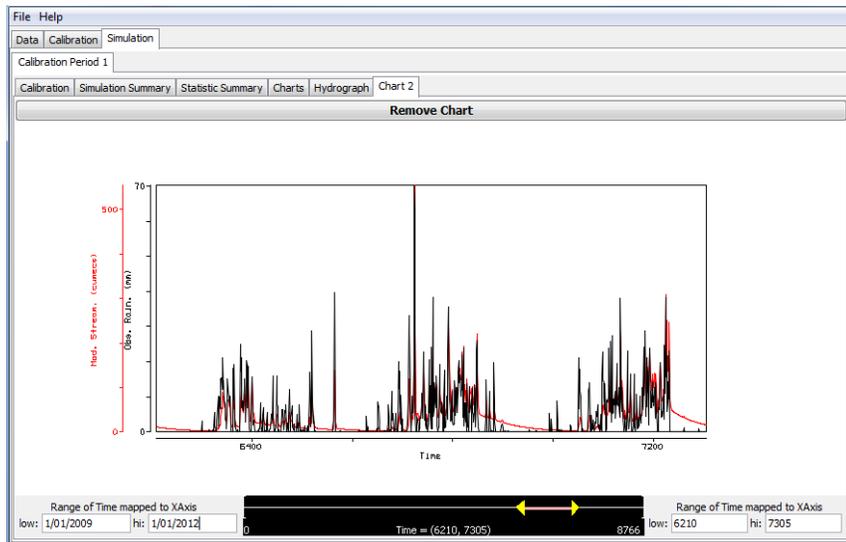
Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 42. Ventana para generación de gráficos



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 43. **Gráficos de lluvia observada y escorrentía modelada en un mismo eje con diferentes escalas**



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 4.5.6.2. Resúmenes de los datos de salida

Otro de los resultados que se pueden obtener del modelo de salida, y que es el más útil de todos, es la generación de resúmenes de los datos analizados.

En la figura 44 se muestra el resumen de un análisis estadístico por año, en él se puede observar que para esta simulación se alcanzan valores del  $R^2$ , en la columna siete, de hasta 0,78, lo que para este estudio se considera como un muy buen resultado.

En la figura 45, se muestra el resumen de la simulación, el cual contiene todos los datos diarios modelados de escorrentía, lluvia efectiva y los datos históricos observados. Los resúmenes del análisis estadístico y de la simulación

pueden ser exportados en un formato delimitado por comas, lo que permite poder realizar diferentes análisis en otros *software*.

También se genera un resumen de los resultados de la calibración general del modelo, los resultados de esta simulación se observan en la figura 46. Estos son los mismos datos que se muestran en la figura 36, cuando se acepta la calibración del módulo no lineal del modelo.

Figura 44. Resumen estadístico del modelo

File Help													
Data Calibration Simulation													
Calibration Period 1													
Calibration	Simulation Summary	Statistic Summary			Charts	Hydrograph							
Period	Number ...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R) ...
Calibratio...	1096	1337	459	-5.761	-0.013	0.746	0.840	0.873	0.791	0.957	0.191	0.137	0.000
Rest	7670	1059	328	1.316	0.004	0.387	0.587	0.653	0.351	0.637	-0.305	-0.416	42.000
Year 1	366	694	156	33.160	0.175	-0.491	-0.656	-0.348	-2.769	0.024	-0.633	-0.676	0.000
Year 2	365	1145	387	-53.307	-0.160	0.529	0.646	0.697	0.148	0.780	-0.261	-0.417	0.000
Year 3	365	753	198	47.211	0.192	0.112	0.273	0.352	0.251	0.358	-0.261	-0.340	0.000
Year 4	365	1265	617	-253.541	-0.699	-2.441	-0.296	0.297	0.312	-2.456	-0.592	-0.781	42.000
Year 5	366	1130	323	15.963	0.047	0.309	0.483	0.582	0.733	0.760	0.030	-0.024	0.000
Year 6	365	1040	250	21.416	0.079	0.484	0.679	0.799	0.808	0.759	0.125	0.128	0.000
Year 7	365	1161	398	-5.804	-0.015	0.691	0.772	0.830	0.683	0.931	-0.056	-0.098	0.000
Year 8	365	1355	633	-71.199	-0.127	0.717	0.825	0.870	0.770	0.883	-0.167	-0.255	0.000
Year 9	366	1268	561	-178.482	-0.468	-0.253	0.481	0.691	0.854	0.081	-0.519	-0.700	0.000
Year 10	365	1125	354	-44.828	-0.145	-0.341	0.381	0.633	0.483	0.777	-0.339	-0.498	0.000
Year 11	365	884	247	26.348	0.096	0.155	0.409	0.477	0.025	0.684	-0.355	-0.487	0.000
Year 12	365	862	175	53.621	0.234	0.520	0.443	0.414	-0.246	0.799	-0.246	-0.281	0.000
Year 13	366	978	245	63.451	0.205	0.582	0.591	0.597	-0.048	0.835	-0.092	-0.111	0.000
Year 14	365	1176	360	96.568	0.212	0.724	0.830	0.890	0.878	0.867	0.150	0.228	0.000
Year 15	365	971	224	56.857	0.202	0.736	0.691	0.657	0.314	0.852	-0.263	-0.205	0.000
Year 16	365	987	253	28.681	0.102	0.535	0.660	0.701	0.262	0.844	-0.217	-0.221	0.000
Year 17	366	1295	462	82.358	0.151	0.650	0.819	0.889	0.774	0.871	0.046	0.129	0.000
Year 18	365	1027	266	-3.024	-0.012	0.736	0.778	0.790	0.709	0.893	-0.314	-0.413	0.000
Year 19	365	1545	564	-36.811	-0.070	0.706	0.821	0.885	0.868	0.917	0.264	0.185	0.000
Year 20	365	1449	551	22.556	0.039	0.776	0.860	0.885	0.732	0.930	0.185	0.183	0.000
Year 21	366	1120	289	89.816	0.237	0.680	0.658	0.650	0.443	0.718	0.043	0.078	0.000
Year 22	365	1283	356	-23.057	-0.069	-0.196	0.025	0.132	-1.062	-0.213	-0.585	-0.745	0.000
Year 23	365	993	270	32.363	0.107	0.668	0.481	0.402	-0.706	0.874	-0.046	-0.273	0.000
Year 24	365	802	147	9.748	0.062	-1.621	-1.930	-1.796	-5.064	-1.011	-0.527	-0.710	0.000

Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

Figura 45. Resumen de la simulación del modelo

Date and Time	Obs. Rain. (mm)	Temperature (cels...	Obs. Stream. (cu...	Eff. Rain. (mm)	Mod. Stream. (cu...
1992/01/01 12:00	0.000000	11.640000	8.420000	0.000000	0.000000
1992/01/02 12:00	0.000000	12.090000	8.450000	0.000000	0.000000
1992/01/03 12:00	0.000000	11.840000	8.200000	0.000000	0.000000
1992/01/04 12:00	0.000000	13.310000	8.280000	0.000000	0.000000
1992/01/05 12:00	0.000000	13.930000	8.310000	0.000000	0.000000
1992/01/06 12:00	0.000000	12.770000	8.180000	0.000000	0.000000
1992/01/07 12:00	0.000000	12.620000	8.180000	0.000000	0.000000
1992/01/08 12:00	0.000000	10.670000	7.990000	0.000000	0.000000
1992/01/09 12:00	0.000000	12.270000	7.860000	0.000000	0.000000
1992/01/10 12:00	0.000000	10.770000	7.780000	0.000000	0.000000
1992/01/11 12:00	0.000000	12.350000	7.910000	0.000000	0.000000
1992/01/12 12:00	0.000000	12.240000	7.810000	0.000000	0.000000
1992/01/13 12:00	0.000000	14.420000	7.650000	0.000000	0.000000
1992/01/14 12:00	0.000000	12.940000	7.560000	0.000000	0.000000
1992/01/15 12:00	0.000000	11.420000	7.630000	0.000000	0.000000
1992/01/16 12:00	0.000000	11.240000	7.690000	0.000000	0.000000
1992/01/17 12:00	0.000000	13.410000	7.500000	0.000000	0.000000
1992/01/18 12:00	0.000000	12.800000	7.540000	0.000000	0.000000
1992/01/19 12:00	0.000000	11.530000	7.540000	0.000000	0.000000
1992/01/20 12:00	0.000000	12.010000	7.310000	0.000000	0.000000
1992/01/21 12:00	0.000000	11.890000	7.320000	0.000000	0.000000
1992/01/22 12:00	0.000000	12.080000	7.280000	0.000000	0.000000
1992/01/23 12:00	0.000000	12.300000	4.190000	0.000000	0.000000
1992/01/24 12:00	0.000000	12.650000	3.660000	0.000000	0.000000
1992/01/25 12:00	0.000000	12.270000	3.770000	0.000000	0.000000
1992/01/26 12:00	0.000000	13.010000	3.710000	0.000000	0.000000

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

Figura 46. Resumen de la calibración del modelo

Calibration			
Non Linear Model Module Calibration			
mass balance term (c)	0.003102		
drying rate at reference temperature (tw)	12.000000		
temperature dependence of drying rate (f)	3.000000		
reference temperature (tref)	20.000000		
moisture threshold for producing flow (l)	0.000000		
power on soil moisture (p)	1.000000		
Linear Model Module Calibration			
Recession rate 1 ( $\alpha^{(s)}$ )	-0.984	Time constant 1 ( $\tau^{(s)}$ )	61.562
Recession rate 2 ( $\alpha^{(a)}$ )	-0.322	Time constant 2 ( $\tau^{(a)}$ )	0.883
Peak response 1 ( $\beta^{(s)}$ )	0.007	Volume proportion 1 ( $\nu^{(s)}$ )	0.446
Peak response 2 ( $\beta^{(a)}$ )	0.375	Volume proportion 2 ( $\nu^{(a)}$ )	0.554

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

## 5. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de las dos mejores simulaciones realizadas durante este estudio para encontrar el modelo lluvia-escorrentía a escala diaria y a escala mensual más eficientes en una parte de la cuenca alta del río Chixoy, desarrollado con la metodología IHACRES. Los mejores resultados para la zona de estudio se encontraron tras varias simulaciones realizadas con el *software* IHACRES.

Las primeras simulaciones se realizaron utilizando los datos promedios estimados por medio del método de los polígonos de Thiessen, tal y como la metodología los estimó. Todas las simulaciones se hicieron utilizando diferentes periodos de calibración para encontrar el modelo más efectivo.

Luego de realizar varias simulaciones con los primeros datos, se decidió realizar nuevas simulaciones utilizando los mismos datos que se utilizaron en las primeras simulaciones, solamente haciéndoles un cambio, el cambio consistió en correr los datos de lluvia un día hacia adelante, es decir, en cualquier día dado se utilizó para la modelación la medición de lluvia del día de ayer en lugar de la de hoy; con lo que se obtuvieron los modelos más efectivos del estudio.

El cambio en los datos de lluvia se hizo debido a que durante la modelación con los primeros datos se determinó con los resultados del *software*, que la escorrentía de cualquier día de la serie de datos se correlaciona mejor con el dato de lluvia del día anterior que con el del mismo día, lo anterior es debido a la manera en cómo se realiza la toma de datos de

lluvia, apuntando como dato del día de hoy, la medición que se hace en horas de la mañana, el dato que se toma en una hora muy temprana del día, representa más la lluvia que ocurrió el día anterior que la que ocurrirá el día de la toma de ese dato.

### **5.1. Definición de los periodos de calibración**

Los periodos de calibración se definieron sabiendo que la metodología de modelado IHACRES recomienda que si se desean modelar eventos extremos, es decir, tormentas y sequías, se debe utilizar idealmente un periodo de calibración que contenga registros de años con tales características. En cambio, si el enfoque del modelo es para identificar flujos bajos, entonces se debe evitar incluir años con condiciones muy húmedas.

La metodología utilizada indica que para cuencas templadas y húmedas, como es el caso de la zona de estudio, un periodo de calibración de dos o tres años es por lo general suficiente. Para cuencas áridas o semiáridas, posiblemente sea necesario un periodo más largo de calibración. Aunque la metodología establece parámetros que facilitan el desarrollo del modelado, podría ser necesario probar varios periodos de calibración hasta encontrar el más adecuado a las necesidades que se deseen representar con el modelo.

Los últimos años de registros históricos con los que se contó, presentaban una gran variabilidad en el clima de la zona y fueron los ideales para utilizar como calibración para uno de los modelos, los años del 2009 al 2012 contenían registros de picos muy altos de escorrentía y también condiciones bajas. Mientras que los años desde 1996 hasta el 2001 contenían datos intermedios de escorrentía.

Los análisis anteriores, sirvieron para definir dos periodos de calibración, que luego de probar muchos otros periodos, arrojaron los mejores resultados para el estudio. Los periodos definidos fueron: el primero, desde el 1 de enero de 2009 hasta el 1 de enero de 2012; y el segundo, desde el 1 de enero de 1997 hasta el 1 de enero de 2000.

En las secciones (5.2 y 5.3), se muestran los resultados de las mejores simulaciones a escala diaria y en la sección (5.6), se muestra el mejor resultado a escala mensual para el estudio.

## **5.2. Primeras simulaciones**

Las primeras simulaciones se realizaron, como se mencionó anteriormente, con los datos obtenidos tal y como los estimo el método de los polígonos de Thiessen, estas simulaciones son las que se utilizaron para definir los mejores periodos de calibración descritos en la sección (5.1).

### **5.2.1. Simulaciones para el periodo de datos 1985-2015**

Uno de los periodos de datos definidos en el capítulo durante el procesamiento de datos es el de 1985 a 2015, a continuación se describen los resultados que se obtuvieron de las mejores simulaciones realizadas.

#### **5.2.1.1. Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012**

Para el primer periodo de calibración la correlación ente los datos de escorrentía y lluvia presento un desfase de un día, es decir, los datos de

escorrentía de cualquier día dado se correlacionaron mejor con los datos de lluvia del día de ayer que con los de hoy.

Los resultados estadísticos de esta simulación se mostraron que el modelo presenta muy buenos resultados en la mayoría los años, alcanzando un  $R^2$  de hasta 0,77 en el año 2011, año que fue lluvioso y con registros altos de escorrentía, pero con un ajuste bastante variado en los demás años modelados, mostrando los mejores valores de  $R^2$  en los años con registros altos de escorrentía.

#### **5.2.1.2. Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 1997 al 1 de enero de 2000**

Esta simulación, de la misma manera que la anterior, mostró un desfase con las mismas características entre la escorrentía y la lluvia.

En cuanto al análisis estadístico se observó que el  $R^2$  alcanza valores de hasta 0,81 en el año 1999 que fue un año con registros bajos de escorrentía, los mejores valores de  $R^2$  en esta modelación fueron en los años con registros bajos de escorrentía.

#### **5.2.2. Simulaciones para el periodo de datos 1992-2015**

El periodo de datos de 1992 a 2015, es el segundo periodo de datos definido durante el procesamiento de datos. Para los dos mejores periodos de calibración, ocurrió el mismo desfase entre los datos de escorrentía y lluvia que se observó para el periodo de datos anterior, es decir, la escorrentía de cualquier día dado se correlacionó mejor con los datos de lluvia del día anterior.

#### **5.2.2.1. Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012**

Los resultados estadísticos de este modelo, mostraron valores de  $R^2$  de hasta 0,77, aunque en éste caso la gama de los valores de  $R^2$  en los demás años, son más altos que los de la simulación con el mismo periodo de calibración para el periodo de datos de 1985 a 2015, los mejores ajustes de dieron en los años con registros altos de escorrentía. Por lo que se considera que la simulación con este periodo de calibración, genera mejores resultados utilizando el periodo de datos de 1992 a 2015.

#### **5.2.2.2. Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 1997 al 1 de enero de 2000**

Para éste modelo, los resultados estadísticos mostraron que los mejores valores de  $R^2$ , se dieron en los años con registros bajos de escorrentía, como el 0,82 en año 1999. Los valores de  $R^2$  en los demás años también son bastante buenos, mejores que los obtenidos con este periodo de calibración con el periodo de datos de 1985 a 2015.

### **5.3. Simulaciones con los datos de lluvia corridos un día hacia adelante**

Las simulaciones que se presentan en esta sección son las que se realizaron con el cambio en los datos de lluvia y son las que presentaron los mejores resultados para el estudio a escala diaria.

En las simulaciones presentadas en la sección anterior se puede observar que el periodo de datos que mayores eficiencias presenta, es el de 1992 a 2015, y lo mismo sucedió con el cambio en los datos de lluvia, por lo que en esta sección se presentan únicamente las simulaciones realizadas para este periodo.

Haber corrido los datos de lluvia un día hacia adelante, permitió que los datos de escorrentía se correlacionaran con los datos de lluvia de ese mismo día. Se consiguió corregir el desfase entre la escorrentía y la lluvia que presentaron todas las simulaciones de la sección (5.2), que aunque son bastante buenos, se lograron mejorar con las nuevas simulaciones realizadas.

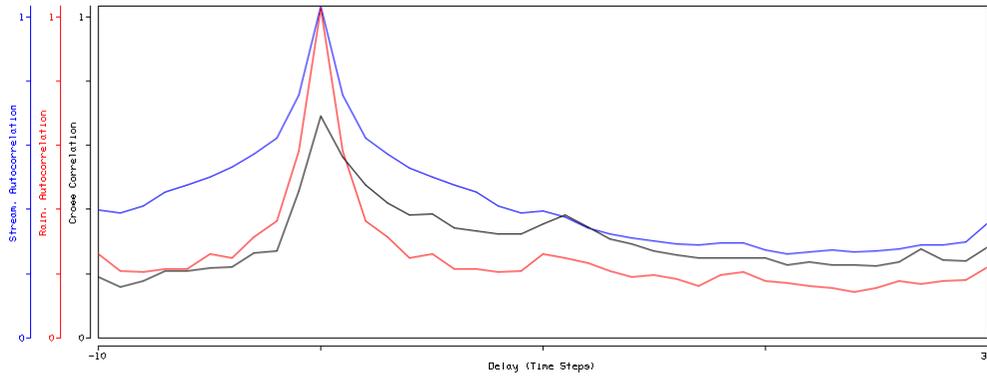
### **5.3.1. Simulaciones para el periodo de datos 1992-2015**

En esta sección se muestran las dos mejores simulaciones de todo el estudio, las cuales son los dos modelos a escala diaria finales para la zona de estudio en la cuenca alta del río Chixoy.

#### **5.3.1.1. Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012 (MODELO 1)**

Esta simulación se realizó con el objetivo de corregir el desfase que se presentó en las primeras simulaciones realizadas para el primer periodo de calibración. El objetivo se consiguió al lograr correlacionar los datos de escorrentía de cualquier día dado de los datos de lluvia de ese mismo día, como se observa en la figura 47, en la que los tres picos de los gráficos se encuentran alineados entre sí, lo que indica una correlación ideal entre los datos de escorrentía y de lluvia.

Figura 47. Correlación de datos



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

En la figura 48 se muestra el resultado del análisis estadístico obtenido para este modelo, en la columna siete de la tabla se muestran los resultados del coeficiente de determinación  $R^2$ , el que según la metodología muestra la eficiencia del modelo para cada año. En la siguiente tabla se muestra la correspondencia de años de la columna uno de la figura 48, con el año del periodo analizado.

Tabla II. **Correspondencia entre los años que genera el *software* y el año del periodo de datos de estudio**

<b>Año en la figura 45</b>	<b>Año en el periodo de datos</b>
1	1992
2	1993
3	1994
4	1995
5	1996
6	1997
7	1998
8	1999
9	2000
10	2001
11	2002
12	2003
13	2004
14	2005
15	2006
16	2007
17	2008
18	2009
19	2010
20	2011
21	2012
22	2013
23	2014
24	2015

Fuente: elaboración propia.

Conociendo la correspondencia entre los años mostrada en la tabla anterior ya se puede comprender de mejor manera la tabla que se muestra en la figura 48. El análisis estadístico mostró que el modelo caracteriza con mucha eficiencia los años que registraron escorrentía con picos altos y los años previos y posteriores a ellos, los años con los registros de los picos más altos son el 8,

17, 19 y 20, que corresponden a los años 1999, 2008, 2010 y 2011 respectivamente, en estos años se alcanzan eficiencias bastante buenas con valores de  $R^2$  de hasta 0,77 en 2011. Los años con valores bastante bajos o negativos, contienen características muy diferentes al periodo de calibración utilizado.

Los valores de  $R^2$  son los que se muestran en la columna siete de las tablas del resumen estadístico de las simulaciones.

Figura 48. Resumen estadístico del modelo

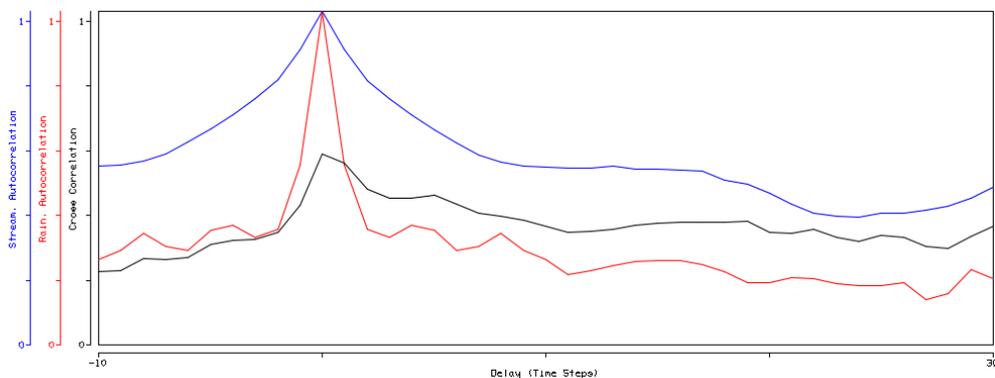
Period	Number...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R)...
Calibratio...	1096	1337	459	-5.761	-0.013	0.746	0.840	0.873	0.791	0.957	0.191	0.137	0.000
Rest	7670	1059	328	1.316	0.004	0.387	0.587	0.653	0.351	0.637	-0.305	-0.416	42.000
Year 1	366	694	156	33.160	0.175	-0.491	-0.656	-0.348	-2.769	0.024	-0.633	-0.676	0.000
Year 2	365	1145	387	-53.307	-0.160	0.529	0.646	0.697	0.148	0.780	-0.261	-0.417	0.000
Year 3	365	753	198	47.211	0.192	0.112	0.273	0.352	0.251	0.358	-0.261	-0.340	0.000
Year 4	365	1265	617	-253.541	-0.699	-2.441	-0.296	0.297	0.312	-2.456	-0.592	-0.781	42.000
Year 5	366	1130	323	15.963	0.047	0.309	0.483	0.582	0.733	0.760	0.030	-0.024	0.000
Year 6	365	1040	250	21.416	0.079	0.484	0.679	0.799	0.808	0.759	0.125	0.128	0.000
Year 7	365	1161	398	-5.804	-0.015	0.691	0.772	0.830	0.683	0.931	-0.056	-0.098	0.000
Year 8	365	1355	633	-71.199	-0.127	0.717	0.825	0.870	0.770	0.883	-0.167	-0.255	0.000
Year 9	366	1268	561	-178.482	-0.468	-0.253	0.481	0.691	0.854	0.081	-0.519	-0.700	0.000
Year 10	365	1125	354	-44.828	-0.145	-0.341	0.381	0.633	0.483	0.777	-0.339	-0.498	0.000
Year 11	365	884	247	26.348	0.096	0.155	0.409	0.477	0.025	0.684	-0.355	-0.487	0.000
Year 12	365	862	175	53.621	0.234	0.520	0.443	0.414	-0.246	0.799	-0.246	-0.281	0.000
Year 13	366	978	245	63.451	0.205	0.582	0.591	0.597	-0.048	0.835	-0.092	-0.111	0.000
Year 14	365	1176	360	96.568	0.212	0.724	0.830	0.890	0.878	0.867	0.150	0.228	0.000
Year 15	365	971	224	56.857	0.202	0.736	0.691	0.657	0.314	0.852	-0.263	-0.205	0.000
Year 16	365	987	253	28.681	0.102	0.535	0.660	0.701	0.262	0.844	-0.217	-0.221	0.000
Year 17	366	1295	462	82.358	0.151	0.650	0.819	0.889	0.774	0.871	0.046	0.129	0.000
Year 18	365	1027	266	-3.024	-0.012	0.736	0.778	0.790	0.709	0.893	-0.314	-0.413	0.000
Year 19	365	1545	564	-36.811	-0.070	0.706	0.821	0.885	0.868	0.917	0.264	0.185	0.000
Year 20	365	1449	551	22.556	0.039	0.776	0.860	0.885	0.732	0.930	0.185	0.183	0.000
Year 21	366	1120	289	89.816	0.237	0.680	0.658	0.650	0.443	0.718	0.043	0.078	0.000
Year 22	365	1283	356	-23.057	-0.069	-0.196	0.025	0.132	-1.062	-0.213	-0.585	-0.745	0.000
Year 23	365	993	270	32.363	0.107	0.668	0.481	0.402	-0.706	0.874	-0.046	-0.273	0.000
Year 24	365	802	147	9.748	0.062	-1.621	-1.930	-1.796	-5.064	-1.011	-0.527	-0.710	0.000

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

### 5.3.1.2. Simulación con el periodo de calibración del 1 de enero de 1997 al 1 de enero de 2000 (MODELO 2)

Esta simulación, de la misma forma que el MODELO 1, se hizo con los datos de lluvia corridos un día hacia adelante, consiguiendo corregir el desfase ocurrido en las primeras simulaciones para este periodo de calibración, como se muestra en la figura 49.

Figura 49. Correlación de datos



Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

El análisis estadístico para el MODELO 2, que se muestra en la figura 50, permitió determinar que el modelo caracteriza con mucha eficiencia los años en los que los registros de escorrentía fueron bajos y los años previos y posteriores a ellos. Los años con registros bajos que mejor se modelan son: el 2, 14, 15, 18, 20, 21 y 23, que corresponden a los años 1993, 2005, 2006, 2009, 2011, 2012 y 2014, respectivamente. En estos años se alcanzan valores de  $R^2$  de hasta 0,81 en el año 2009. Y una gama de valores bastante buenos de  $R^2$  en los demás años modelados.

Figura 50. Resumen estadístico del modelo

Period	Number...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R)...
Calibratio...	1096	1182	401	7.264	0.018	0.760	0.834	0.866	0.752	0.935	0.074	0.014	0.000
Rest	7670	1081	313	23.123	0.069	0.606	0.693	0.718	0.399	0.789	-0.058	-0.159	0.000
Year 1	366	694	149	39.974	0.211	0.077	-0.403	-0.173	-2.798	0.403	-0.563	-0.618	0.000
Year 2	365	1145	378	-44.116	-0.132	0.595	0.705	0.757	0.430	0.745	-0.130	-0.351	0.000
Year 3	365	753	190	55.583	0.226	0.270	0.371	0.432	0.383	0.420	-0.082	-0.183	0.000
Year 4	365	1265	526	-163.240	-0.450	-0.737	0.164	0.471	0.389	-0.711	-0.454	-0.734	0.000
Year 5	366	1130	344	-5.102	-0.015	0.416	0.565	0.644	0.751	0.812	0.122	-0.000	0.000
Year 6	365	1040	241	30.594	0.113	0.529	0.722	0.812	0.767	0.765	0.247	0.302	0.000
Year 7	365	1161	372	20.461	0.052	0.785	0.823	0.855	0.721	0.961	0.072	0.083	0.000
Year 8	365	1355	590	-29.105	-0.052	0.825	0.891	0.913	0.832	0.956	0.044	-0.087	0.000
Year 9	366	1268	512	-129.511	-0.339	0.572	0.713	0.785	0.895	0.647	-0.496	-0.697	0.000
Year 10	365	1125	333	-23.645	-0.076	0.311	0.617	0.755	0.673	0.889	-0.284	-0.457	0.000
Year 11	365	884	229	44.492	0.163	0.521	0.533	0.535	0.111	0.854	-0.209	-0.384	0.000
Year 12	365	862	157	71.567	0.313	0.594	0.506	0.462	-0.176	0.747	0.042	0.040	0.000
Year 13	366	978	228	80.893	0.262	0.627	0.639	0.639	-0.000	0.779	0.119	0.147	0.000
Year 14	365	1176	350	105.641	0.232	0.729	0.844	0.905	0.914	0.858	0.287	0.372	0.000
Year 15	365	971	215	65.892	0.235	0.760	0.761	0.743	0.536	0.834	0.109	0.238	0.000
Year 16	365	987	241	40.286	0.143	0.672	0.745	0.758	0.353	0.898	-0.094	-0.105	0.000
Year 17	366	1295	452	91.906	0.169	0.685	0.864	0.927	0.858	0.902	0.157	0.261	0.000
Year 18	365	1027	244	18.169	0.069	0.819	0.822	0.820	0.774	0.898	0.093	0.036	0.000
Year 19	365	1545	532	-5.235	-0.010	0.590	0.806	0.891	0.876	0.891	0.325	0.263	0.000
Year 20	365	1449	517	56.104	0.098	0.782	0.888	0.922	0.835	0.933	0.244	0.307	0.000
Year 21	366	1120	275	103.693	0.274	0.689	0.691	0.689	0.477	0.682	0.275	0.403	0.000
Year 22	365	1283	331	1.848	0.006	0.295	0.227	0.247	-0.946	0.154	-0.495	-0.747	0.000
Year 23	365	993	242	60.857	0.201	0.775	0.545	0.454	-0.656	0.872	0.221	0.024	0.000
Year 24	365	802	137	19.199	0.123	-0.536	-1.332	-1.381	-4.558	-0.605	-0.433	-0.733	0.000

Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

#### 5.4. Modelos finales definidos

Después de haber realizado varios análisis, se definieron los dos mejores modelos para la zona de estudio. Los cuales son una herramienta para realizar pronósticos de datos de escorrentía y para completación de datos faltantes.

El primero, es el MODELO 1, el cual se puede utilizar si se desea modelar eventos futuros en los que se tienen pronosticados datos altos de lluvia, esto es porque según los registros históricos, y como es de esperarse, cuando se registraron datos altos de lluvia, también se registraron datos altos de escorrentía y sucedió lo mismo en los registros bajos de lluvia y escorrentía.

Y el MODELO 2, que se puede utilizar si lo que se espera, con base en pronósticos de bajas lluvias, son datos bajos de escorrentía.

Ambos modelos pueden generar pronósticos con datos bastante confiables a escala diaria, si se aplican de la manera correcta.

## **5.5. Aplicación de los modelos desarrollados para pronóstico de datos de escorrentía**

Una de las principales aplicaciones para los modelos lluvia-escorrentía, es el pronóstico de los datos de escorrentía. Los modelos desarrollados en este estudio se pueden aplicar para el pronóstico de datos de escorrentía para varios años si se conocen los datos de lluvia y temperatura de todas las estaciones del área de estudio. El MODELO 1, se puede utilizar para pronóstico de datos de escorrentía de hasta cuatro años. El MODELO 2, se puede utilizar para pronósticos de hasta diez años.

### **5.5.1. ¿Cómo pronosticar datos de escorrentía?**

Para pronosticar los datos de escorrentía aplicando los modelos desarrollados, solamente se necesita agregar los datos de lluvia y de temperatura que se esperan, a los datos de los archivos delimitados por comas que se utilizaron para desarrollar cada modelo y hacer una nueva simulación. La nueva simulación se puede hacer con ayuda de lo descrito en el capítulo cuatro de este estudio. Y utilizando los periodos de calibración que correspondan a lo que se desee pronosticar.

Para mostrar los resultados del pronóstico que se alcanza con los modelos desarrollados en este estudio, se utilizará el MODELO 1.

### **5.5.2. Pronóstico de escorrentía con datos de lluvia y temperatura**

Si se tuvieran pronosticados los datos de lluvia y de temperatura para el periodo que se desee pronosticar los datos de escorrentía, el MODELO 1 podría generar valores con una alta eficiencia. Ya que el modelo IHACRES es capaz de prolongar datos de escorrentía si se cuenta con una buena base de datos.

Para mostrar la eficiencia del modelo, se eliminaron los datos de los últimos cuatro años de los registros de escorrentía históricos con los que se contó (de 2012 a 2015), y utilizando los datos de lluvia y temperatura históricos como posibles datos pronosticados para los cuatro años de prueba, se hizo una nueva simulación sin los datos de escorrentía. De esta manera se pudieron comparar los valores de escorrentía de los últimos cuatro años del MODELO 1 con los valores que generó el *software* en la simulación sin los últimos cuatro años de escorrentía.

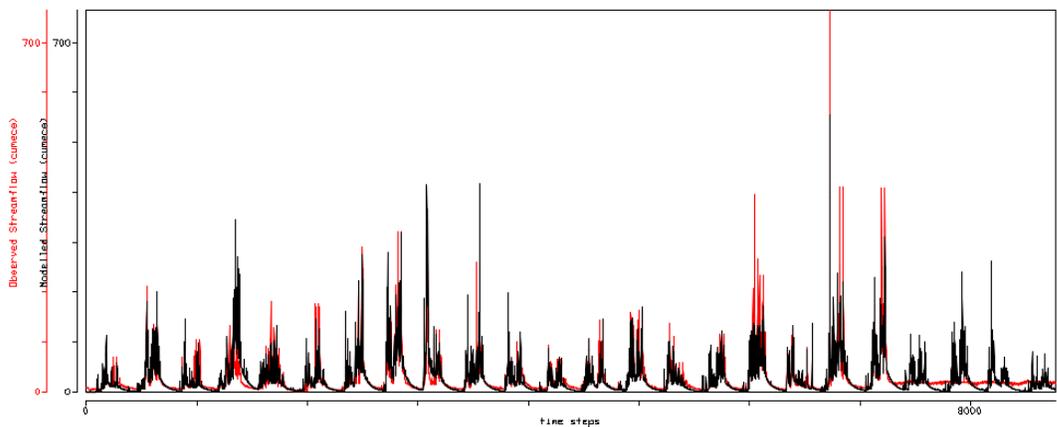
En el análisis estadístico de la nueva simulación que se muestra en la figura 51, se puede observar que para los últimos cuatro años se obtuvieron valores de  $R^2$  negativos, lo que indicaría una mala efectividad, pero esto es porque los datos modelados no tienen datos históricos para ser analizados. En la figura 52, se muestra el resultado de la simulación realizada sin los últimos cuatro años de escorrentía. En la figura se puede observar el gráfico en color rojo, que representa los datos históricos de escorrentía, al final se convierte en una línea recta indicando a ausencia de datos. En color negro representa la escorrentía modelada, se observa la manera en la que el *software* realiza la prolongación de los de escorrentía.

Figura 51. Resumen estadístico del modelo

Period	Number ...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...)	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R) ...
Calibrato...	1096	1337	459	-5.762	-0.013	0.746	0.840	0.873	0.791	0.957	0.191	0.137	0.000
Rest	7670	1059	328	-6.913	-0.021	0.245	0.411	0.461	0.094	0.526	-0.339	-0.461	42.000
Year 1	366	694	156	33.160	0.175	-0.491	-0.656	-0.348	-2.769	0.024	-0.633	-0.676	0.000
Year 2	365	1145	387	-53.308	-0.160	0.529	0.646	0.697	0.148	0.780	-0.261	-0.417	0.000
Year 3	365	753	198	47.211	0.192	0.112	0.273	0.352	0.251	0.358	-0.261	-0.340	0.000
Year 4	365	1265	617	-253.541	-0.699	-2.441	-0.296	0.297	0.312	-2.456	-0.592	-0.781	42.000
Year 5	366	1130	323	15.962	0.047	0.309	0.483	0.582	0.733	0.760	0.030	-0.024	0.000
Year 6	365	1040	250	21.416	0.079	0.484	0.679	0.799	0.808	0.759	0.125	0.128	0.000
Year 7	365	1161	398	-5.805	-0.015	0.691	0.772	0.830	0.683	0.931	-0.056	-0.098	0.000
Year 8	365	1355	633	-71.200	-0.127	0.717	0.825	0.870	0.770	0.883	-0.167	-0.255	0.000
Year 9	366	1268	561	-178.484	-0.468	-0.253	0.481	0.691	0.854	0.081	-0.519	-0.700	0.000
Year 10	365	1125	354	-44.828	-0.145	-0.341	0.381	0.633	0.483	0.777	-0.339	-0.498	0.000
Year 11	365	884	247	26.347	0.096	0.155	0.409	0.477	0.025	0.684	-0.355	-0.487	0.000
Year 12	365	862	175	53.620	0.234	0.520	0.443	0.414	-0.246	0.799	-0.246	-0.281	0.000
Year 13	366	978	246	63.450	0.205	0.582	0.591	0.597	-0.047	0.835	-0.092	-0.111	0.000
Year 14	365	1176	360	96.567	0.212	0.724	0.830	0.890	0.878	0.867	0.150	0.228	0.000
Year 15	365	971	224	56.856	0.202	0.756	0.691	0.657	0.314	0.852	-0.263	-0.205	0.000
Year 16	365	987	253	28.680	0.102	0.535	0.660	0.701	0.262	0.844	-0.217	-0.221	0.000
Year 17	366	1295	462	82.357	0.151	0.650	0.819	0.889	0.774	0.871	0.046	0.129	0.000
Year 18	365	1027	266	-3.025	-0.012	0.736	0.778	0.790	0.709	0.893	-0.314	-0.413	0.000
Year 19	365	1545	564	-36.812	-0.070	0.706	0.821	0.885	0.868	0.917	0.264	0.185	0.000
Year 20	365	1449	551	22.555	0.039	0.776	0.860	0.885	0.732	0.930	0.185	0.183	0.000
Year 21	366	1120	289	-39.267	-0.157	-133.471	-79.198	-67.865	-59.743	-77.514	-0.547	-0.791	0.000
Year 22	365	1283	356	-102.606	-0.405	-436.824	-222.278	-173.191	-169.520	-705.882	-0.599	-0.838	0.000
Year 23	365	993	270	-24.586	-0.100	-198.919	-104.167	-84.428	-86.982	-186.242	-0.531	-0.784	0.000
Year 24	365	802	147	102.777	0.412	-75.334	-108.201	-90.983	-146.127	-72.342	-0.610	-0.823	0.000

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

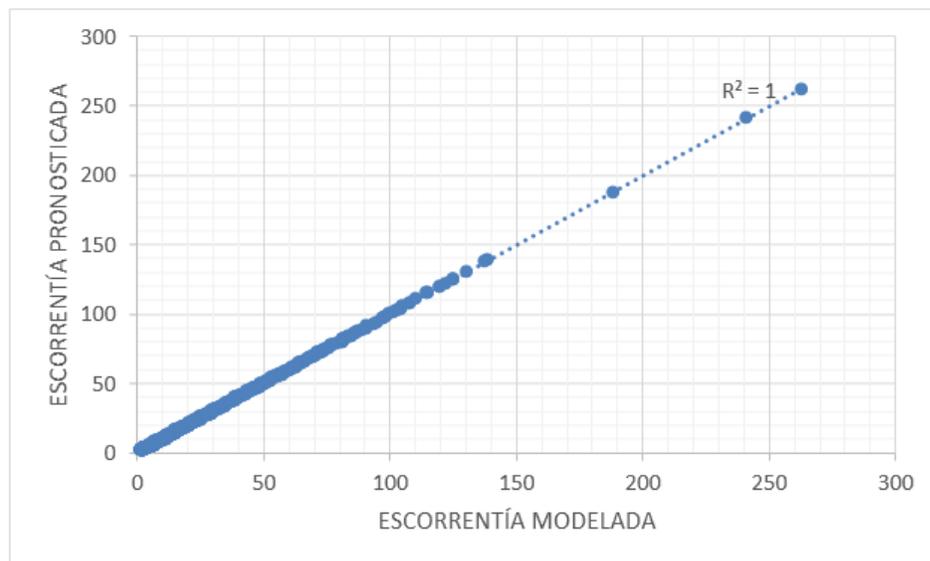
Figura 52. Resultado de la simulación



Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

Al realizar la comparación entre los datos de los últimos cuatro años del MODELO 1, con los datos pronosticados en la simulación sin los últimos cuatro años de registros de escorrentía, el resultado es bastante bueno, ya que se obtuvo un valor de  $R^2$  de 1, como se muestra en la figura 53, lo que indica una alta eficiencia del MODELO 1 aplicable para el pronóstico de datos de escorrentía en donde se esperen lluvias intensas.

Figura 53. **Escorrentía modelada frente a escorrentía pronosticada**



Fuente: elaboración propia.

### **5.5.3. Pronóstico de escorrentía solamente con datos de lluvia**

Generalmente, se cuenta con pronósticos de lluvias, por lo que este dato no sería un problema para el pronóstico de datos de escorrentía. Mientras que para los datos de temperatura no es común que se pronostiquen condiciones futuras, por esta razón, en este estudio se realizó un pronóstico de datos de escorrentía para los mismos cuatro años de prueba utilizados en el pronóstico anterior (de 2012 a 2015), utilizando los datos de lluvia históricos como posibles datos pronosticados.

En cuanto a los datos de temperatura se propone que se puedan utilizar datos promedios históricos para cada día del año, con esto no sería necesario contar con un pronóstico sofisticado de datos de temperatura. A continuación se muestran los resultados obtenidos para el pronóstico de escorrentía de los últimos cuatro años del periodo estudiado.

En el análisis estadístico que se muestra en la figura 54, de la misma manera que en el pronóstico anterior, se observan valores de  $R^2$  negativos en los últimos años, como se indicó anteriormente, esto se debe a la falta de datos de escorrentía históricos.

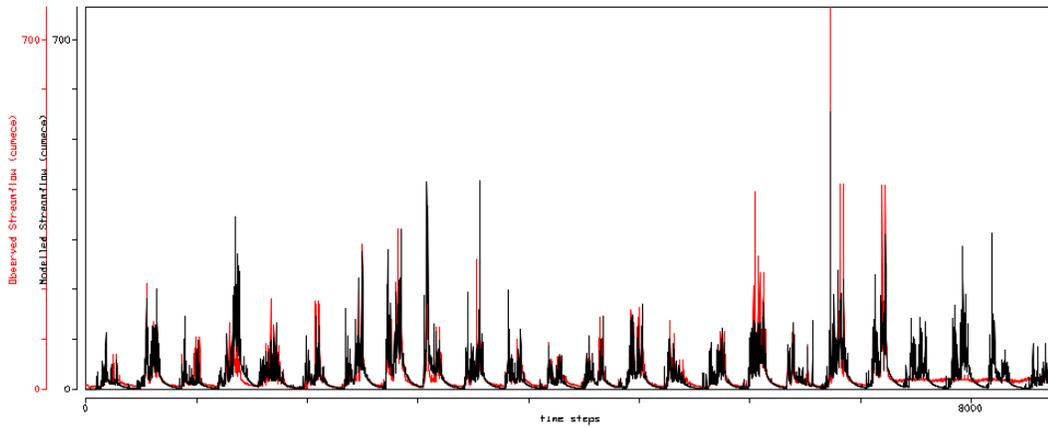
En la figura 55, se muestra el resultado de la simulación realizada eliminando los últimos cuatro años de registros de escorrentía. En el extremo derecho de la figura se observa en color negro, la manera en que es *software* realiza la prolongación de los datos de escorrentía, en color rojo se observa la ausencia de datos de escorrentía en los últimos años, los cuales fueron pronosticados.

Figura 54. Resumen estadístico del modelo

Period	Number ...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...)	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R) ...
Calibrato...	1096	1337	459	-5.762	-0.013	0.746	0.840	0.873	0.791	0.957	0.191	0.137	0.000
Rest	7670	1059	343	-21.361	-0.066	0.144	0.361	0.448	0.167	0.423	-0.357	-0.489	42.000
Year 1	366	694	156	33.160	0.175	-0.491	-0.656	-0.348	-2.769	0.024	-0.633	-0.676	0.000
Year 2	365	1145	387	-53.308	-0.160	0.529	0.646	0.697	0.148	0.780	-0.261	-0.417	0.000
Year 3	365	753	198	47.211	0.192	0.112	0.273	0.352	0.251	0.358	-0.261	-0.340	0.000
Year 4	365	1265	617	-253.541	-0.699	-2.441	-0.296	0.297	0.312	-2.456	-0.592	-0.781	42.000
Year 5	366	1130	323	15.962	0.047	0.309	0.483	0.582	0.733	0.760	0.030	-0.024	0.000
Year 6	365	1040	250	21.416	0.079	0.484	0.679	0.799	0.808	0.759	0.125	0.128	0.000
Year 7	365	1161	398	-5.805	-0.015	0.691	0.772	0.830	0.683	0.931	-0.056	-0.098	0.000
Year 8	365	1355	633	-71.200	-0.127	0.717	0.825	0.870	0.770	0.883	-0.167	-0.255	0.000
Year 9	366	1268	561	-178.484	-0.468	-0.253	0.481	0.691	0.854	0.081	-0.519	-0.700	0.000
Year 10	365	1125	354	-44.828	-0.145	-0.341	0.381	0.633	0.483	0.777	-0.339	-0.498	0.000
Year 11	365	884	247	26.347	0.096	0.155	0.409	0.477	0.025	0.684	-0.355	-0.487	0.000
Year 12	365	862	175	53.620	0.234	0.520	0.443	0.414	-0.246	0.799	-0.246	-0.281	0.000
Year 13	366	978	246	63.450	0.205	0.582	0.591	0.597	-0.047	0.835	-0.092	-0.111	0.000
Year 14	365	1176	360	96.567	0.212	0.724	0.830	0.890	0.878	0.867	0.150	0.228	0.000
Year 15	365	971	224	56.856	0.202	0.736	0.691	0.657	0.314	0.852	-0.263	-0.205	0.000
Year 16	365	987	253	28.680	0.102	0.335	0.660	0.701	0.262	0.844	-0.217	-0.221	0.000
Year 17	366	1295	462	82.357	0.151	0.650	0.819	0.889	0.774	0.871	0.046	0.129	0.000
Year 18	365	1027	266	-3.025	-0.012	0.736	0.778	0.790	0.709	0.893	-0.314	-0.413	0.000
Year 19	365	1545	564	-36.812	-0.070	0.706	0.821	0.885	0.868	0.917	0.264	0.185	0.000
Year 20	365	1449	551	22.555	0.039	0.776	0.860	0.885	0.732	0.930	0.185	0.183	0.000
Year 21	366	1120	384	-133.388	-0.534	-288.305	-127.383	-101.502	-65.254	-216.853	-0.555	-0.803	0.000
Year 22	365	1283	464	-209.831	-0.828	-751.570	-293.839	-219.405	-161.193	-1280.551	-0.593	-0.838	0.000
Year 23	365	993	338	-92.392	-0.376	-318.085	-125.106	-96.466	-74.734	-317.993	-0.553	-0.799	0.000
Year 24	365	802	181	68.571	0.275	-91.062	-103.833	-87.548	-128.985	-75.401	-0.607	-0.826	0.000

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

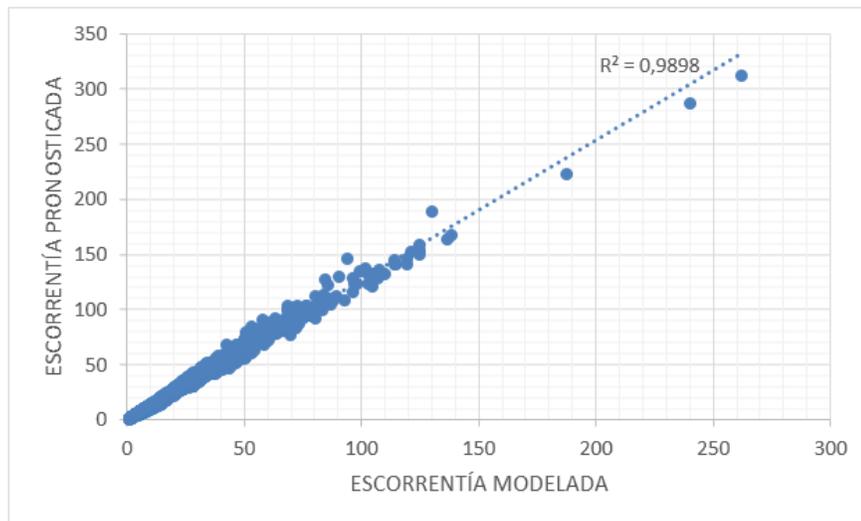
Figura 55. Resultado de la simulación



Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

En la figura 56, se muestra la comparación entre los datos de los últimos años del MODELO 1 y los datos de los últimos años de la simulación realizada utilizando los datos promedios históricos de temperatura como una alternativa para el pronóstico de escorrentía. El análisis indica una eficiencia bastante alta del MODELO 1 para el pronóstico de datos de escorrentía, aun en con la ausencia de pronósticos de datos de temperatura.

Figura 56. **Escorrentía modelada frente a escorrentía pronosticada**



Fuente: elaboración propia.

## 5.6. **Aplicación de los modelos desarrollados para completación de datos de escorrentía**

Otra de las aplicaciones de los modelos lluvia-escorrentía es para la completación de datos históricos de escorrentía, lo cual puede ser de mucha utilidad para diferentes estudios hidrológicos, en el caso de la zona de estudio los datos faltantes en los registros históricos son pocos.

Para mostrar que el modelo es bastante eficiente para completar datos, se eliminaron algunos periodos de los datos históricos de escorrentía para posteriormente completarlos y evaluar los resultados. Para los periodos de prueba se asumió que se disponía con los datos históricos de lluvia y de temperatura, y se hizo una nueva simulación con la ausencia de los datos de escorrentía. Los periodos que se utilizaron para la demostración de la efectividad se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III. **Periodos de prueba**

<b>Periodo de datos históricos</b>	<b>Periodo utilizado para la prueba</b>
1992-1993	
1993-1994	
1994-1995	
1995-1996	
1996-1997	
1997-1998	
1998-1999	
1999-2000	
2000-2001	
2001-2002	
2002-2003	
2003-2004	
2004-2005	
2005-2006	
2006-2007	
2007-2008	
2008-2009	
2009-2010	
2010-2011	
2011-2012	
2012-2013	
2013-2014	
2014-2015	

Fuente: elaboración propia.

Para mostrar la eficiencia que se alcanza en la completación de datos faltantes de esorrentía con los modelos desarrollados en este estudio, se utilizará el MODELO 1.

### **5.6.1. Completación de datos**

En el análisis estadístico de la nueva simulación que se muestra en la figura 57, se observan valores negativos de  $R^2$  en los años 5, 7, 11 y 17, que corresponden a los periodos de datos de esorrentía que fueron eliminados. Como ya se indicó anteriormente, el valor negativo bastante alto se debe a la ausencia de los datos históricos de esorrentía en esos periodos.

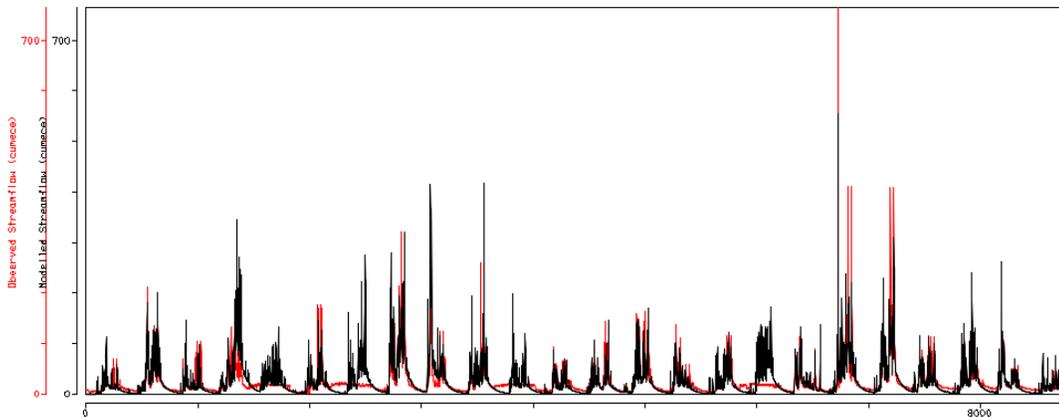
En el resultado de la simulación, mostrado en la figura 58, a lo largo del desarrollo del gráfico en color rojo, correspondiente a los datos históricos de esorrentía, se ven periodos con la ausencia de datos, y en color negro se observa como el *software* realiza el relleno de los datos faltantes.

Figura 57. Resumen estadístico del modelo

Period	Number ...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...)	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R) ...	
Calibratio...	1096	1337	459	-5.762	-0.013	0.746	0.840	0.873	0.791	0.957	0.191	0.137	0.000	
Rest	7670	1059	328	-26.621	-0.088	-0.032	0.207	0.287	-0.141	0.227	-0.403	-0.561	42.000	
Year 1	366	694	156	33.160	0.175	-0.491	-0.656	-0.348	-2.769	0.024	-0.633	-0.676	0.000	
Year 2	365	1145	387	-53.307	-0.160	0.529	0.646	0.697	0.148	0.780	-0.261	-0.417	0.000	
Year 3	365	753	198	47.211	0.192	0.112	0.273	0.352	0.251	0.358	-0.261	-0.340	0.000	
Year 4	365	1265	617	-253.541	-0.699	-2.441	-0.296	0.297	0.312	-2.456	-0.592	-0.781	42.000	
Year 5	366	1130	323	-82.082	-0.342	-140.237	-69.845	-59.048	0.791	-39.359	-136.234	-0.506	-0.769	0.000
Year 6	365	1040	250	21.415	0.079	0.484	0.679	0.799	0.808	0.759	0.125	0.128	0.000	
Year 7	365	1151	398	-148.921	-0.597	-585.849	-258.898	-196.485	-176.792	-555.889	-0.483	-0.780	0.000	
Year 8	365	1355	633	-71.199	-0.127	0.717	0.825	0.870	0.770	0.885	-0.167	-0.255	0.000	
Year 9	366	1268	561	-178.484	-0.468	-0.253	0.481	0.691	0.854	0.081	-0.519	-0.700	0.000	
Year 10	365	1125	354	-44.828	-0.145	-0.341	0.381	0.633	0.483	0.777	-0.339	-0.498	0.000	
Year 11	365	884	247	-5.312	-0.022	-405.527	-251.909	-202.556	-229.815	-347.719	-0.606	-0.826	0.000	
Year 12	365	862	175	53.620	0.234	0.520	0.443	0.414	-0.246	0.799	-0.246	-0.281	0.000	
Year 13	366	978	246	63.450	0.205	0.582	0.591	0.597	-0.047	0.835	-0.092	-0.111	0.000	
Year 14	365	1176	360	96.567	0.212	0.724	0.830	0.890	0.878	0.867	0.150	0.228	0.000	
Year 15	365	971	224	56.856	0.202	0.736	0.691	0.657	0.314	0.852	-0.263	-0.205	0.000	
Year 16	365	987	253	28.680	0.102	0.535	0.660	0.701	0.262	0.844	-0.217	-0.221	0.000	
Year 17	366	1295	462	-230.740	-1.000	-295.499	-111.273	-81.052	-53.290	-293.997	-0.595	-0.847	0.000	
Year 18	365	1027	266	-3.025	-0.012	0.736	0.778	0.790	0.709	0.893	-0.314	-0.413	0.000	
Year 19	365	1545	564	-36.811	-0.070	0.706	0.821	0.885	0.868	0.917	0.264	0.185	0.000	
Year 20	365	1449	551	22.555	0.039	0.776	0.860	0.885	0.732	0.930	0.185	0.183	0.000	
Year 21	366	1120	289	89.815	0.237	0.680	0.658	0.650	0.443	0.718	0.043	0.078	0.000	
Year 22	365	1283	356	-23.058	-0.069	-0.196	0.025	0.132	-1.062	-0.213	-0.585	-0.745	0.000	
Year 23	365	993	270	32.363	0.107	0.668	0.481	0.402	-0.706	0.874	-0.046	-0.273	0.000	
Year 24	365	802	147	9.748	0.062	-1.621	-1.930	-1.796	-5.063	-1.011	-0.527	-0.710	0.000	

Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

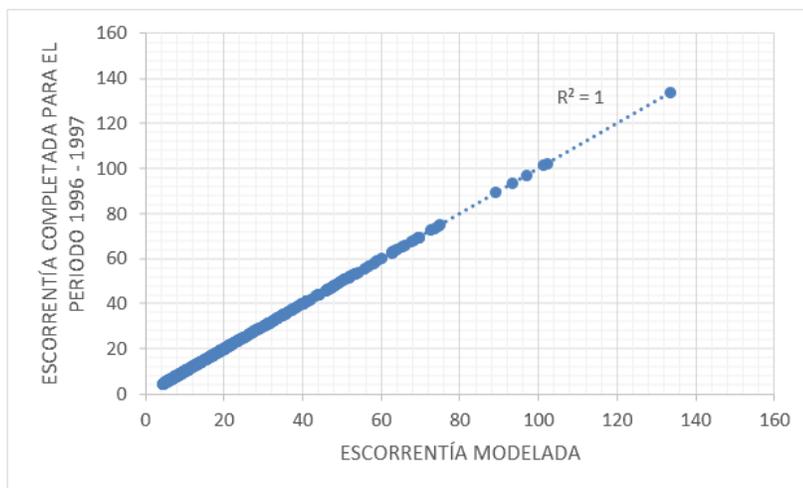
Figura 58. Resultado de la simulación



Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.

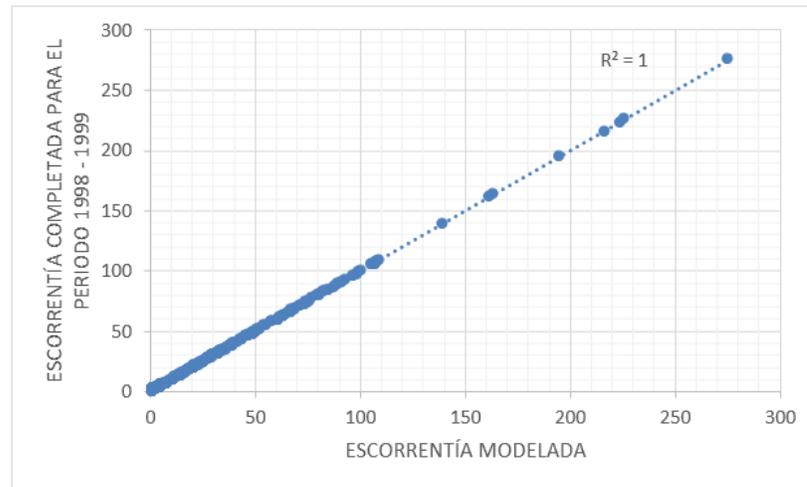
En las figuras, desde la 59 hasta la 62, se muestran las comparaciones entre los datos generados con el MODELO 1 y los datos generados con la simulación en la que se eliminaron periodos de datos para su posterior completación. Los resultados de los análisis para cada periodo de prueba indican que el MODELO 1 es muy eficiente también para utilizarlo como una herramienta para completar datos faltantes en registros históricos de escorrentía.

Figura 59. **Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 1**



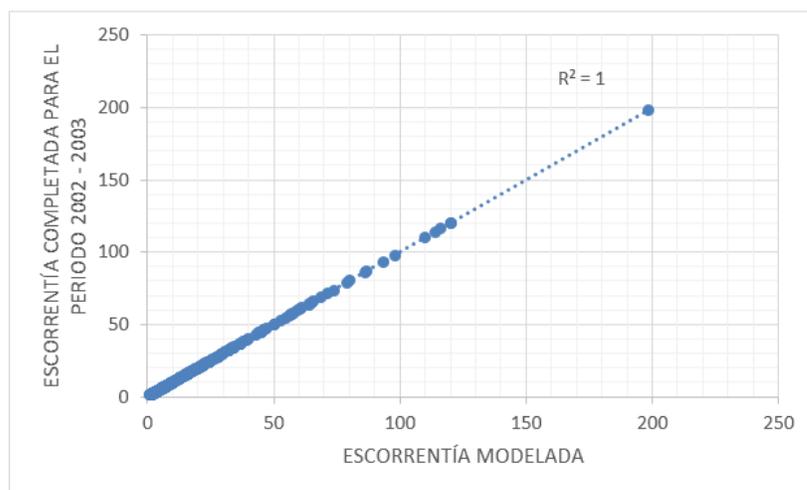
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 2**



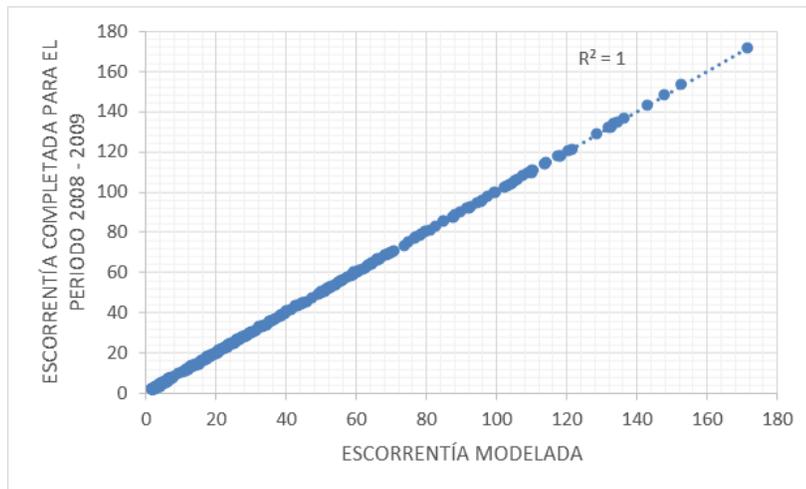
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 3**



Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Escorrentía modelada frente a escorrentía completada para el periodo de prueba 4**



Fuente: elaboración propia.

### 5.7. **Modelado a escala mensual (MODELO 3)**

Aunque en la metodología utilizada se recomienda para la modelación usar la escala de minutos, horas y días, en este estudio se decidió desarrollar un modelo lluvia-escorrentía para la zona de estudio, a escala mensual, para evaluar los resultados.

Para importar los datos al *software*, se realizaron promedios mensuales de las tres series de datos del periodo de datos de 1992 a 2015, obtenidas las nuevas series mensuales de datos promedios de lluvia, temperatura y escorrentía, se ingresaron al *software* indicándole que la escala de tiempo para las tres series de datos era de 30 días, acercando así los valores a la fecha que corresponden realmente.

El periodo de calibración que mejores resultados generó para el modelado a escala mensual, fue el periodo del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2014.

En la figura 63, se muestran los resultados del análisis estadístico que el *software* generó para esta simulación, en la columna siete de la figura se observa que el modelado alcanzó valores de  $R^2$  de hasta 0,87 en 2011, y una gama de valores bastante altos en la mayoría de los demás años. Este modelo aporta valores bastante buenos en el pronóstico de datos a escala mensual en los que se esperan registros altos o bajos de escorrentía.

Figura 63. Resumen estadístico del modelo

Period	Number ...	P (mm/yr)	Q (mm/yr)	Bias (m...	Rel. Bias	R Squared	R2_sqrt	R2_log	R2_inv	MonthlyR2	U 1	X 1	(U > R) ...
Calibratio...	74	40	393	-0.894	-0.002	0.858	0.869	0.870	0.805	0.858	-0.086	-0.073	73.000
Rest	214	35	341	-7.546	-0.023	0.745	0.801	0.832	0.735	0.745	-0.178	-0.206	205.000
Year 1	12	25	135	59.223	0.313	0.152	-0.620	-0.247	-2.981	0.152	-0.195	-0.205	8.000
Year 2	12	41	393	-44.711	-0.135	0.654	0.818	0.862	0.762	0.654	-0.134	-0.295	11.000
Year 3	12	27	238	18.905	0.077	0.447	0.613	0.680	0.806	0.447	-0.051	-0.011	11.000
Year 4	12	44	521	-147.012	-0.408	-0.081	0.499	0.662	0.743	-0.081	0.133	-0.076	10.000
Year 5	12	40	437	-75.487	-0.223	0.523	0.609	0.630	0.661	0.523	-0.216	-0.141	11.000
Year 6	13	34	274	-5.309	-0.021	0.687	0.750	0.743	0.561	0.687	0.054	0.199	12.000
Year 7	12	41	377	76.426	0.175	0.816	0.906	0.941	0.931	0.816	0.155	0.345	9.000
Year 8	12	48	631	-42.855	-0.077	0.961	0.961	0.960	0.956	0.961	0.090	0.125	11.000
Year 9	12	45	628	-210.221	-0.555	0.189	0.483	0.621	0.783	0.189	-0.644	-0.749	11.000
Year 10	12	40	392	-59.133	-0.190	0.679	0.828	0.879	0.941	0.679	-0.403	-0.442	11.000
Year 11	12	31	265	20.972	0.077	0.825	0.860	0.868	0.846	0.825	-0.549	-0.526	11.000
Year 12	13	28	179	50.747	0.231	0.804	0.765	0.748	0.564	0.804	-0.481	-0.378	12.000
Year 13	12	35	269	51.451	0.169	0.848	0.905	0.924	0.891	0.848	-0.123	0.032	11.000
Year 14	12	42	406	76.044	0.166	0.791	0.898	0.932	0.951	0.791	0.122	0.292	11.000
Year 15	12	34	254	40.617	0.146	0.842	0.870	0.874	0.839	0.842	-0.308	-0.173	11.000
Year 16	12	35	281	16.494	0.059	0.850	0.907	0.928	0.913	0.850	-0.413	-0.253	11.000
Year 17	13	42	479	58.776	0.116	0.843	0.922	0.950	0.958	0.843	0.200	0.328	11.000
Year 18	12	37	312	-36.181	-0.141	0.772	0.851	0.873	0.921	0.772	-0.110	-0.194	11.000
Year 19	12	54	614	-36.430	-0.068	0.864	0.920	0.936	0.945	0.864	0.252	0.204	11.000
Year 20	12	51	598	16.286	0.028	0.879	0.924	0.939	0.945	0.879	0.078	0.239	11.000
Year 21	12	39	327	69.718	0.186	0.728	0.722	0.729	0.535	0.728	-0.455	-0.335	11.000
Year 22	12	45	403	-39.648	-0.118	0.168	0.549	0.630	0.623	0.168	-0.395	-0.564	11.000
Year 23	13	33	278	16.745	0.060	0.865	0.800	0.775	0.511	0.865	-0.571	-0.594	12.000
Year 24	8	41	228	-38.384	-0.221	-1.532	-0.044	0.122	0.488	-1.532	-0.008	-0.195	7.000

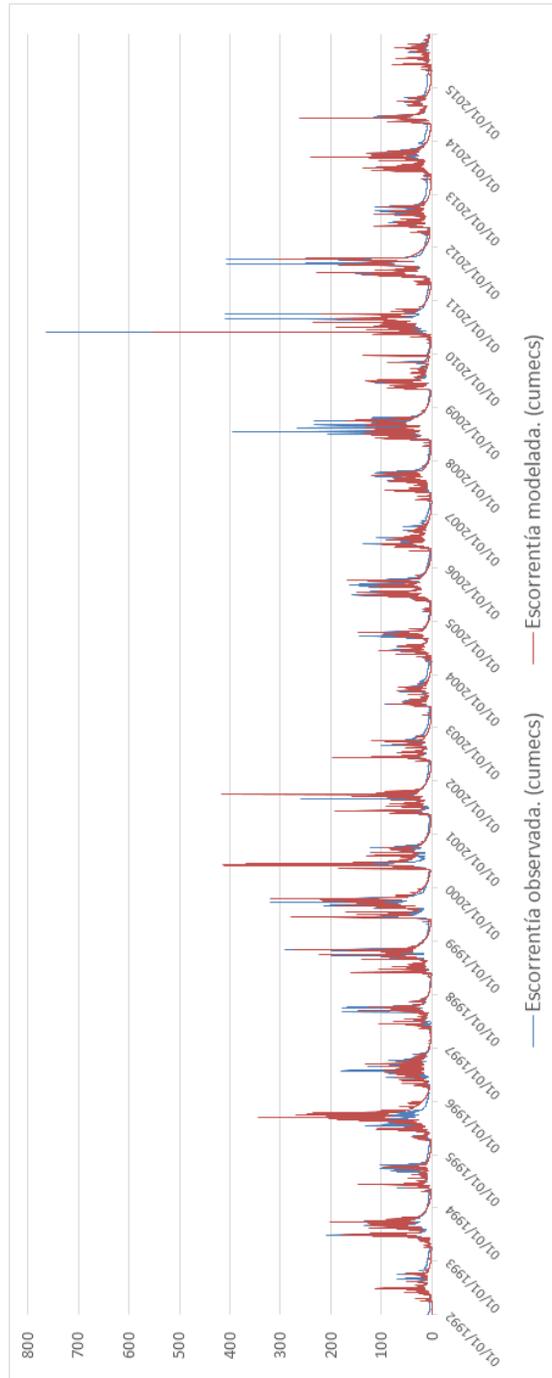
Fuente: elaboración propia, utilizando el *software* IHACRES.

## **5.8. Resultados gráficos del estudio**

En esta sección se muestran los resultados finales en forma gráfica de los tres mejores modelos desarrollados durante el estudio. Los modelos lluvia-escorrentía mostrados a continuación son los más eficientes para la cuenca estudiada y pueden ser utilizados, como se demostró anteriormente, para pronosticar y completar datos faltantes de escorrentía en la zona.

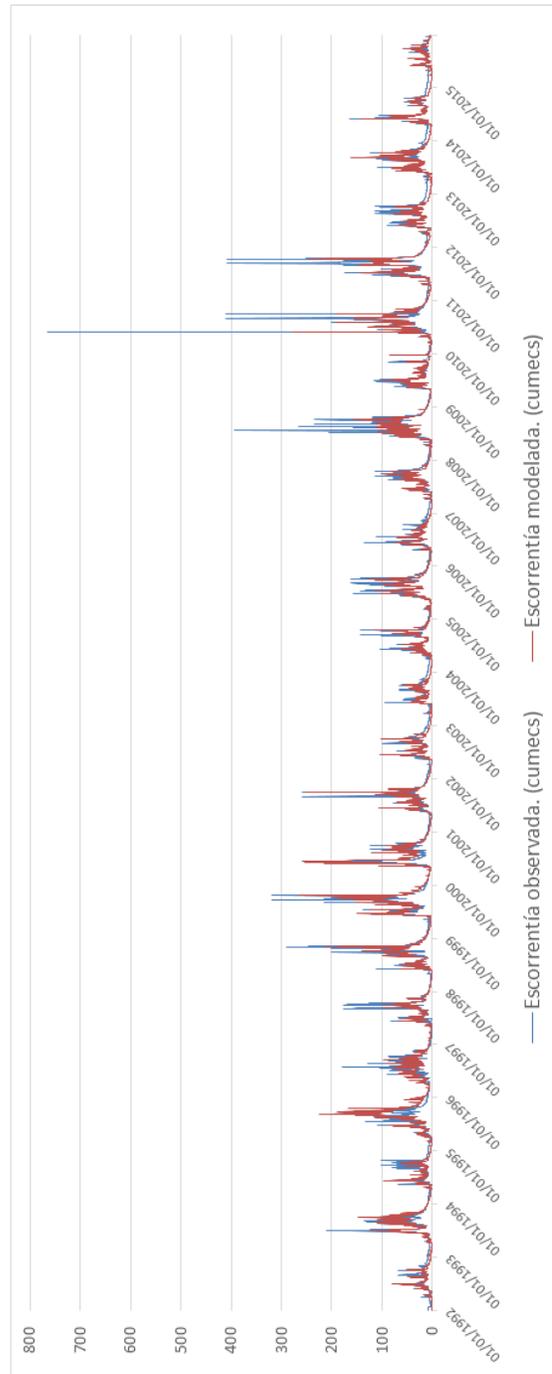
Los datos de escorrentía obtenidos en forma de pronóstico o de completación de datos, corresponderán a la estación hidrométrica Chisiguán, monitoreada por el Instituto Nacional de Electrificación (INDE). Esto debido a que dicha estación es de la que se obtuvieron los datos históricos de escorrentía utilizados para el desarrollo de todo el modelado.

Figura 64. **MODELO 1: Para flujos de crecida, en m<sup>3</sup>/s**



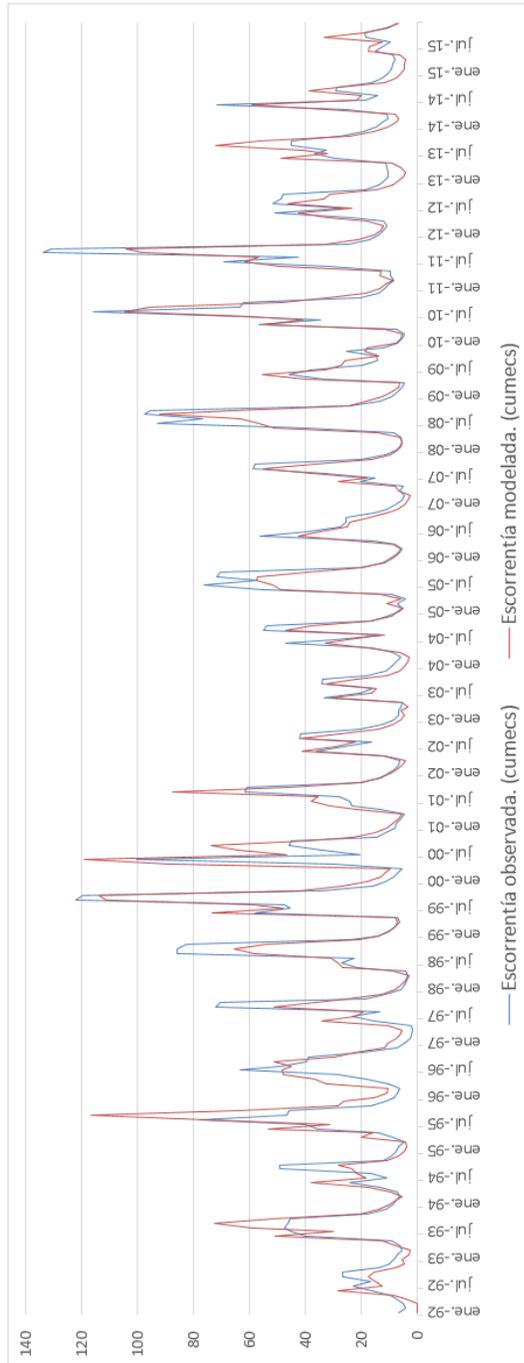
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. **MODELO 2: Para flujos bajos, en m<sup>3</sup>/s**



Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **MODELO 3: Modelo a escala mensual, en m<sup>3</sup>/s**



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Los modelos desarrollados permiten caracterizar cualquier evento extremo en la zona de estudio a escala diaria. El MODELO 1, se puede utilizar para la predicción de datos de escorrentía en los que se esperen registros altos, es decir, cuando la lluvia pronosticada sea alta. El MODELO 2, es aplicable para la predicción de datos de escorrentía cuando los datos esperados sean bajos, según los pronósticos de lluvia.
2. Las múltiples simulaciones realizadas durante el estudio aportaron los mejores resultados, en cuanto a efectividad del modelo, al utilizar el periodo de datos de 1992 a 2015, y esto es porque para ese periodo se dispuso de una mayor cantidad de datos que en el de 1985 a 2015, con esto se pudo determinar que la metodología IHACRES alcanza una mayor efectividad en el modelado a medida que la densidad de datos que se le ingresen aumente.
3. La metodología recomienda el modelado a escala diaria, pero los resultados obtenidos en la prueba de modelación a escala mensual permiten determinar que el ajuste que la modelación alcanza para esta escala de tiempo, es bastante efectivo, alcanzando valores bastante altos en el coeficiente de determinación para cada año.
4. Las pruebas realizadas para el pronóstico de datos de escorrentía permiten determinar que la metodología es una muy buena herramienta para modelar las condiciones futuras esperadas en la zona de estudio y muy probablemente en cualquier cuenca con dimensiones similares a las

del área del presente estudio. El pronóstico en los datos de escorrentía será bastante efectivo, siempre y cuando se cuente con un pronóstico bastante acertado de datos de lluvia y temperatura. Como el pronóstico de datos de temperatura no se realiza con tanta frecuencia como con los datos de la lluvia, se determinó en este estudio que el uso de temperaturas históricas promedio es una muy buena opción para el modelado de condiciones futuras de escorrentía en cualquier escala de tiempo.

5. Los modelos desarrollados a escala diaria en el presente estudio permiten el pronóstico, uno de hasta diez años, y el otro de hasta cuatro años a partir del año 2015, pero luego de los años los modelos se pueden actualizar con los nuevos registros históricos de datos de lluvia, temperatura y escorrentía, y así poder seguir aplicando los modelos para el pronóstico de datos de escorrentía durante muchos años, hasta que se desarrollen métodos más efectivos que los que existen hoy en día para pronósticos.
6. Durante las pruebas de los modelos aplicados al pronóstico de escorrentía, se pudo determinar que la cantidad de años que un modelo desarrollado con esta metodología puede pronosticar, depende de factores como: la cantidad de años de registros históricos de los que se disponga y del periodo que se defina para la calibración. Si se cuenta con un periodo de, por lo menos 20 años de registros históricos, los años que la metodología permite pronosticar dependen en gran parte del periodo de calibración que se utilice, generalmente se pueden pronosticar la cantidad de años que haya después del periodo de calibración y dentro del periodo de datos disponibles.

7. Se puede determinar que la variabilidad climática hace cada vez más difícil el pronosticar datos hidrológicos, ya que si las condiciones climáticas se mantuvieran con las mismas características a través de los años, existiría una menor cantidad de eventos extremos, con lo que el pronóstico de datos sería más sencillo y mucho más acertado de lo que se puede lograr actualmente. Desarrollar estudios como el que se realizó en el presente trabajo, permiten entender un poco más, la manera en la que la variabilidad climática ha alterado las condiciones naturales del país a través de los años.



## RECOMENDACIONES

1. Usar los modelos lluvia-escorrentía desarrollados en este estudio como base para desarrollar modelos del mismo tipo en las demás cuencas de Guatemala. De esta forma se contribuirá al desarrollo de herramientas que se puedan aplicar al pronóstico de datos de escorrentía que sirvan para prevenir que los eventos extremos que ocurran en cualquier parte del país provoquen pérdidas humanas; además de su uso para muchas otras aplicaciones en diferentes campos.
2. Desarrollar modelos en la zona analizada en el presente estudio con diferentes metodologías y comparar los resultados para evaluar si lo hecho durante éste estudio se puede mejorar o si la metodología utilizada es la mejor opción para caracterizar la relación dinámica entre la lluvia y la escorrentía en la cuenca alta del río Chixoy.
3. Realizar modelos lluvia-escorrentía a escala semanal utilizando la metodología IHACRES, para evaluar la efectividad que la metodología puede alcanzar en diferentes escalas de tiempo.
4. Profundizar en estudios sobre los impactos que la variabilidad climática y las condiciones socioambientales actuales en Guatemala provocan en la escorrentía que se genera debido a las lluvias en las cuencas del país.
5. Utilizar esta metodología a escala mensual únicamente en caso de que no se cuente con otro *software* que permita indicar el número de días

de cada mes del año, esto porque IHACRES solamente permite ingresar 30 o 31 días como periodo de tiempo en los datos, lo que no permite pronosticar o completar datos de manera precisa.

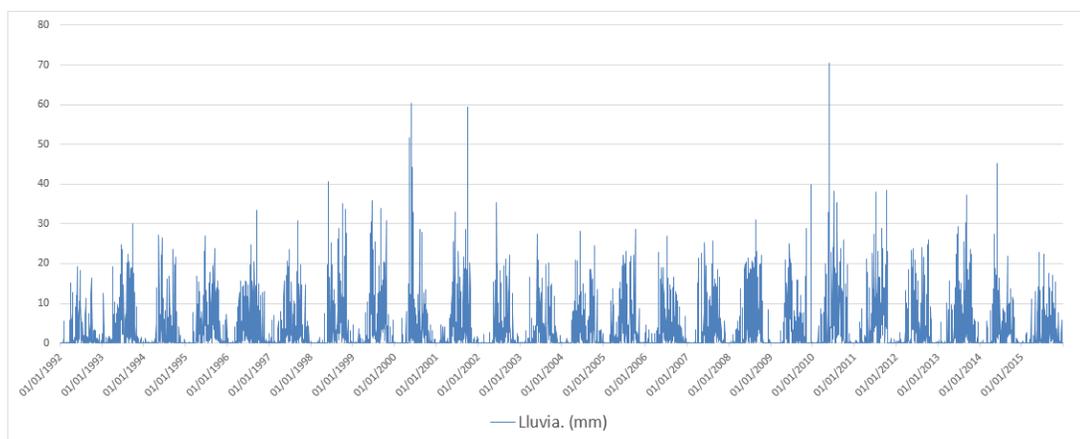
## BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de hidrología de superficie. México: LIMUSA, S. A., 1992. 302 p.
2. CARRERA, Jaime y otros. *Situación del o recurso hídrico en Guatemala*. Guatemala: Serviprensa, S. A., 2005. 29 p.
3. CLEAVES, Cecilia y GÁLVEZ, Juventino. *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012: Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo*. Guatemala: IARNA-URL, 2012. 468 p.
4. CROKE, Barry, y otros. *IHACRES User Guide*. Australia: ANU, iCAM, 2005. 45 p.
5. LINSLEY, Ray y otros. *Hidrología para ingenieros*. Bogotá: McGraw-Hill Latinoamérica, S. A., 1975. 386 p.
6. MONSALVE SÁENZ, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 382 p.
7. TÁBORA, Fabiola y otros. *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*. Tegucigalpa: Impresiones industriales, 2011. 147 p.

8. \_\_\_\_\_. *Atlas de suelos en la provincia de Buenos Aires*. Argentina: Centro de Investigaciones Territoriales y Ambientales Bonaerenses (CITAB), 1995. 5 p.

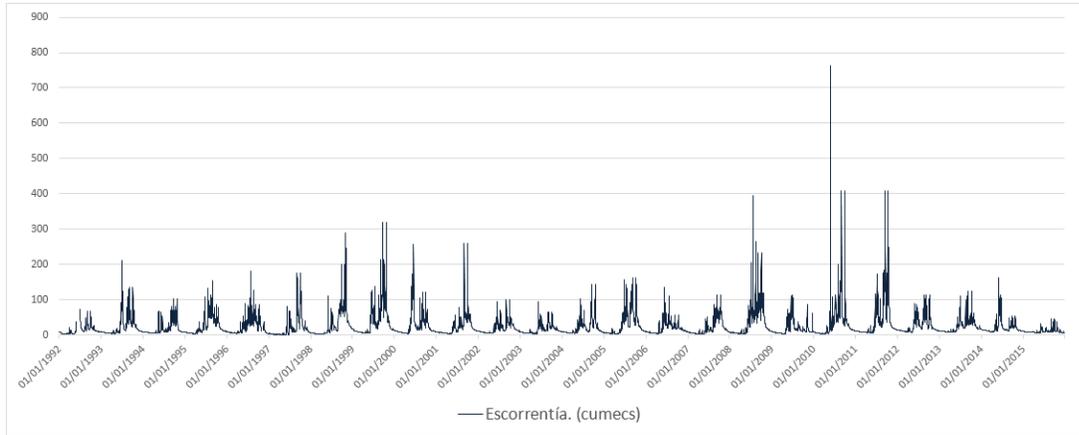
## APÉNDICES

Apéndice 1. **Datos medios históricos diarios de lluvia calculados, en mm, utilizados para las simulaciones de los MODELOS 1 y 2**



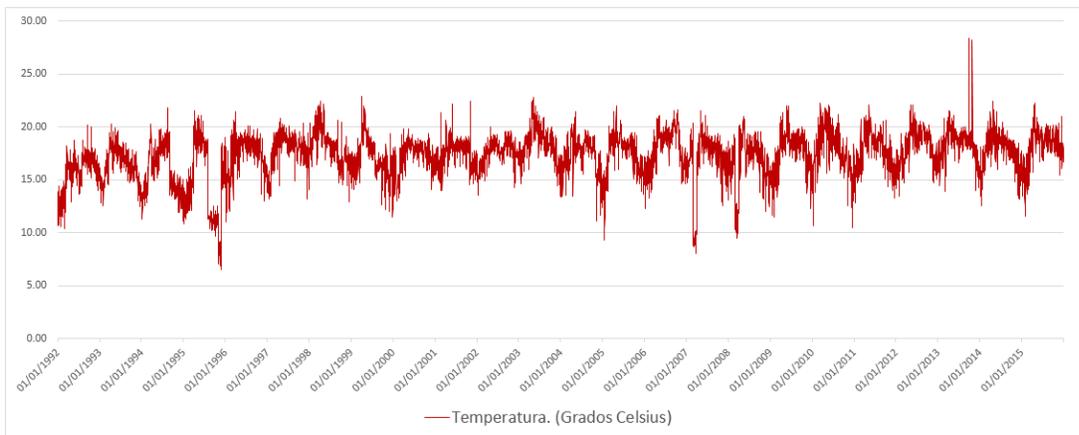
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 2. Datos medios históricos diarios de escorrentía en la estación hidrométrica Chisiguán, en m<sup>3</sup>/s, utilizados para las simulaciones de los MODELOS 1 y 2**



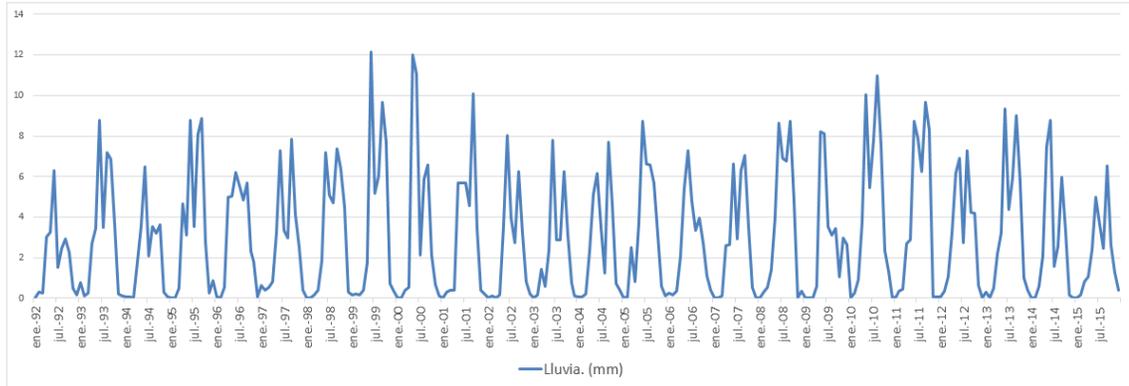
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 3. Datos medios históricos diarios de temperatura calculados, en grados celsius, utilizados para las simulaciones de los MODELOS 1 y 2**



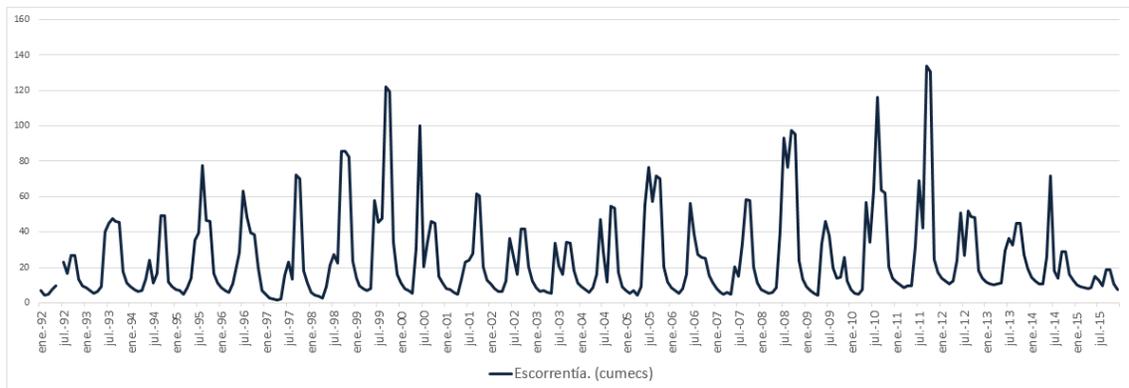
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 4. Datos medios históricos mensuales de lluvia calculados, en mm, utilizados para la simulación del MODELO 3**



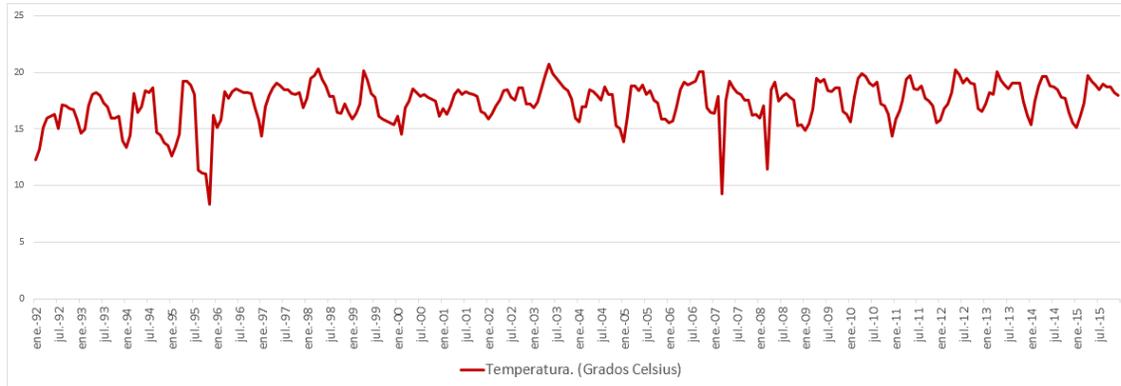
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 5. Datos medios históricos mensuales de escorrentía calculados, en m<sup>3</sup>/s, utilizados para la simulación del MODELO 3**



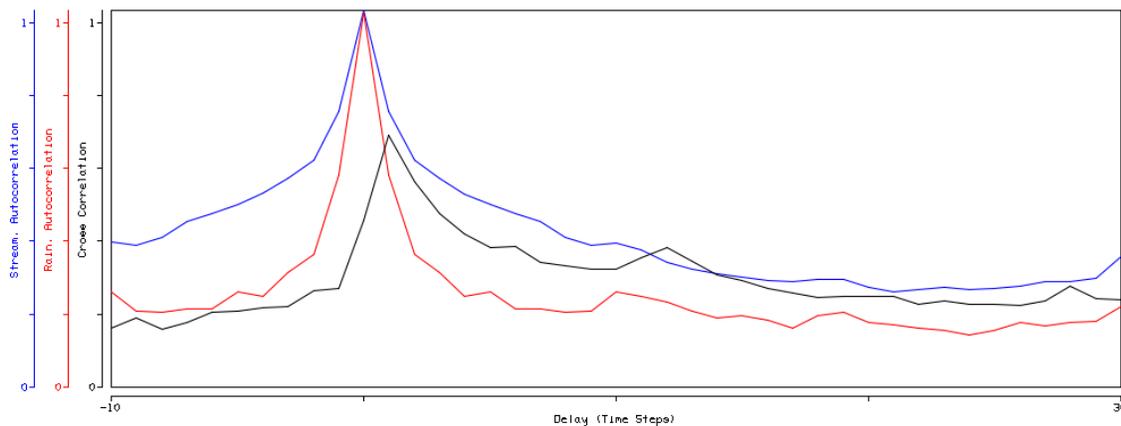
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 6. Datos medios históricos mensuales de temperatura calculados, en grados celsius, utilizados para la simulación del MODELO 3**



Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Ejemplo del gráfico de desfase en la correlación de datos de lluvia y escorrentía en las primeras simulaciones: periodo de datos de 1992-2015 y periodo de calibración del 1 de enero de 2009 al 1 de enero de 2012**



Fuente: elaboración propia, utilizando el software IHACRES.