



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ANÁLISIS DEL DÉFICIT HÍDRICO EN ALGUNAS ESTACIONES DE LA REGIÓN  
HIDROLÓGICA NÚMERO 10 (SINALOA)

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JORGE LUIS REYES HERNÁNDEZ

TUTOR  
DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. Franco Víctor  
Secretario: Dra. Reyes Chávez Lilia  
Vocal: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.  
1<sup>er.</sup> Suplente: M. I. López Rincón German  
2<sup>d o.</sup> Suplente: M. I. Vázquez González Alba Beatriz

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México, Distrito Federal.

TUTOR DE TESIS:

DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL

-----  
FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por su amor y constante apoyo en todo momento.

A mis profesores del programa de maestría en ingeniería, por los conocimientos compartidos. A los maestros miembros del jurado por las aportaciones brindadas a esta tesis. Mi agradecimiento especial a mi tutor Dr Carlos A. Escalante Sandoval, por su orientación en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos y compañeros, por las experiencias brindadas, su apoyo y colaboración dentro y fuera del aula.

Al CONACYT, por la beca otorgada en el periodo de mis estudios de maestría.

## **RESUMEN**

Se analizaron series de gastos medios diarios de 11 estaciones hidrométricas pertenecientes a la Región Hidrológica número 10, ubicada en el Noreste de México, estableciendo umbrales de acuerdo a los percentiles de las series, para el umbral correspondiente al percentil 90, se identificó la presencia de las tendencias a través de pruebas de homogeneidad temporal, en cuencas representativas se analizó la relación del volumen de lluvia anual con el volumen anual de escurrimiento; todo lo anterior con el fin de encontrar evidencias de cambios en el comportamiento histórico de los déficits en las cuencas delimitadas por las estaciones hidrométricas analizadas; también se ajustaron distribuciones de frecuencia asociadas a diferentes periodos de retorno a las características de déficit hidrológico, su duración y su tiempo de ocurrencia correspondiente. Para finalizar, las duraciones del déficit hídrico fueron modeladas utilizando series estandarizadas de flujo (índice hidrológico estandarizado) derivadas de la serie de gastos medios diarios a escalas de tiempo anuales, mensuales y semanales; se propuso un modelo de cadena de Markov para la predicción de la duración del déficit a varios niveles de umbral en las series estandarizadas. Los resultados de los análisis permiten identificar las zonas de mayor cambio de tendencia en las series, estimar los eventos de déficit y duración para diferentes umbrales y periodos de retorno además de validar la eficiencia de los modelos propuestos.

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos .....	1
Organización del trabajo .....	2
CAPÍTULO 1    DÉFICIT HÍDRICO.....	3
1.1    Definición de déficit hídrico .....	3
1.2    Tipos de déficit.....	3
1.3    Impactos de los déficits hídricos .....	4
CAPÍTULO 2    ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS EN SERIES HIDROLÓGICAS Y METEOROLÓGICAS.....	7
2.1    Metodología.....	7
2.1    Pruebas de homogeneidad de las series .....	9
2.1.1    Prueba estadística de Helmer: .....	9
2.1.2    Prueba estadística T de Student:.....	9
2.1.1    Prueba estadística de Cramer.....	10
2.2    Obtención de series meteorológicas .....	11
2.3    Distribuciones de frecuencia.....	12
2.3.1    Distribución Normal .....	13
2.3.1    Distribución Gumbel.....	14
2.3.2    Distribución General de Valores Extremos (GVE) .....	15
2.3.3    Distribución Gamma de 3 parámetros.....	16
2.3.4    Distribuciones Mezcladas .....	16
2.4    Prueba de bondad de ajuste.....	17

CAPÍTULO 3	CADENAS DE MARKOV APLICADAS EN LA PREDICCIÓN DE LA DURACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO .....	19
3.1	Metodología .....	19
3.2	Modelo de cadenas de Markov para series anuales, mensuales y semanales.....	21
3.3	Modelo para series mensuales y semanales con revisión de parámetros. ....	22
CAPÍTULO 4	CASO DE ESTUDIO.....	23
4.1	Descripción de la zona de estudio .....	23
4.2	Estaciones hidrométricas estudiadas .....	24
4.3	Importancia del sector primario en la Región Hidrológica 10 .....	25
4.3.1	Agricultura .....	25
4.3.2	Ganadería. ....	27
4.4	Aplicación de análisis de series hidrológicas y meteorológicas.....	27
4.4.1	Estación El Bledal.....	27
4.4.2	Estación Huites.....	36
4.4.3	Estación Bamicori.....	38
4.4.4	Estación Ixpalino .....	40
4.4.5	Estación Choix.....	42
4.4.6	Estación Badiraguato .....	44
4.4.7	Estación Tamazula.....	46
4.4.8	Estación Piaxtla .....	47
4.4.9	Estación Guatenipa II.....	49
4.4.10	Estación La Huerta .....	51
4.4.11	Estación Tecusiapa .....	53
4.4.12	Resumen de los resultados observados .....	55
4.5	Aplicación del modelo de cadenas de Markov para series anuales .....	56
4.6	Aplicación del modelo de cadenas de Marcov para series mensuales y semanales .....	59
4.7	Aplicación del modelo para series mensuales y semanales con revisión de parámetros. ....	61

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....65  
BIBLIOGRAFÍA .....67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Hidrograma de un río donde se indica el gasto promedio y el gasto base del río Qr 90%.....	7
Figura 2-2 Esquema de registro que muestra los déficits presentados en un año $D(n)$ , el déficit máximo $D(máx)$ , su duración $T(v)$ , tiempos de inicio $tb(v)$ y terminación $tev$ y tiempo de ocurrencia $\tau(v)$ .....	9
Figura 2-3 Espacio bidimensional de sitios de estaciones climatológicas .....	12
Figura 4-1 Delimitación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a través datos oficiales de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2013. ....	23
Figura 4-2 Ubicación de las estaciones analizadas .....	24
Figura 4-3 Rendimiento de Maíz Blanco en Ton/Ha, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), 2012.....	26
Figura 4-4 Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación 10027 El Bledal. ....	29
Figura 4-5 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10027 El Bledal. ....	30
Figura 4-6 Coeficiente de escurrimiento anual observado en la estación 10027 El Bledal. ....	31
Figura 4-7 Gráfica de duraciones y déficits estandarizados de los eventos más adversos anuales.....	31
Figura 4-8 Intensidad del déficit hídrico anual.....	32
Figura 4-9 Gráfica de duraciones y tiempo de ocurrencia estandarizados de los eventos más adversos anuales. ....	32
Figura 4-10 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series de a) Déficit y b) Duración máxima y c) Tiempo de ocurrencia .....	35
Figura 4-11 Estación 10037 Huites. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación y b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	36
Figura 4-12 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	37
Figura 4-13 Estación 10057 Bamicori. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	38
Figura 4-14 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10057 Bamicori. ....	39
Figura 4-15 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	39

Figura 4-16 Estación 10065 Ixpalino. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	41
Figura 4-17 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10065 Ixpalino.....	41
Figura 4-18 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	42
Figura 4-19 Estación 10066 Choix. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	43
Figura 4-20 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	43
Figura 4-21 Estación 10079 Badiraguato. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	45
Figura 4-22 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	45
Figura 4-23 Estación 10087 Tamazula. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	46
Figura 4-24 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	47
Figura 4-25 Estación 10111 Piaxtla. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	48
Figura 4-26 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10111 Piaxtla.....	48
Figura 4-27 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	49
Figura 4-28 Estación 10112 Guatenipa II. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	50
Figura 4-29 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	51
Figura 4-30 Estación 10113 La Huerta. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.....	52
Figura 4-31 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx. (b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	53
Figura 4-32 Estación 10137 Tecusiapa. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual,.....	54

Figura 4-33 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia. ....	55
Figura 4-34 Representación gráfica de las intensidades medias en miles de m <sup>3</sup> por día por km <sup>2</sup> (isolíneas); así como la pendiente de las series de intensidades máximas. ....	56
Figura 4-35 Relación entre el coeficiente asimetría y el doble de coeficiente de variación.....	57
Figura 4-36 Comparación de L <sub>T</sub> -ob y E (L <sub>T</sub> ) en series de tiempo anual usando Cadenas de Markov-1 o modelo aleatorio: (a) Ley empírica de Weibull, y (b) Ley empírica de Hazen. ....	58
Figura 4-37 Comparación de L <sub>T</sub> -ob mensuales y E (L <sub>T</sub> ) usando los modelos (a) Cadena de Markov-1 y (b) Cadena de Markov-2.....	59
Figura 4-38 Comparación de L <sub>T</sub> -ob semanales y E (L <sub>T</sub> ) usando los modelos (a) Cadena de Markov-2 y (b) Cadena de Markov-3.....	61
Figura 4-39 Comparación de L <sub>T</sub> -ob mensuales y E (L <sub>T</sub> ) usando los modelos (a) Cadena de Markov-1 y (b) Cadena de Markov-2 empleando la revisión de parámetros estimados. ....	63
Figura 4-40 Comparación de L <sub>T</sub> -ob semanales y E (L <sub>T</sub> ) usando los modelos (a) Cadena de Markov-1 y (b) Cadena de Markov-2 empleando la revisión de parámetros estimados. ....	63
Figura 4-41 Comparación de L <sub>T</sub> -ob semanales y E (L <sub>T</sub> ) usando los modelos para el modelo de cadena de Markov-2 empleando la revisión de parámetros estimados mejorados. ....	64

## LISTA DE TABLAS

Tabla 4-1 Estaciones hidrométricas seleccionadas para el análisis de frecuencia. ....	25
Tabla 4-2 Posición de Sinaloa en la producción agrícola nacional según cultivo 2010.....	26
Tabla 4-3 Déficit, duración y tiempo de ocurrencia máximos para la estación 10027 El Bledal.....	27
Tabla 4-4 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación El Bledal .....	29
Tabla 4-5 Coeficientes de correlación entre las series estudiadas .....	32
Tabla 4-6 Series de datos observadas contrastadas con las series calculadas. ....	33
Tabla 4-7 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación El Bledal.....	35
Tabla 4-8 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Huites.....	36
Tabla 4-9 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Huites. ....	37
Tabla 4-10 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Bamicori.....	38
Tabla 4-11 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Bamicori.....	40
Tabla 4-12 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Ixpalino. ....	40
Tabla 4-13 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Ixpalino. ....	42
Tabla 4-14 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Choix. ....	42
Tabla 4-15 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Choix.....	44
Tabla 4-16 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Badiraguato. ....	44
Tabla 4-17 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Badiraguato. ....	46
Tabla 4-18 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Tamazula.....	46
Tabla 4-19 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Tamazula. ....	47
Tabla 4-20 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Piaxtla. ....	47
Tabla 4-21 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Piaxtla. ....	49
Tabla 4-22 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Guatenipa II.....	50
Tabla 4-23 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Guatenipa II.....	51
Tabla 4-24 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación La Huerta. ....	52
Tabla 4-25 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación La Huerta.....	53

Tabla 4-26 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Tecusiapa. ....	53
Tabla 4-27 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Tecusiapa.....	55
Tabla 4-28 Detalles de los ríos elegidos para el estudio con las principales características basadas en flujos anuales. ....	57
Tabla 4-29 Valores resumidos de los niveles de umbral, probabilidades condicionales, duraciones observadas ( $L_T$ -ob) y estimadas E ( $L_T$ ) para el umbral correspondiente a $q=0.5$ para longitudes anuales de sequía. ....	57
Tabla 4-30 Resultados del cálculo de los parámetros y estimación de la longitud de déficits de series mensuales para la estación El Bledal; parámetros estimados por el método del conteo.....	59
Tabla 4-31 Resultados del cálculo de los parámetros y estimación de la longitud de déficits de series semanales para la estación El Bledal; parámetros estimados por el método del conteo. ....	60
Tabla 4-32 Resultados del cálculo de duraciones de déficit mensuales para la estación El Bledal usando parámetros mejorados. ....	62
Tabla 4-33 Resultados del cálculo de duraciones de déficit semanales para la estación El Bledal usando parámetros mejorados. ....	62

# INTRODUCCIÓN

Dentro de todos los fenómenos naturales que inciden negativamente en la agricultura como es el calor y la sequía, las inundaciones, las plagas, etcétera, fácilmente la sequía ocupa la mitad del impacto en términos económicos, de producción (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2012). Sin embargo, las pérdidas y los impactos que causan las sequías no se registran de manera sistemática y generalizada además de las dificultades en cuanto a la recolección de datos.

Como si lo antes mencionado fuera poco, en los últimos años las inundaciones y los eventos vinculados con las sequías se han experimentado con los picos y niveles de gravedad más altos. El período entre los eventos extremos parece haberse vuelto más corto en determinadas regiones. Algunos autores (Lettenmaier, 2009), (Aswathanarayana, 2001) han hecho referencia a este cambio en la aparición de eventos extremos hidrológicos. Investigaciones más recientes (Sheffield, et al., 2012) sugieren que ha habido pocos cambios en la sequía de los últimos 60 años, estos resultados tienen implicaciones para la forma de interpretación del impacto del calentamiento global sobre el ciclo hidrológico a niveles locales que, dicho sea de paso, es el enfoque en el que se han desarrollado metodologías para la estimación de los periodos de retorno de los déficits vinculados a la sequía.

Un enfoque común para la caracterización de los déficits está compuesto por el ajuste a las distribuciones de frecuencia de muestreo de datos de las características del déficit hídrico. A pesar de los esfuerzos, la estructura probabilística de los déficits hídricos no puede ser debidamente investigada, debido al número limitado de eventos identificados, incluso en una serie histórica larga. Con el fin de superar tal dificultad, el comportamiento probabilístico de las características de los déficits ha sido en general obtenido analíticamente, suponiendo una estructura estocástica dada de las series hidrológicas (Mishra & Singh, 2011); es de este supuesto que se propone una metodología introducida recientemente para identificar las longitudes máximas de los déficits con el fin de validarla en el territorio Mexicano.

Con este panorama el presente estudio pretende caracterizar variables relacionadas al déficit hídrico en algunas estaciones hidrométricas de la región hidrológica número 10 a diferentes escalas de tiempo; acotando los alcances y limitaciones de cada tipo de análisis para que después sea factible relacionar los resultados con los impactos derivados de este fenómeno.

## Objetivos

El objetivo general de esta tesis consiste en modelar los parámetros involucrados con el déficit hídrico con dos enfoques: el de la severidad máxima anual, que incluye el análisis de las variables como el déficit máximo y tiempo de ocurrencia obtenidos a partir del nivel de truncamiento establecido previamente; y el enfoque basado en cadenas de Markov, con la que se obtiene la posibilidad de modelar la duración del déficit más severo a escalas de tiempo anual, mensual y semanal.

La caracterización del déficit hídrico tiene la finalidad de facilitar la cuantificación de los efectos socioeconómicos de la sequía en la región; para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar la técnica de ajuste a las distribuciones de frecuencia de muestreo de datos de las características de la sequía.
- Desarrollar y validar una técnica basada en cadenas de Markov para la predicción de la duración de la sequía más severa.
- Cuantificar la incertidumbre y confiabilidad asociada a cada técnica de estimación.

## **Organización del trabajo**

El trabajo está integrado por cinco capítulos estructurados como que se describe a continuación:

### **Capítulo 1. Déficit hídrico.**

Se presenta una revisión del fenómeno de la sequía hidrológica; enmarcando el fenómeno de déficit hídrico como el precedente y parte de la sequía. Se presentan los tipos de déficit existentes y finalmente se realiza una puntualización de los impactos que provoca el fenómeno de la sequía derivado de los déficits.

### **Capítulo 2. Análisis de series hidrológicas y meteorológicas.**

Se muestra el desarrollo del procedimiento de identificación de sequías modelando las variables de déficit, duración, intensidad y tiempo de ocurrencia. Adicionalmente se presentan las técnicas de interpolación que se usarán para obtener los datos de precipitación media de la cuenca.

### **Capítulo 3. Cadenas de Markov aplicadas en la predicción de la duración del déficit hídrico.**

En esta sección se describen los principios y ecuaciones de la técnica empleada, las técnicas de estimación de parámetros y sus pruebas de bondad de ajuste.

### **Capítulo 4. Caso de estudio**

Se aplican las técnicas presentadas en los capítulos anteriores en 11 series hidrológicas obtenidas de estaciones hidrométricas pertenecientes a la Región Hidrológica número 10; en cuencas representativas se ilustra el análisis de la relación del volumen de lluvia anual con el volumen anual de escurrimiento, con el fin de validar los datos hidrométricos como entradas de modelos para el análisis de déficits; se presentan y discuten los resultados obtenidos, adicionalmente, se discuten los alcances de cada técnica empleada.

### **Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones**

Se presentan una a una las conclusiones obtenidas en el presente trabajo; adicionalmente se plantean las líneas de investigación y aplicación de los resultados obtenidos, para las cuales se indican las recomendaciones correspondientes.

# CAPÍTULO 1 DÉFICIT HÍDRICO

Dado que las definiciones de sequía dependen del enfoque con que se traten, ya sea desde el punto de vista profesional o de la actividad económica que afectan (Reyes, 2001), el análisis de eventos de sequía incorpora diferentes índices y metodologías que consideran variables meteorológicas e hidrológicas, de este hecho surge la necesidad de modelar el déficit hídrico.

Entre muchas definiciones de sequía se puede encontrar la siguiente: “La sequía es un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación y la disponibilidad de agua en un período y en una región dada, es menor que el promedio histórico registrado y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas, o lo que es lo mismo, la sequía está estrechamente relacionada con los ecosistemas y con las actividades humanas que requieren del agua” (CONAGUA, 2012); existen dos grandes elementos de estudio que se pueden extraer de esta definición: el estudio de la disponibilidad del agua, en la que se enfocan los esfuerzos por estudiar analíticamente las características de una variable o serie de tiempo relacionada con la disponibilidad del agua que se pretende modelar para identificar y caracterizar periodos de déficit y, por otra parte, la cuantificación del impacto (socioeconómico y ambiental) generado por este déficit en el ecosistema y las actividades humanas.

Queda claro entonces que un evento de sequía está asociado a su correspondiente evento de déficit hídrico y que en gran parte de la literatura estos dos conceptos se fusionan en uno solo; para efectos de este trabajo se citará y mencionará el término “sequía” con el fin de resaltar las características implícitas que involucran al déficit hídrico.

## 1.1 Definición de déficit hídrico

De acuerdo con la definición de sequía citada anteriormente el déficit hídrico se puede explicar como un fenómeno que ocurre cuando la precipitación y la disponibilidad de agua en un periodo y en una región dada, es menor que el umbral fijado previamente.

La sequía es diferente a la aridez. La aridez es un fenómeno cronológico permanente, es una condición natural, de siempre, en cambio la sequía es un fenómeno temporal asociado a un evento de déficit hídrico, por lo tanto es un fenómeno que se puede presentar en cualquier tiempo y en cualquier lugar independientemente de su condición natural y de tiempo.

A las características antes mencionadas habría que añadir que la sequía es inevitable, impredecible, progresiva, y frecuentemente catastrófica; no tiene trayectoria ni epicentro definido y su principio y final son ambiguos y confusos.

## 1.2 Tipos de déficit

Existen varias formas de clasificación de las sequías, una de ellas, generalmente usada, remarca los dos aspectos mencionados de la sequía; relacionando al déficit hídrico y sus impactos en función de las diferentes variables de estudio y escalas de tiempo:

1. Sequía meteorológica: se presenta cuando la precipitación es muy inferior a lo esperado y por un largo periodo de tiempo.
2. Sequía agrícola: se registra cuando la cantidad de precipitación y su distribución, las reservas de agua del suelo, y las pérdidas debidas a la evaporación se combinan para causar una

disminución considerable de los rendimientos de cultivos y la productividad del ganado por deterioro de pasturas y,

3. Sequía hidrológica: ocurre cuando hay un déficit continuo en el escurrimiento superficial y alcanza éste un nivel inferior a las condiciones normales y/o cuando disminuye el nivel de aguas subterráneas.

Cabe resaltar que algunos autores mencionan un cuarto tipo de sequía: la socioeconómica; para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica con consecuencias económicas desfavorables. Este tipo de sequía está más ligada a la creciente presión de la actividad humana sobre el recurso agua que a la existencia de un déficit hídrico.

Convencionalmente, para fines de entendimiento del fenómeno se pueden clasificar las fases en términos de la proporción de la relación con el suministro o la disponibilidad, es decir, con el déficit y se tiene que cuando no hay sequía el déficit es menor al cinco por ciento, condiciones que se pueden esperar como normales. Si la sequía es incipiente, va del 5% al 10%, si es moderada, del 10% al 20%, severa del 20% al 25%, crítica, del 25% al 50% y catastrófica más del 50%. Obviamente, en cuanto más amplio es el déficit, la sequía se acentúa más, tiene mayores impactos y efectos.

### **1.3 Impactos de los déficits hídricos**

Los costos que provoca la presencia de déficits hídricos serán en función de sus impactos, estos pueden diferenciarse en ambientales, sociales y socioeconómicos ( CONAGUA, 2012):

#### Ambientales

- Degradación y pérdida de nutrientes de los suelos
- Desertización de suelos.
- Degradación y destrucción de los bosques.
- Deshidratación y muerte de la flora.
- Migración y muerte de la fauna.
- Disminución en la recarga de acuíferos.
- Sobreexplotación de acuíferos.
- Nivel de agua en embalses menor a la prevista.
- Afectación de la calidad de agua, afectación en la calidad del aire.
- Alteración del paisaje.

#### Sociales

- Disminución o pérdida total del hato ganadero.
- Daño perenne a los cultivos y reducción de la producción agrícola.
- Pérdidas económicas de la industria.
- Reducción en la producción.
- Reducción en la producción pesquera.
- Reducción en la generación de energía eléctrica.
- Reducción de la actividad industrial.
- Distracción de fondos públicos para mitigar los efectos de las sequías.
- Conflictos entre los diferentes usuarios del agua.
- Deterioro de la salud pública.
- Migración campesina del área rural.

- Reducción significativa de la demanda de empleos.
- Decremento de la calidad de vida de los sectores más desprotegidos.

#### Socioeconómicos

- Pérdidas económicas importantes en la población rural de menores ingresos.
- Los cultivos de maíz y frijol los más afectados históricamente.
- Escasez de agua en presas y para consumo humano.
- Muerte de ganado, en especial vacuno.
- Desempleo de grupos vulnerables como jornaleros agrícolas.
- Empobrecimiento y riesgo de las familias con cosechas para autoconsumo.
- Procesos migratorios Campo-Ciudad.
- Incremento de precios en productos agrícolas.
- Efectos inducidos en la salud de las poblaciones, en especial enfermedades gastrointestinales.



## CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS EN SERIES HIDROLÓGICAS Y METEOROLÓGICAS

En el enfoque de serie anual máxima el mayor evento dentro de un año hidrométrico se extrae del análisis de valores extremos. El año hidrométrico en este estudio se define como el año natural ya que los caudales bajos se producen principalmente en verano. Sin embargo, puede ocurrir que un evento en un año comienza y termina en el año siguiente. En ese caso, el evento no se divide sino que asigna al periodo al que pertenece el tiempo de ocurrencia de sequías.

Generalmente, la sequía, con la duración máxima anual será también la que presente el volumen máximo de déficit, pero esto no siempre es el caso, especialmente en años con sólo déficits leves. Por consiguiente, se analiza la serie anual máxima de duración y déficit de volumen.

El modelo de la serie anual máxima experimenta un problema cuando se utiliza un nivel de umbral relativamente bajo. En algunos años las condiciones de sequía no se producen, es decir, el flujo nunca es menor que el nivel de umbral, lo que implica que la serie anual máxima incluye valores de cero. La estimación de las propiedades de la sequía en este caso debe estar basada en la muestra de valores distintos de cero. Sin embargo, muchos valores de cero dentro de las series analizadas modificarán el tamaño de la muestra y afectaran seriamente el modelado valor extremo. Un procedimiento de probabilidad condicional para el análisis de frecuencia es adecuada cuando el número de observaciones registradas como cero es pequeño (Tallaksen, et al., 1997).

### 2.1 Metodología

La serie de tiempo para el análisis de este tipo de sequías está formada por los gastos medios diarios  $Q$  aforados.

Para iniciar el análisis se requiere establecer un umbral de referencia, el cual separa los flujos “mínimos” del resto de la muestra como se muestra en la Figura 2-1.

Este nivel puede ser el 85%, 90% ó 95% de los flujos que son igualados o excedidos de una muestra ordenada de mayor a menor.

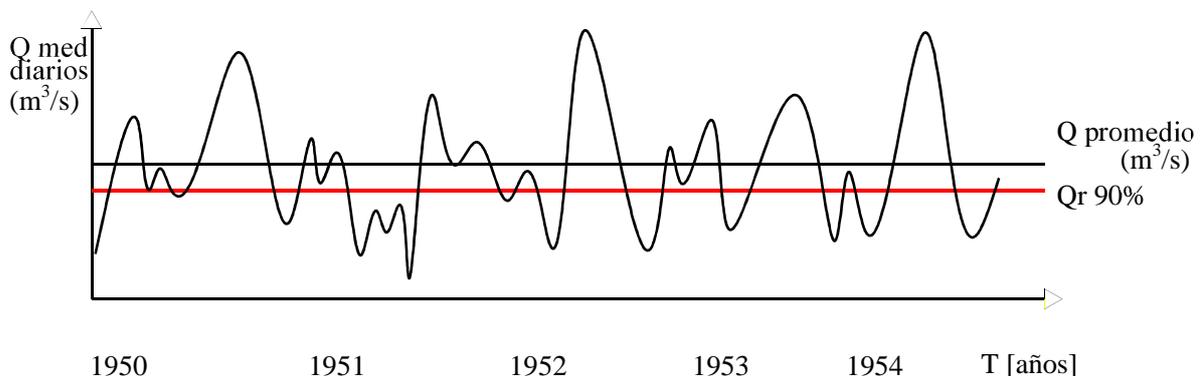


Figura 2-1 Hidrograma de un río donde se indica el gasto promedio y el gasto base del río  $Q_r$  90%.

Cada periodo de escasez se compone de seis parámetros:

1. Déficit  $D(v)$ .

El déficit o severidad, expresado en volumen, es el área comprendida entre el hidrograma y el nivel de truncamiento  $Q_r$ .

$$D(v) = Q_r[\tau_e(v) - \tau_b(v)] - \int_{\tau_b(v)}^{\tau_e(v)} Q_t dt \quad (2.1)$$

Para todo  $Q_t < Q_{r(p\%)}$

Dónde:

$D(v)$   $v$ -ésimo déficit registrado en un año particular.

$Q_t$  Gastos medios diarios en unidades de volumen entre tiempo.

$Q_{r(p\%)}$  Nivel de truncamiento en porcentaje.

$\tau_b(v)$  Tiempo de inicio del  $v$ -ésimo déficit en días considerando la referencia desde el 1° de enero.

$\tau_e(v)$  Tiempo de terminación del  $v$ -ésimo déficit en días considerando la referencia desde el 1° de enero.

2. Duración  $T(v)$ .

Es el número de días consecutivos para los cuales  $Q_t < Q_{r(p\%)}$ . Así:

$$T(v) = \tau_e(v) - \tau_b(v) \quad (\text{días}) \quad (2.2)$$

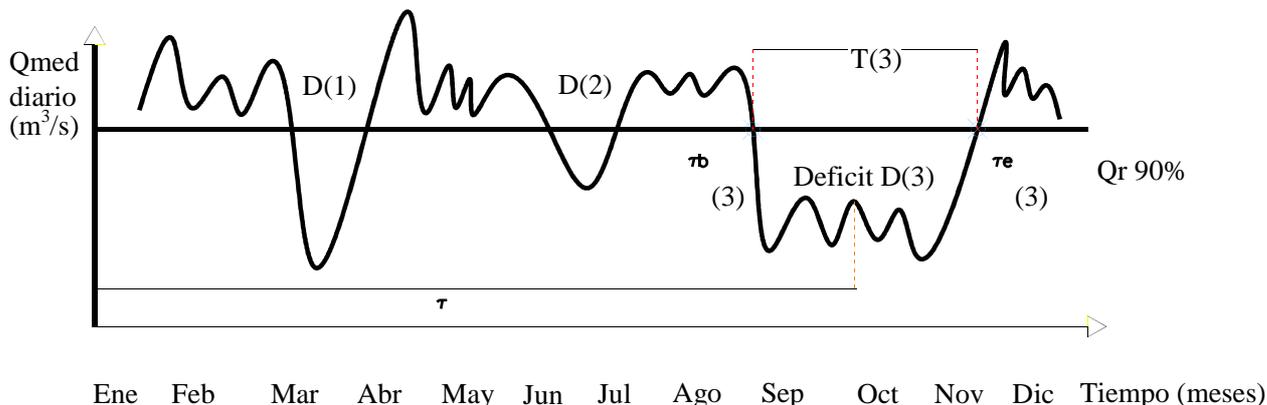
3. Tiempo de inicio en días considerando la referencia desde el 1° de enero,  $\tau_b(v)$ .

4. Tiempo de terminación en días considerando la referencia desde el 1° de enero,  $\tau_e(v)$ .

5. Tiempo de ocurrencia  $\tau(v)$ .

$$\tau(v) = \frac{1}{2} [\tau_e(v) - \tau_b(v)] \quad (\text{días}) \quad (2.3)$$

6. Número de orden  $(v)$ , que es el número consecutivo adimensional con el que se ordenan cronológicamente los déficits ocurridos en el año.



**Figura 2-2** Esquema de registro que muestra los déficits presentados en un año  $D(n)$ , el déficit máximo  $D(máx)$ , su duración  $T(v)$ , tiempos de inicio  $\tau_b(v)$  y terminación  $\tau_e(v)$  y tiempo de ocurrencia  $\tau(v)$ .

Es debido a que en un año se pueden presentar diferentes  $D(v)$  es conveniente analizar cada uno de los déficits ( $v$ ). Existen los llamados intereventos, que en este caso se pueden considerar como  $D(v) < 0.001$  déficit máximo registrado. El análisis se hace considerando las condiciones más extremas de cada año (se elige el de mayor déficit).

## 2.1 Pruebas de homogeneidad de las series

Deberán efectuarse pruebas de homogeneidad temporal a los parámetros de Déficit  $D(v)$ , Duración  $T(v)$  y Tiempo de ocurrencia  $\tau(v)$  con el propósito de detectar anomalías en las series de datos e identificar las cuencas en las que se encuentran indicios de actividad antropogenica como deforestación, apertura de nuevas áreas de cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación; o procesos naturales súbitos como incendios forestales, terremotos y deslizamiento de laderas entre otros (Escalante & Reyes, 2008).

### 2.1.1 Prueba estadística de Helmer:

Esta prueba es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento  $Q_j^i$  de la serie  $j$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$  con respecto a su valor medio  $Q^j$ . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una frecuencia, si de lo contrario se considera como un cambio  $C$ .

La serie se considera homogénea si cumple:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Prueba estadística T de Student:

Cuando la causa probable de la prueba de homogeneidad de la serie será un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico  $t$  es muy útil.

Si se considera una serie  $Q_j^i$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  del sitio  $j$ , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño  $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$  entonces el estado de prueba se define con:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (2.5)$$

Dónde:

$\bar{x}_1, S_1^2$  Media y varianza de la primera parte del registro de tamaño  $n_1$

$\bar{x}_2, S_2^2$  Media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño  $n_2$

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas y  $(\alpha)$

$v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que aquel de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $Q_j^i$  se considera no homogénea.

### 2.1.1 Prueba estadística de Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de comprobar la homogeneidad en el registro  $Q_j^i$  de la serie  $j$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$  y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero de tamaño total de la muestra, el segundo de tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ), y el tercero de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ).

La prueba compara el valor de  $\bar{Q}_j$  del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos  $\bar{Q}_{60}^j$  y  $\bar{Q}_{30}^j$ .

Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad j = 1 \quad (2.6)$$

Para una sola muestra analizada:

$$S_Q^j = \left[ \frac{1}{(n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}} \quad (2.8)$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}} \quad (2.9)$$

$$\zeta_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (2.10)$$

$$\zeta_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (2.11)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w \left[ 1 + (\zeta_w^j)^2 \right]} \right\}^{1/2} |\zeta_w^j| \quad (2.12)$$

Para  $w = 60$  ,  $w = 30$

El estadístico  $t_w$  tiene distribución t de Student de dos colas con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ . Si y solo si, el valor absoluto de  $t_w$  para  $w = 60$  y  $w = 30$  es mayor que aquel de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $Q_j^i$  se considera no homogénea.

## 2.2 Obtención de series meteorológicas

Para contar con el conjunto de datos adecuado al realizar un análisis de la precipitación se requiere contar con técnicas estadísticas que transfieran información de sitios vecinos al de proyecto.

Las técnicas pueden considerar solo las distancias entre sitios o con la estructura de correlación entre los eventos analizados.

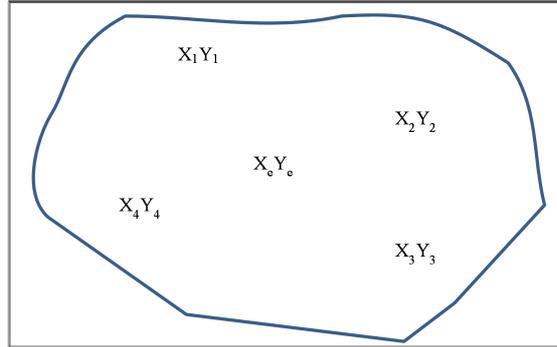
Sea  $x_j$  y  $y_j$  las coordenadas de los puntos  $j$ , en un espacio bidimensional como se muestra en la Figura 2-3 y  $P_j$  una función de las coordenadas  $x_j$  y  $y_j$ ; la que denota el proceso observado en  $n$  estaciones de medición, así  $j=1, \dots, n$ .

$P_e$  es una estimación del proceso en un punto con coordenadas  $x_e$  y  $y_e$ . La estimación puntual se hace a través de una combinación lineal del tipo:

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad (2.13)$$

Dónde:

$W_j$  Factor de peso en los sitios de muestreo  $j$ .



**Figura 2-3 Espacio bidimensional de sitios de estaciones climatológicas**

Para este trabajo se usará el método de interpolación inversa con  $\beta = 2$  cuyo proceso se describe a continuación.

Los factores se obtienen con la expresión:

$$\omega_j = \frac{\left[ \frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{d_{ei}} \right]^\beta} \quad (2.14)$$

$\beta=2$  Interpolación del cuadrado de la distancia inversa

$$d_{ej} = \sqrt{(x_e - x_j)^2 + (y_e - y_j)^2} ; \quad (2.15)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Una vez obtenidas las series de precipitación en diferentes puntos de la cuenca analizada se utiliza el método de Thiessen para estimar el volumen de escurrimiento promedio de la cuenca con el fin de comparar, en el mismo periodo de tiempo, el volumen de precipitación frente al volumen de escurrimiento para establecer relaciones y tendencias que ayuden a mejorar la caracterización de las cuencas.

### 2.3 Distribuciones de frecuencia

Se modela el déficit, la duración y tiempo de ocurrencia para diferentes periodos de retorno considerando que son eventos mixtos, ya que existen años donde no se presentan eventos de déficit bajo el criterio del percentil 90. Por lo tanto:

$$H(x) = q + pF(x) \quad (2.16)$$

Dónde:

$$p = (1 - q)$$

q Probabilidad de tener ceros

F(x) Función de distribución acumulada

Varias distribuciones de probabilidad se pueden ajustar a la duración, el déficit y tiempo de ocurrencia de las series. Algunos autores (Woo & Tarhule, 1994) recomiendan las distribuciones normal, exponencial y Weibull basada en su apoyo teórico, las consideraciones prácticas y la experiencia adquirida en otros estudios sobre flujos bajos. Para el caso de este estudio se usaron las distribuciones: normal, con estimadores calculados por el método de momentos y momentos L; log normal de 2 parámetros con estimadores por momentos; log normal de 3 parámetros con estimadores por momentos y máxima verosimilitud, Gamma de 2 y 3 parámetros, con estimadores por momentos y máxima verosimilitud; Gumbel , con estimadores por momentos, máxima verosimilitud, máxima entropía y momentos L; exponencial de 2 parámetros con estimadores por momentos y máxima verosimilitud y la distribución general de valores extremos, con estimadores por momentos y máxima verosimilitud.

Las técnicas de estimación de parámetros para las principales distribuciones sugeridas en el análisis de frecuencias para eventos de déficit se presentan a continuación; las restantes pueden ser consultadas en libros especializados en técnicas estadísticas en hidrología (Escalante & Reyes, 2008) y (Gómez, et al., 2011) .

### 2.3.1 Distribución Normal

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.17)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad -\infty < x < \infty \quad (2.18)$$

Dónde:

$\mu$  Parámetro de ubicación

$\sigma$  Parámetro de escala

$\mu$  Media

$\sigma^2$  Varianza

Estimación de eventos:

$$\hat{X}_T = \hat{\mu} + \hat{\sigma}\hat{U}_T \quad (2.19)$$

Estimadores por Momentos y Máxima Verosimilitud

$$\hat{\mu} = \bar{X}$$

$$\hat{\sigma} = S$$

Siendo  $\bar{X}$  y  $S$  la media y desviación estándar la muestra y

$$\hat{U}_T = V - \frac{b_0 + b_1 V + b_2 V^2}{1 + b_3 V + b_4 V^2 + b_5 V^3} \quad (2.20)$$

Dónde:

$$b_0 = 2.515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

$$V = \sqrt{\text{Ln} \left[ \frac{1}{\left(\frac{1}{T^2}\right)} \right]} \quad (2.21)$$

Para  $0.5 < F(x) \leq 1$  se cambia por:

$$V = \sqrt{\text{Ln} \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{T}\right)^2} \right]} \quad (2.22)$$

Y el signo de  $\hat{U}_T$  cambia de la siguiente manera  $\hat{U}_T = -\hat{U}_T$

### 2.3.1 Distribución Gumbel

La distribución Gumbel presenta las funciones de probabilidad y probabilidad acumulada siguientes:

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}} \quad (2.23)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)} \cdot e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}} \quad (2.24)$$

Los parámetros de ajuste de esta distribución pueden obtenerse por Momentos, por Máxima Verosimilitud, por Momentos L y por Máxima Entropía.

Estimadores por Momentos

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{X} - 0.45S \\ \hat{\alpha} &= 0.78S \end{aligned} \quad (2.25)$$

Los eventos de diseño por esta distribución se obtienen mediante la expresión dada por la ecuación:

$$X_T = \hat{\mu} + \hat{\alpha} \left[ \text{Ln} - \text{Ln} \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.26)$$

### 2.3.2 Distribución General de Valores Extremos (GVE)

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \left( \frac{x - \mu}{\alpha} \right) \beta \right]^{-1/\beta} \right\} \quad (2.27)$$

Parámetros por momentos

$$\text{Para } -11.35 < g < 1.1396 \quad (2.28.a)$$

$$\hat{\beta} = 0.279434 - 0.333535 g + 0.048306 g^2 - 0.023314 g^3 \\ + 0.00376 g^4 - 0.000263 g^5$$

$$\text{Para } 1.14 < g < 18.95$$

$$\hat{\beta} = 0.25031 - 0.29219 g + 0.075357 g^2 - 0.010883 g^3 + 0.000904 g^4 \\ - 0.000043 g^5 \quad (2.28.b)$$

$g$  Coeficiente de asimetría muestral

$$\hat{B} = [(\text{Var}(x))/(\text{Var}(y))]^{(1/2)} \quad (2.29.a)$$

$$\text{Var}(x) = S_x^2 \quad (2.29.b)$$

$$E[y] = \Gamma(1 + \hat{\beta}) \quad (2.29.c)$$

$$\text{Var}(y) = \Gamma(1 + 2\hat{\beta}) - \Gamma^2(1 + \hat{\beta}) \quad (2.29.d)$$

$$\text{Para } \hat{\beta} > 0$$

$$\hat{A} = \bar{x} - \hat{B} E[y] \quad (2.30.a)$$

$$\hat{\alpha} = -\hat{\beta} \hat{B} \quad (2.30.b)$$

$$\hat{\mu} = \hat{A} + \hat{B} \quad (2.30.c)$$

$$\text{Para } \hat{\beta} > 0$$

$$\hat{A} = \bar{x} - \hat{B} E[y] \quad (2.31.a)$$

$$\hat{\alpha} = \hat{\beta} \hat{B} \quad (2.31.b)$$

$$\hat{\mu} = \hat{A} - \hat{B} \quad (2.31.c)$$

### 2.3.3 Distribución Gamma de 3 parámetros.

$$f(x) = \frac{1}{d\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \quad (2.32)$$

$$X_T = \widehat{X}_0 + \widehat{\alpha}\widehat{\beta} \left[ 1 - \frac{1}{9\widehat{\beta}} + \widehat{U}_T \sqrt{\frac{1}{9\widehat{\beta}}} \right]^3 \quad (2.33)$$

Estimadores por Momentos

$$\hat{\beta} = \frac{4}{g^2} \quad (2.34.A)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{s}{\sqrt{\hat{\beta}}} \quad (2.34.B)$$

$$X_0 = \bar{X} - S\sqrt{\hat{\beta}} \quad (2.34.C)$$

### 2.3.4 Distribuciones Mezcladas

Previendo un comportamiento de series con procesos hidrológicos diferentes (de dos poblaciones) es concebible que cierta porción “p” de la población tiene valores que provienen de una distribución  $F(x)$  mientras que la restante (1-p) tiene una distribución  $F_2(x)$ , así la mezcla es :

$$F(x) = p F_1(x) + (1 - p) F_2(x) \quad (2.35)$$

Realizando un análisis de frecuencias que incluían distribuciones de probabilidad mezclada: Gumbel-Gumbel, Gumbel-Weibull, y Weibull -Weibull; con estimadores calculados por máxima verosimilitud (Escalante & Reyes, 2008).

Si ambas son Gumbel se forma la Gumbel mixta:

$$F(x) = p \cdot e^{-e^{-\left(\frac{\alpha-u_1}{\alpha_1}\right)}} + (1 - p) \cdot e^{-e^{-\left(\frac{\alpha-u_2}{\alpha_2}\right)}} \quad (2.36)$$

Para  $x>0$ ;  $\alpha_1>0$ ;  $\alpha_2>0$ ;  $0<p<1$

Los estimadores se obtienen maximizando la función de verosimilitud

$$\ln L = \ln \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (2.37)$$

## 2.4 Prueba de bondad de ajuste

Para seleccionar la distribución con la que se modelarán los eventos se realizará la prueba de bondad de ajuste conocida como error estándar de ajuste.

$$EE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n - n_p} \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

Dónde:

$x_i$  i-ésimo gasto registrado

$x_0$  i-ésimo gasto calculado con la función de distribución bajo análisis

$n_p$  Número de parámetros de la FDP

La función de distribución que tenga menor error cuadrático será la más adecuada, de acuerdo con este método, de todas las funciones de distribución analizadas.



## CAPÍTULO 3 CADENAS DE MARKOV APLICADAS EN LA PREDICCIÓN DE LA DURACIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO

Algunos autores (Sharma & Panu, 2012) sugirieron el uso de un índice estandarizado hidrológico (SHI por sus siglas en inglés) como una medida para definir y modelar los déficits hidrológicos. El SHI<sub>i</sub> representa un valor estandarizado de las series de tiempo de una variable como el gasto, que puede ser agrupado en series anuales, mensuales y semanales, x<sub>i</sub>. Cabe señalar que el concepto de SHI es análoga a SPI, índice de precipitación estandarizada (McKee, et al., 1993), tal como se utiliza en el contexto de las sequías meteorológicas, excepto que SPI representa una entidad estandarizada y normalizada (convertido en una probabilidad normal equivalente variable aleatoria), mientras que SHI es sólo una entidad estandarizada y por lo tanto implícitamente hereda el carácter no normal de la serie de flujo. La secuencia de SHI resulta ser prácticamente inmóvil, y se puede utilizar como una plataforma para el modelado y la predicción de la duración del déficit, o longitud, L<sub>T</sub>.

$$SHI_i = (x_i - \mu) / \sigma \quad (3.1)$$

Donde

$\mu$       Media de la serie x<sub>i</sub>

$\sigma$       Desviación estándar de la serie x<sub>i</sub>

La series mensuales y semanales de flujo fueron estandarizados mediante la eliminación de la periodicidad a través de la estandarización mes a mes o semana a semana, de tal manera que la serie resultante  $u_{y,t} = \{(x_{y,t} - \mu_t) / \sigma_t\}$  es una serie estacionaria con media cero y la unidad como desviación estándar. En esta expresión, X<sub>y,t</sub> es el flujo en el y-ésimo año (y = 1, 2, 3, ..., n, es decir, año de registro de datos n) y el t-ésimo meses o semanas (t = 1, 2, 3, ..., 12, o t = 1, 2, 3, ..., 52), y  $\mu_t$  y  $\sigma_t$  son la media y la desviación estándar, respectivamente, correspondientes a los flujos de cada t.

### 3.1 Metodología

Cuando el SHI es cortado en un nivel de umbral e<sub>0</sub>, los valores por encima de ese nivel son positivos o en estado húmedo (w) y los que están por debajo del nivel, negativo o en estado de déficit (d). Así, la serie SHI puede ser transformada en una secuencia de estados discretos en términos de w y d (por ejemplo, wwwddddwwwdd). Se pueden definir las siguientes anotaciones de probabilidades:

- P (d) (probabilidad simple), la probabilidad de cualquier semana siendo una semana sequía a un nivel umbral dado = q;

- P (d | d) (probabilidad condicional), la probabilidad de cualquier semana siendo una semana sequía dado que la semana anterior también era un semanas sequía (de primer orden persistencia) = q<sub>q</sub>;

- P (d | d, d) (probabilidad condicional), la probabilidad de cualquier semana es una semana de sequía, ya que las dos semanas anteriores también fueron semanas de sequía (De segundo orden persistencia) = q<sub>qq</sub>.

Del mismo modo, para las probabilidades de tercer orden, P (d | d, d, d) = q<sub>qqq</sub> y P (w | d, d, d) = p<sub>qqq</sub>. De manera similar, p = P (w); pp = P (w | w), y p<sub>pp</sub> = P (w | w, w) y, asimismo, P<sub>qq</sub> = P (w | d, d); q<sub>p</sub> = P

$(d | w)$ ;  $q_{qp} = P(d | d, w)$ ;  $q_{qqp} = P(d | d, d, w)$ , y así sucesivamente. La suma probabilidades simple y condicional es igual a 1 para: el nulo, primer, segundo y tercer orden de dependencia, respectivamente, como sigue:

$$p + q = 1 \quad (3.2.a)$$

$$p_p + q_p = 1; p_q + q_q = 1 \quad (3.2.b)$$

$$p_{pp} + q_{pp} = 1; p_{qq} + q_{qq} = 1; p_{qp} + q_{qp} = 1 \quad (3.2.c)$$

$$q_{qqq} + p_{qqq} = 1; p_{qqp} + q_{qqp} = 1; p_{ppp} + q_{ppp} = 1 \quad (3.2.d)$$

La distribución de probabilidad de longitudes de sequía y periodos húmedos en una aparición secuencial (como  $wwwwdwwddwwdddww-d$ ) se puede deducir mediante el uso de los primeros principios de probabilidades simples y condicionales (Sharma & Panu, 2010). Dado que los términos de memoria están siendo considerados hasta el tercer orden en las secuencias semanales  $SHI_i$ , las ecuaciones de la cadena de Markov-3, pueden derivarse usando la ley de las probabilidades, Sharma y Panu (ibid.) proponen las siguientes formas de modelo de cadena de Markov:

Cadena de Markov-3:

$$E(L_T) = 3 - [\{T \log(1 - q) q_p q_{qp} q_{qqp}\} / \log(q_{qqq})] \quad (3.3)$$

La ecuación puede ser reducida a una cadena de Markov de orden inferior de la siguiente manera:

Cadena de Markov-2:

$$E(L_T) = 2 - [\log\{T(1 - q) q_p q_{qp}\} / \log(q_{qq})] \quad (3.4)$$

Cadena de Markov-1:

$$E(L_T) = 1 - [\log\{T(1 - q) q_p\} / \log(q)] \quad (3.5)$$

Modelo aleatorio:

$$E(L_T) = 0 - [\log\{T(1 - q)\} / \log(q)] \quad (3.6)$$

Se hace hincapié en que  $T$  se toma como el tamaño de la muestra ( $n$ ) del río bajo consideración de tal manera que la probabilidad de rebasamiento es igual a  $1/n$ , que es equivalente a una estimación empírica del período de retorno a través de la ley empírica de Weibull ( $= 1 / (n + 1) \approx 1 / n = 1 / T$ ). La ley empírica de Weibull es generalmente aplicable para un tamaño de muestra grande, que está disponible para los análisis mensuales y semanales. Para un tamaño de muestra pequeño, como los flujos anuales, se encontró que la ley empírica de Hazen ( $= (2m - 1) / 2n = 1/2n$ ,  $m = 1$ , (Viessman & Lewis, 2003)) era más confiable en el presente estudio. Para un modelo aleatorio (también conocido como la cadena de Markov-0), no hay ningún parámetro adicional, que no sea la ya conocida  $q$  y  $T$ . Estos parámetros pueden estimarse a partir de los datos históricos utilizando un método de conteo. Las secuencias  $SHI_i$  se pueden truncar en los niveles correspondientes de  $Q = 0.5, 0.45, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.10$  y  $0.05$  para representar los diferentes grados de déficit.

### 3.2 Modelo de cadenas de Markov para series anuales, mensuales y semanales.

Para estimar los parámetros  $q$ ,  $q_q$ ,  $q_p$ ,  $q_{qq}$  y  $q_{qp}$  se propone usar inicialmente la ecuación propuesta por Sen 1977, ecuación ( 3.7 ); ya que las estimaciones suficientemente precisas pueden obtenerse a partir de los datos históricos con el tamaño de la muestra  $n > 1000$  (Chin, 1977) pero las series anuales no cumplen con ese requisito.

$$q_q = q + \frac{1}{2\pi q} \int_0^{\rho_1} [\exp(0.5z_0^2/(1+v))] * (1-v^2)^{-0.5} dv \quad (3.7)$$

Dónde:

$\rho_1$  Coeficiente de autocorrelación de retraso 1.

$v$  Variable ficticia de la integración.

$z_0$  Nivel de umbral para una variable con distribución normal estándar correspondiente al valor de  $q$ . (ejemplo: si  $q = 0.5$ , el valor de  $z_0 = 0$ , del mismo modo, para  $q = 0.05$ ,  $z_0 = -1.65$ ).

Cuando la serie de SHI sigue el comportamiento de una distribución gamma el nivel umbral estandarizado  $SHI_0 (= e_0)$  deberá ser convertido primero en  $z_0$  y su resultado se inserta en la ecuación ( 3.7 ) para obtener la estimación de  $q_q$ .

La siguiente transformación de Wilson-Hilferty es propuesta por los autores del procedimiento que se sigue para este ejercicio (Sharma & Panu, 2012) para obtener los valores de  $z_0$  en las series SHI de gastos que siguen en la función de densidad gamma:

$$z_0 = (6/\gamma)[(0.5\gamma e_0 + 1)^{0.333} - 1] + \gamma/6 \quad (3.8)$$

Donde  $z_0$  y  $e_0$  son las variables aleatorias gamma estandarizada normal y estandarizada, respectivamente, y  $\gamma$  es el coeficiente de asimetría.

Un valor de  $q_p$  se puede obtener de la relación trivial,  $q_p = (1 - p_p)$  y  $p_p$  se puede calcular de la ecuación ( 3.7 ) mediante la sustitución de  $p$  por  $q$  y  $q_p$  por  $p_p$  al nivel de  $q = 0.5$ , se puede observar que  $q_p = (1 - q_q)$ .

Las series mensuales y semanales  $SHI_i$  se truncaron en los niveles  $e_0$  tal que correspondan los valores de  $q$  que van de 0.5 a 0.05. En vista de la existencia de muestras suficientemente grandes de registros observados en las escalas mensuales y semanales de tiempo, no se presenta incertidumbre significativa al estimar el valor de  $q$ .

Se evaluó la bondad de ajuste de las predicciones basadas en el modelo elegido utilizando el coeficiente de la eficiencia, COE (Nash & Sutcliffe, 1970).

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3.9)$$

Dónde:

$Q_i$  Variable observada

$\hat{Q}_i$  Variable estimada

$\bar{Q}$  Media de la variable observada

El coeficiente puede variar de  $-\infty$  a 1, con una perfecta correspondencia en COE=1

### 3.3 Modelo para series mensuales y semanales con revisión de parámetros.

Es posible mejorar las estimaciones considerando los principios del método basado en la estimación de parámetros DARMA (La secuencia de 0 “w” y 1 “d” forma una serie tiempo, que se somete a análisis de autocorrelación de una manera similar como se llevó a cabo en modelos ARMA clásicos (Box & Jenkins, 1976) que consiste en las relaciones basadas en la varianza de las series. Con este antecedente se ha propuesto la relación que involucra a la varianza de las longitudes del déficit para el cálculo de los parámetros condicionales, (Sharma & Panu, 2012), (Sen, 1977):

$$\sigma^2 = q_q / (1 - q_q)^2 \quad (3.10)$$

Donde

$\sigma^2$  Varianza de la longitud del déficit en un nivel de umbral determinado por q

Mediante la inserción de los valores de  $\sigma^2$  en la ecuación ( 3.10 ), se obtuvo la estimación mejorada de  $q_q$  (denotado como  $q_q'$ ) mediante procesos iterativos. Basándose en las estimaciones de  $q_q'$ , q y p ( $p = 1 - q$ ), la estimación de  $q_p'$  fue mejorada usando la siguiente ecuación (Sen, 1977):

$$q_p' = (1 - q_q') (q / p) \quad (3.11)$$

Para el caso de las secuencias SHI mensuales y semanales los valores de los parámetros revisados  $q_q'$  y  $q_p'$  se introdujeron en las ecuaciones ( 3.5 ) y ( 3.6 ) para obtener los nuevos valores de  $E(L_T)$ .

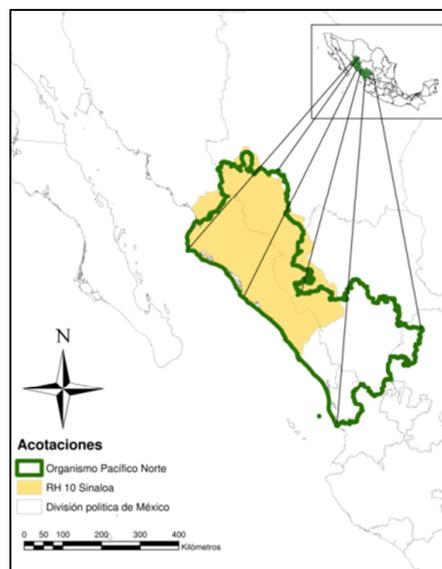
En lo que respecta a las probabilidades de segundo orden se adoptó una regla en la que la nueva estimación de  $q_{qq}$  (denotado por  $q_{qq}'$ ) es igual a  $\alpha_1 * q_q$ ; en donde  $\alpha_1 = q_{qq} / q_q$ ;  $q_{qq}$  y  $q_q$  se obtienen utilizando el método de conteo usado anteriormente. Para una estación dada, el valor de  $\alpha_1$  se calculó en todos los niveles umbral y el valor medio fue utilizado para predecir  $E(L_T)$ . Otro parámetro que necesita ser estimado es  $q_{qp}'$  (es decir, la estimación revisada de  $q_{qp}$ ). Para las secuencias de SHI<sub>i</sub> de todas las estaciones, el parámetro  $q_{qp}'$  puede ser expresado como  $q_{qp} = \alpha_2 * q_{qq}$ ; Para cada estación  $\alpha_2$  es el valor promedio basado en todos los niveles de umbral.

## CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO

Para fines de aplicación de la metodología expuesta en los capítulos anteriores se presenta un caso de estudio; este fue elegido por la importancia que tiene en la actividad primaria, desde el punto de vista socioeconómico; no obstante cabe señalar que esta metodología pudo ser puesta a prueba en cualquier zona dado que, como ya se había explicado, la identificación de periodos de déficit es independiente del clima.

### 4.1 Descripción de la zona de estudio

El organismo de cuenca Pacífico Norte comprende la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit; políticamente está integrada por 51 municipios. Comprende dos Regiones Hidrológicas una de ellas la Región Hidrológica 10, con una extensión de 104 790 km<sup>2</sup>.



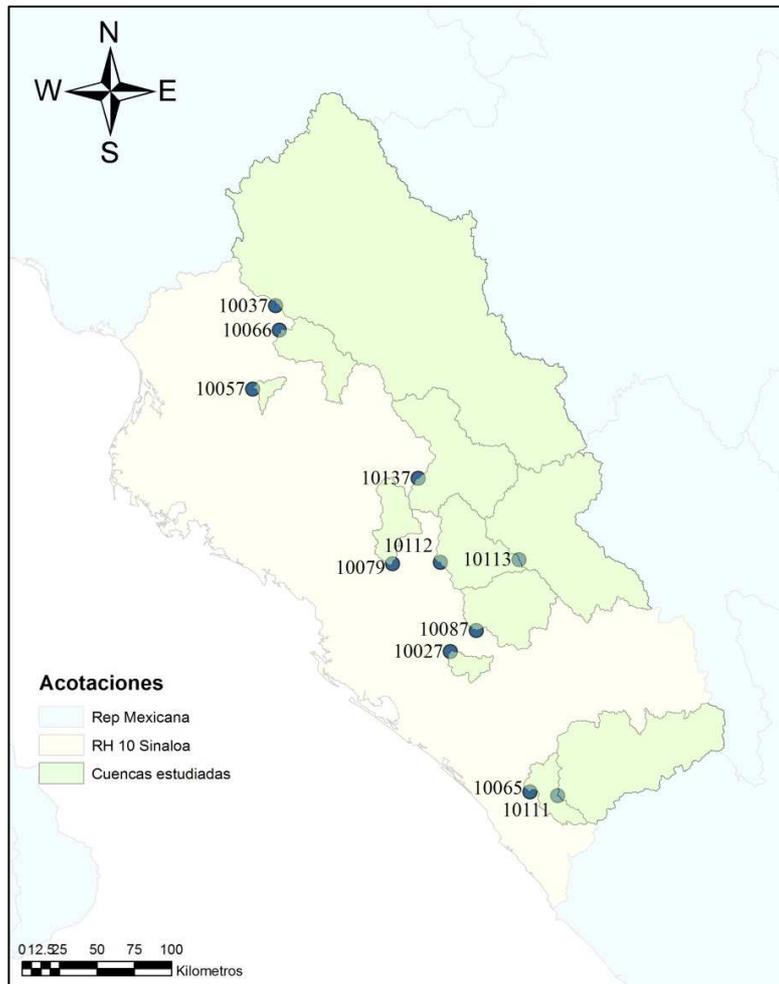
**Figura 4-1 Delimitación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a través de datos oficiales de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2013.**

El sistema hidrográfico de la Región Hidrológica 10 descarga a la vertiente del Océano Pacífico a través de 8 ríos principales. Además cuenta con grupos de corrientes que descargan a esteros o al mar. La hidrografía está caracterizada por corrientes que descienden de los flancos de la Sierra Madre Occidental y desembocan en el Océano Pacífico.

Por las condiciones geohidrológicas de la Región, los acuíferos mantienen una recarga que proviene desde las partes altas de la sierra y que se complementa con las filtraciones de lluvia sobre la planicie. En el organismo de cuenca Pacífico Norte, que se estima de 30 015 km<sup>2</sup>, destacando por su magnitud los acuíferos de: El Fuerte, Sinaloa y Acaponeta, con más de 3 000 km<sup>2</sup> cada uno. La recarga anual estimada es de 1 442 hm<sup>3</sup> y la extracción es de 983 hm<sup>3</sup>; el uso principal es el agrícola; como resultado, se tiene una disponibilidad de 459 hm<sup>3</sup> anuales. Cabe hacer notar que en los acuíferos de la RH 10 se mantiene prácticamente el total de la disponibilidad, en virtud de que en esta región hidrológica, se aprovechan principalmente las aguas superficiales por medio de la infraestructura existente. (CONAGUA, 2013).

## 4.2 Estaciones hidrométricas estudiadas

De todas las estaciones hidrométricas existentes de la región 10 en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, BANDAS, (CONAGUA, 2012) se extrajeron aquellas que contaran con suficientes datos quedando las siguientes estaciones como factibles para realizar el análisis (Figura 4-2).



**Figura 4-2 Ubicación de las estaciones analizadas**

Los datos para el análisis constituyen registros de flujo naturales (no regulados) e ininterrumpidos de los once ríos situados dentro de la región hidrológica 10. Los datos de gasto medio diario y mensual para estos once puntos de aforo fueron extraídos de la base de datos BANDAS. Al seleccionar estas estaciones se buscó que la necesidad de datos de relleno fuera mínima y, en el caso de datos faltantes, estos eran completados usando una técnica de correlación estándar. El relleno de datos solo fue usado para lapsos cortos y solo si existía una estación hidrométrica con muy buena correlación, de lo contrario las estaciones hidrométricas fueron desechadas por no contar con un registro completo. Las estaciones finalmente seleccionadas se muestran en la tabla 4-1.

**Tabla 4-1 Estaciones hidrométricas seleccionadas para el análisis de frecuencia.**

Número de estación	Nombre de la estación	Corriente	Datos (Años)	Periodo de existencia de datos (Años)	Área de la cuenca Km <sup>2</sup>
10027	El Bledal	Arroyo El Bledal	57	1938-1994	371
10037	Huites	Río Fuerte	51	1942-1992	26,057
10057	Bamicori	Arroyo Baroten	35	1951-1983	223
10065	Ixpalino	Río Piaxtla	47	1953-1999	6,166
10066	Choix	Río Choix	31	1955-1985	1,403
10079	Badiraguato	Río Badiraguato	38	1960-1999	1,018
10087	Tamazula	Río Tamazula	37	1963-1999	2,241
10111	Piaxtla	Río Piaxtla	46	1958-2003	5,307
10112	Guatenipa II	Río Humaya	33	1969-2001	8,252
10113	La Huerta	Río Humaya	30	1970-1999	6,149
10137	Tecusiapa	Río Petatlán	45	1959-2003	3,773

**FUENTE: (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2012)**

## 4.3 Importancia del sector primario en la Región Hidrológica 10

### 4.3.1 Agricultura

Con base en la información de la región hidrológica 10, se sabe que: el desarrollo y progreso del estado ha descansado tradicionalmente en el sector primario, principalmente en la agricultura, que incluye desde productores altamente tecnificados hasta aquellos de subsistencia. La trascendencia económica más importante de la actividad agrícola radica en que es fuente amplia de empleos productivos, al originar trabajo para alrededor del 26% de la fuerza laboral del Estado. Así, contribuye a la generación de ingresos, bienestar y progreso para la población que vive relacionada con el campo. El estado dispone de más de 820,000 hectáreas de riego y 657,000 de temporal, de las cuales se logró sembrar en promedio en los últimos años 1.25 millones de hectáreas con una producción de alrededor de 9.4 millones de toneladas, base para que la agricultura genere alrededor del 21.2% del PIB estatal a valor constante, y que significa 5 veces más que el PIB nacional para este sector. (Mártinez, 2006).

En el contexto internacional la edición anterior de la página del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED) al referirse al estado de Sinaloa subraya que desde hace cuatro décadas practica la agricultura más tecnificada y moderna del país, su alta productividad le permite participar en los mercados internacionales como exportador de productos frescos de origen hortifrutícola, las que representan más del 65 % de las exportaciones totales que realiza Sinaloa. Aproximadamente el 97 % de las exportaciones de hortalizas, legumbres y frutas que el estado realiza son enviadas a Estados Unidos, el resto es para cubrir parcialmente los mercados de Canadá, España, Francia, Italia, Suiza, Argentina, Alemania, Holanda, Bélgica, Japón y Colombia. (INAFED, 2012).

En la siguiente Tabla 4-2 se observa la importancia que tiene el estado de Sinaloa con respecto a la producción nacional.

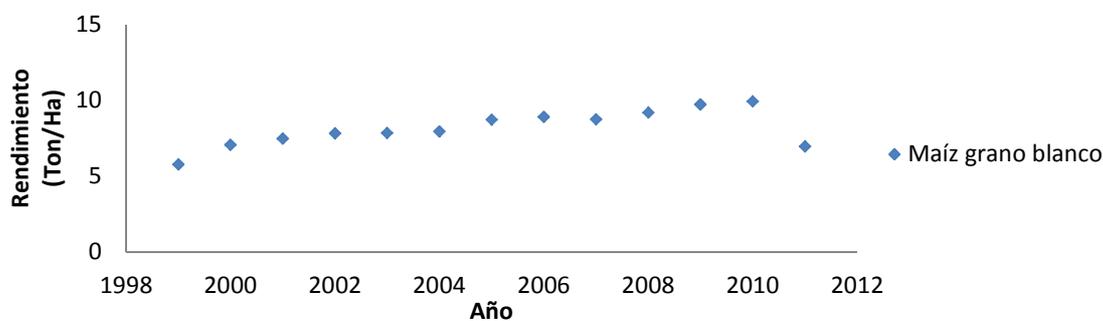
**Tabla 4-2 Posición de Sinaloa en la producción agrícola nacional según cultivo 2010.**

Cultivo	Lugar que Ocupa	Participación nacional %
Garbanzo Grano	Primero	49.2
Pepino	Primero	38.5
Tomate Rojo	Primero	32.7
Calabacita	Primero	27.0
Maíz Grano	Primero	26.0
Tomate Verde	Primero	21.0
Papa	Segundo	20.9
Chile Verde	Segundo	19.4
Cártamo	Segundo	16.6
Frijol	Segundo	15.6
Sorgo Grano	Tercero	8.4
Trigo	Octavo	2.4

**FUENTE: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, delegación estatal. SIAP Estos informes corresponden al ciclo agrícola inmediato anterior**

Como lo muestra la Tabla 4-2 Sinaloa es un estado en el que la actividad agropecuaria juega un papel prioritario en su desarrollo económico, es por ello la importancia del análisis del fenómeno de la sequía en esta región.

Datos oficiales de rendimiento del maíz en grano, uno de los principales productos agrícolas en el estado, hacen evidente un decremento del rendimiento de este cultivo como lo muestra la Figura 4-3; a partir del año 2010.



**Figura 4-3 Rendimiento de Maíz Blanco en Ton/Ha, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), 2012.**

Al respecto el segundo informe de Gobierno del Estado de Sinaloa en el año 2012 menciona: “Con la extracción del agua del subsuelo se auxilia de manera emergente el riego agrícola. Superar las dificultades de insuficiencia de agua en el ciclo agrícola otoño invierno 2011-2012, requirió de un esfuerzo extraordinario, para que de manera conjunta con la CONAGUA se acordara abrir pozos profundos en el auxilio de riego en la agricultura. Se participó con 15 millones de pesos en la apertura de 80 pozos profundos y de forma compartida con la CONAGUA se procuró la rehabilitación de 200 más para la extracción de agua del subsuelo, que permitieron auxiliar el riego a 16 mil hectáreas. Este

Programa prevé la rehabilitación de 688 pozos y 146 plantas de bombeo existentes en el territorio estatal para rescatar mil 500 millones de metros cúbicos y hacer posible una irrigación de 150 mil hectáreas de maíz en este ciclo agrícola 2012-2013”.

### 4.3.2 Ganadería.

Los impactos de la sequía sobre la ganadería pueden ser directos o indirectos. Primeramente, los animales sufren las altas temperaturas continuas, y en segundo lugar por la falta de agua. Cabe mencionar que la fauna no presenta la misma respuesta que las flora ante las sequías prolongadas, en sus diversas especies y variedades (Mártinez, 2006).

De acuerdo con el segundo informe de gobierno: “La ganadería sinaloense ha recuperado su nivel de competitividad, al haberse duplicado de 15 a 30 pesos el precio del ganado en pie en los últimos dos años, lo que ha promovido el repoblamiento de los hatos ganaderos y fortalecido el poder adquisitivo de los ganaderos” (Gobierno del Estado de Sinaloa, 2012).

**Programa contra la sequía:** Busca brindar respuestas oportunas para atender las necesidades de agua de la ganadería, con la participación estatal y la intervención de los productores. Para enfrentar las críticas condiciones de estiaje en todo el estado, pero de manera particular en los municipios serranos, se conjuntaron esfuerzos con la Unión Ganadera Regional de Sinaloa para, con carácter emergente, operar un programa de apertura de pozos y construcción de abrevaderos. Con una inversión superior a los 23 millones de pesos, se construyeron 482 abrevaderos y abrieron 131 pozos en auxilio a los productores y su ganado en todo el territorio estatal.

## 4.4 Aplicación de análisis de series hidrológicas y meteorológicas.

A manera de ejemplo se presenta a continuación la identificación para cada estación de los eventos de déficit debajo del umbral adoptado como un percentil 90% de la estación 10027 El Bledal.

### 4.4.1 Estación El Bledal

Tabla 4-3 Déficit, duración y tiempo de ocurrencia máximos para la estación 10027 El Bledal

Año	Déficit	Duración	Tiempo de ocurrencia
	$D(v)$ miles de $m^3$	$T(v)$ días	$\tau(v)$ día
1938	0	0	0
1939	0	0	0
1940	0	0	0
1941	0	0	0
1942	43.5456	77	159
1943	0	0	0
1944	0	0	0
1945	0.5184	6	178
1946	0	0	0
1947	0.0864	1	100
1948	0.2592	2	125

Año	Déficit	Duración	Tiempo de ocurrencia
	$D(v)$ miles de $m^3$	$T(v)$ días	$\tau(v)$ día
1949	0	0	0
1950	0	0	0
1951	0	0	0
1952	7.776	29	151
1953	23.4144	66	152
1954	2.2464	15	164
1955	56.6784	83	155
1956	5.4432	18	164
1957	27.8208	53	161
1958	6.912	32	142
1959	0	0	0

**Tabla 4-3 Continuación**

Año	Déficit	Duración	Tiempo de ocurrencia
	$D(v)$ miles de $m^3$	$T(v)$ días	$\tau(v)$ día
1960	0	0	0
1961	0	0	0
1962	7.344	27	113
1963	3.8016	28	124
1964	0	0	0
1965	17.5392	50	161
1966	2.16	16	145
1967	22.3776	66	152
1968	5.7024	34	147
1969	0	0	0
1970	55.4688	102	147
1971	95.3856	115	120
1972	15.3792	45	138
1973	0	0	0
1974	10.591776	32	142
1975	33.1776	16	145
1976	115.1712	67	144
1977	72.8352	89	147
1978	122.1696	126	137
1979	78.192	105	151
1980	178.7616	153	113
1981	0	0	0
1982	2.0736	11	179
1983	131.0688	75	154
1984	60.7392	79	133
1985	39.3984	19	161
1986	4.74768	66	152
1987	0	0	0
1988	5.133888	17	111
1989	63.010656	95	124
1990	40.9104	50	161
1991	12.935808	25	174
1992	0	0	0
1993	33.175872	96	128
1994	93.483072	94	124

Año	Déficit	Duración	Tiempo de ocurrencia
	$D(v)$ miles de $m^3$	$T(v)$ días	$\tau(v)$ día
<b>FUENTE: Elaboración propia usando las ecuaciones en la página 8 .</b>			

Para el caso de los déficits máximos se muestra la gráfica de tendencia y los resultados de la prueba de homogeneidad en la serie; en ellos se observa que esta serie no es homogénea, por lo que se presume que algunos cambios presentados en la cuenca en años recientes han favorecido el aumento de déficits; en otras palabras: los flujos del río están siendo mucho menores en años recientes. Para comprender mejor este fenómeno resultará útil comparar los datos de escurrimiento con los de precipitación media de la cuenca.

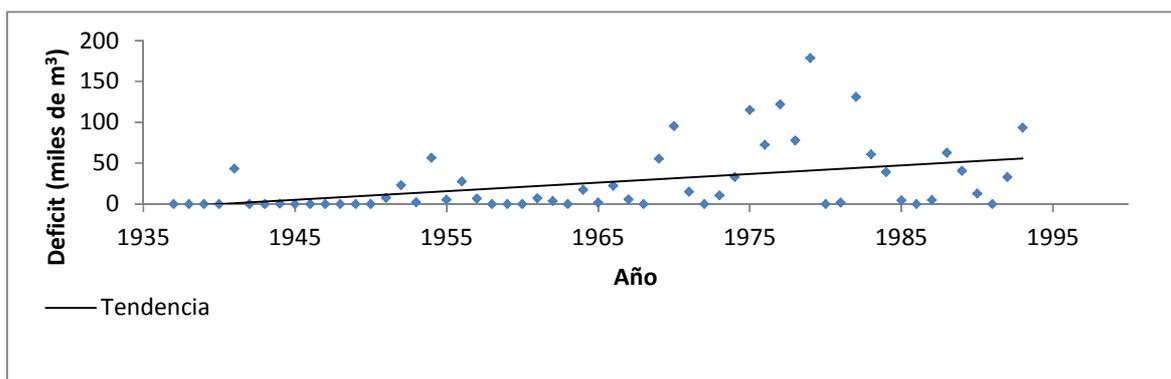


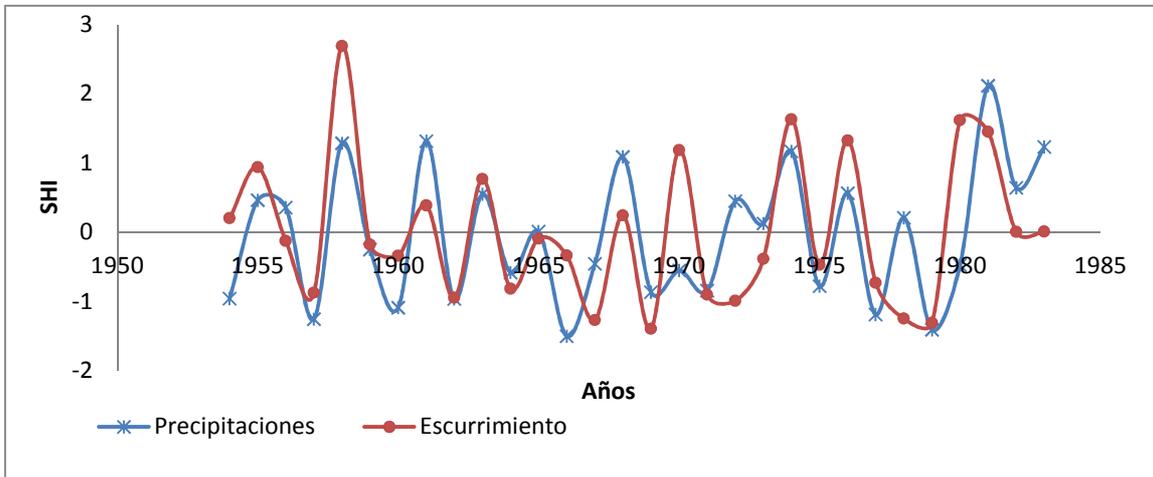
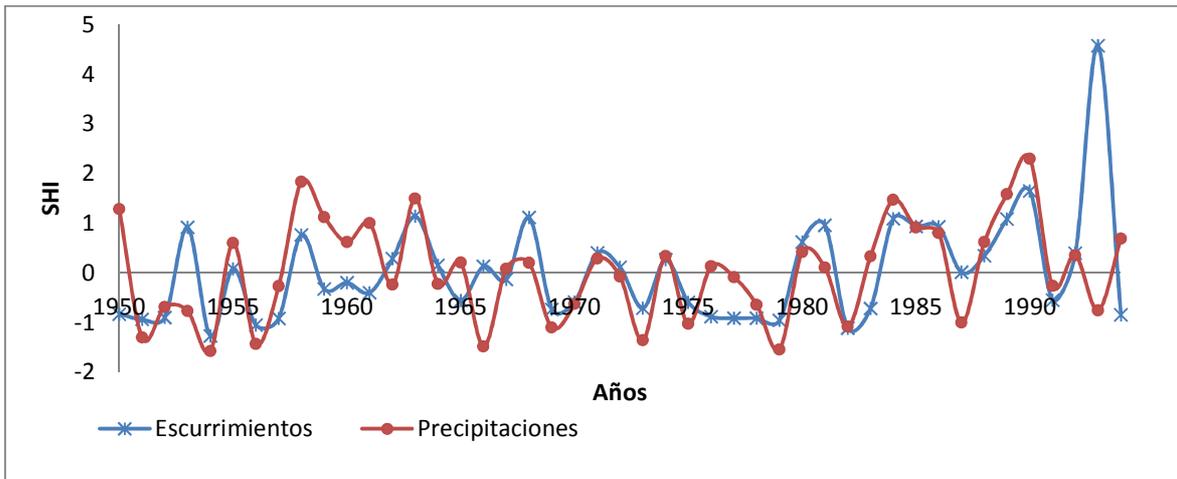
Figura 4-4 Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación 10027 El Bledal.

Tabla 4-4 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación El Bledal

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Coef de escurrimiento
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA

Los volúmenes de precipitación media de la cuenca se obtuvieron a partir de los registros de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, usando el método de polígonos de Thiessen; se buscó que las estaciones tuvieran el máximo número de años de registro y que estos coincidieran con el registro de la estación hidrométrica; en el caso de que las estaciones tuvieran un registro incompleto se empleó el método de interpolación inversa con  $\beta=2$ .

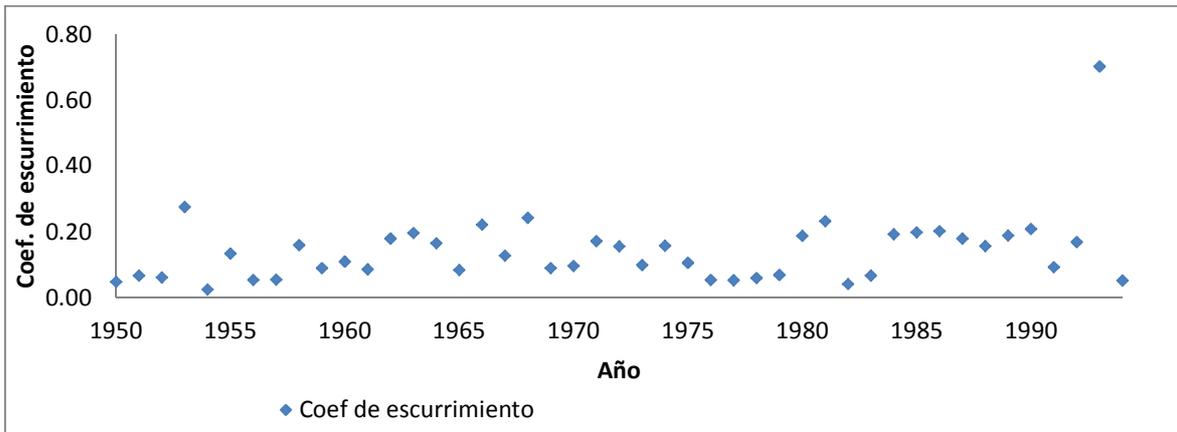
Se muestra la gráfica de comparación entre los las series estandarizadas Figura 4-5; es importante resaltar que un evento extraordinario (huracán Lidia) se presentó en el mes de septiembre de 1993; el estadístico de coeficiente de correlación entre estas dos series anuales sin tomar en cuenta los dos últimos años de registro es de 0.698 sin embargo tomando en cuenta el evento este valor cambia a 0.416 una vez presentado el evento antes mencionado.



**Figura 4-5 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10027 El Bledal.**

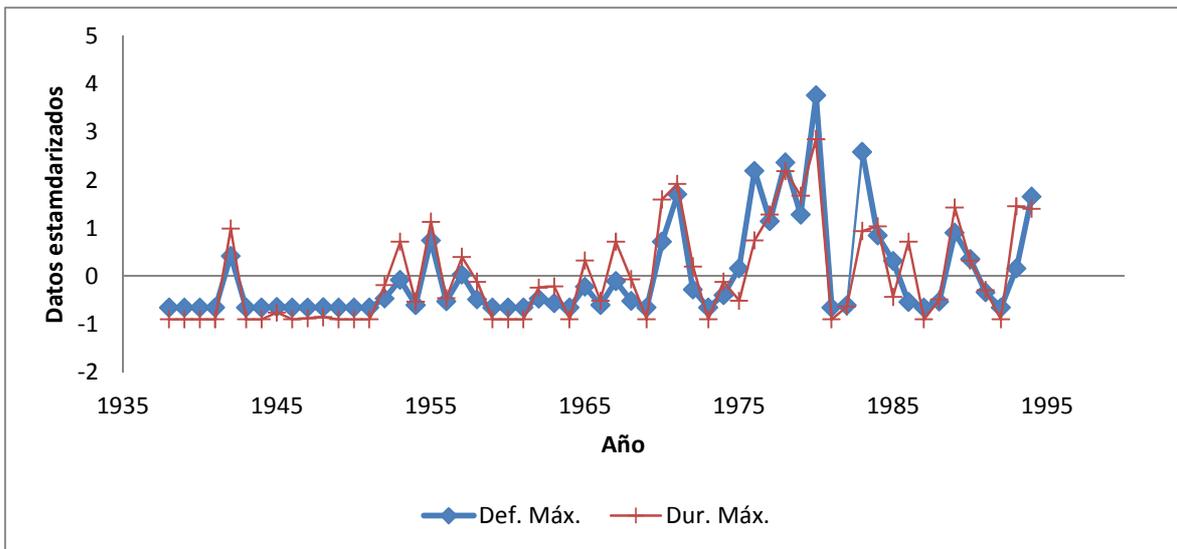
Otra forma de representar los posibles cambios históricos de impacto en la configuración de la cuenca es el coeficiente de escurrimiento, que es el cociente entre el volumen precipitado y el volumen de escurrimiento; se observa que prácticamente no existe tendencia en este parámetro antes del evento extraordinario dadas sus pruebas de Tabla 4-4.

Se observa que: históricamente no se han presentado cambios en el proceso lluvia-escurrimiento, cuando ocurren eventos ciclónicos el coeficiente de escurrimiento aumenta drásticamente, aun así, este cambio es parte de la respuesta natural de la cuenca; el aumento del déficit hídrico y su consecuente pérdida de homogeneidad que muestra una tendencia ascendente está ligado profundamente a la cantidad de precipitación observada en el mismo periodo de tiempo.



**Figura 4-6 Coeficiente de escurrimiento anual observado en la estación 10027 El Bledal.**

Por otra parte se presenta la gráfica de déficits máximos comparada con las duraciones máximas para la misma estación; los datos están estandarizados con el fin de observar la tendencia de las series a una misma escala.



**Figura 4-7 Gráfica de duraciones y déficits estandarizados de los eventos más adversos anuales.**

En la Figura 4-7 se observa una clara relación de la entre el déficit  $D(v)$  y la duración del periodo de estiaje  $T(v)$ . Este hecho hace evidente que hay una estrecha relación entre las dos series y consecuentemente se reflejará en la modelación estadística. Se procedió también a realizar el cociente entre estas dos series; la razón entre el déficit hídrico y la duración de este muestra un indicador del déficit por unidad de tiempo, este cociente se define como la “intensidad” con la que se ha presentado el déficit a través del tiempo.

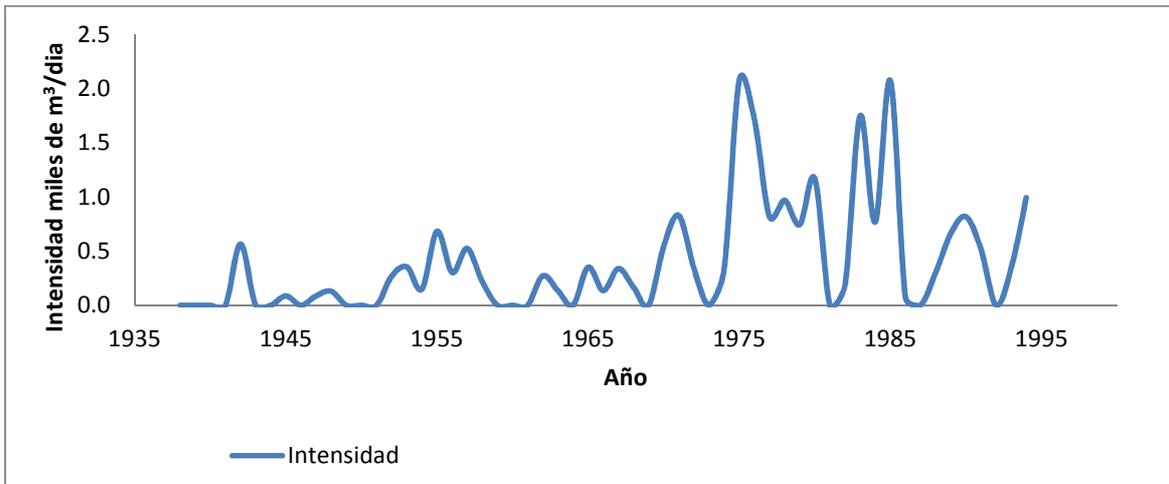


Figura 4-8 Intensidad del déficit hídrico anual.

Si se realiza el ejercicio de comparación para la serie de déficit  $D(v)$  y el tiempo de ocurrencia  $\tau(v)$  Figura 4-9 no se observa una tendencia similar a la observada en la Figura 4-7, se presentan también los coeficientes de correlación entre las 3 series de datos, donde se puede observar la pobre correlación entre el tiempo de ocurrencia y las dos series restantes este hecho sugiere que se tendrá que ser cauteloso con los resultados de la serie de tiempo de ocurrencia.

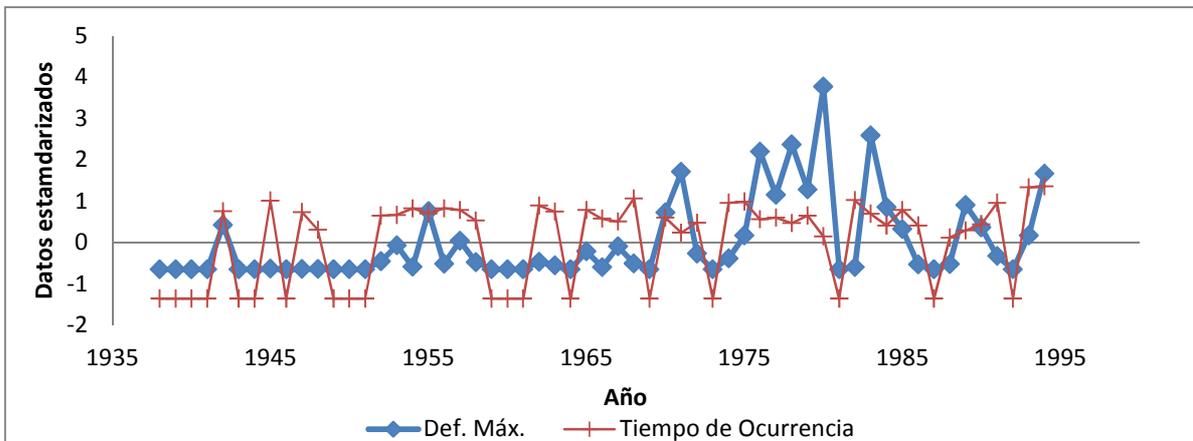


Figura 4-9 Gráfica de duraciones y tiempo de ocurrencia estandarizados de los eventos más adversos anuales.

Tabla 4-5 Coeficientes de correlación entre las series estudiadas

Coefficientes de correlación	Déficit	Duración	Tiempo de ocurrencia
Déficit	1.00	0.83	-0.28
Duración	0.83	1.00	-0.28
Tiempo de ocurrencia	-0.28	-0.28	1.00

Una vez hechos los análisis previos se realizó el análisis de frecuencias para eventos extremos de las 3 series de datos, los resultados de la modelación se presentan a continuación.

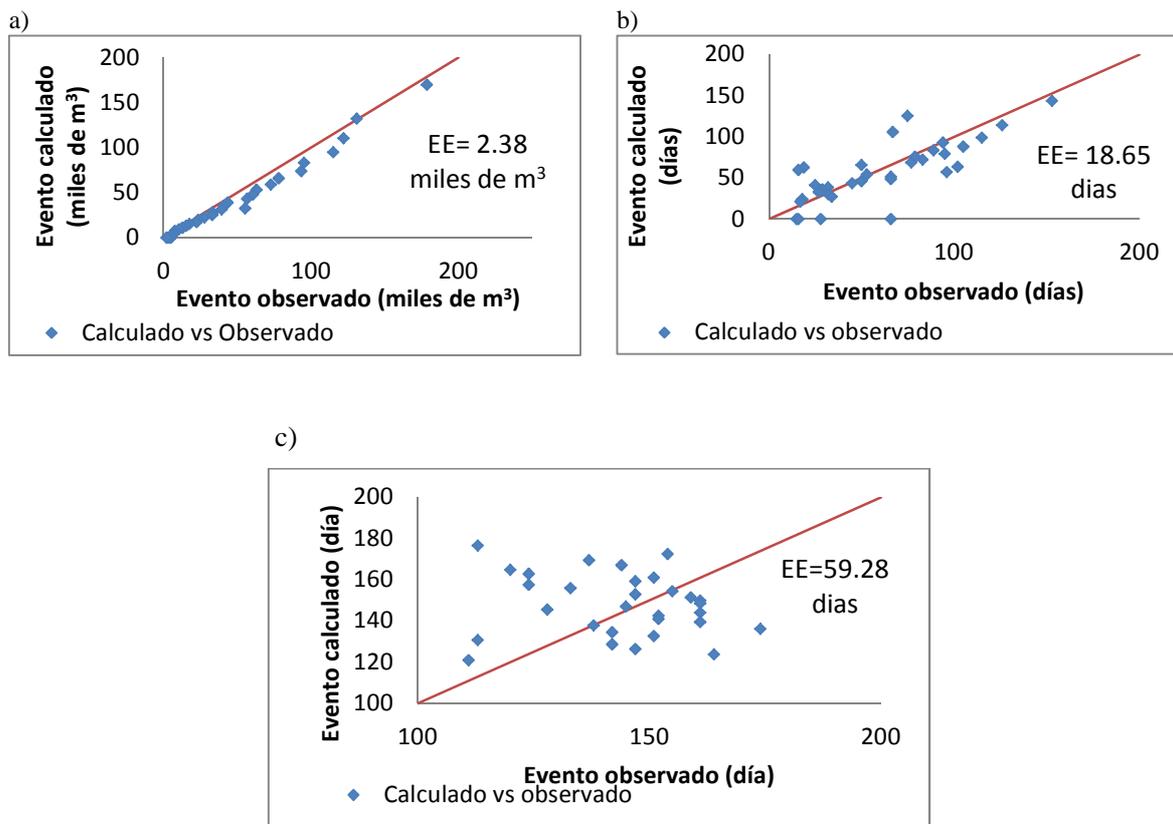
**Tabla 4-6 Series de datos observadas contrastadas con las series calculadas.**

T (Años)	Eventos observados			Eventos calculados		
	Déficit (Miles de m <sup>3</sup> )	Duración (Días)	Tiempo de ocurrencia (Día de año)	Déficit (Miles de m <sup>3</sup> )	Duración (Días)	Tiempo de ocurrencia (Día de año)
58.0	178.8	153	113	169.78	144	176
29.0	131.1	75	154	131.96	125	172
19.3	122.2	126	137	110.19	114	169
14.5	115.2	67	144	94.93	106	167
11.6	95.4	115	120	83.22	99	165
9.7	93.5	94	124	73.75	93	163
8.3	78.2	105	151	65.82	88	161
7.3	72.8	89	147	59.01	84	159
6.4	63.0	95	124	53.07	79	157
5.8	60.7	79	133	47.80	76	156
5.3	56.7	83	155	43.09	72	154
4.8	55.5	102	147	32.26	63	153
4.5	43.5	77	159	38.82	69	151
4.1	40.9	50	161	34.95	66	150
3.9	39.4	19	161	31.41	63	148
3.6	33.2	16	145	28.14	60	147
3.4	33.2	96	128	25.12	57	145
3.2	27.8	53	161	22.32	54	144
3.1	23.4	66	152	19.72	51	142
2.9	22.4	66	152	17.30	49	141
<b>Tabla 4-6 Continuación</b>						
2.5	12.9	25	174	10.93	41	136
2.4	10.6	32	142	9.08	38	134
2.3	7.8	29	151	7.35	36	133
2.2	7.3	27	113	5.73	33	131
2.1	6.9	32	142	4.21	30	129
2.1	5.7	34	147	2.80	27	126
2.0	5.4	18	164	1.49	24	124
1.9	5.1	17	111	0.30	21	121
1.9	4.7	66	152	0	0	0
1.8	3.8	28	124	0	0	0
1.8	2.2	15	164	0	0	0

T (Años)	Eventos observados			Eventos calculados		
	Déficit (Miles de m <sup>3</sup> )	Duración (Días)	Tiempo de ocurrencia (Día de año)	Déficit (Miles de m <sup>3</sup> )	Duración (Días)	Tiempo de ocurrencia (Día de año)
1.7	2.2	16	145	0	0	0
1.7	2.1	11	179	0	0	0
1.6	0.5	6	178	0	0	0
1.6	0.3	2	125	0	0	0
1.5	0.1	1	100	0	0	0
1.5	0.0	0	0	0	0	0
1.5	0.0	0	0	0	0	0
1.4	0.0	0	0	0	0	0
1.4	0.0	0	0	0	0	0
1.3	0.0	0	0	0	0	0
1.3	0.0	0	0	0	0	0
1.3	0.0	0	0	0	0	0
1.3	0.0	0	0	0	0	0
1.2	0.0	0	0	0	0	0
1.2	0.0	0	0	0	0	0
1.2	0.0	0	0	0	0	0
1.2	0.0	0	0	0	0	0
1.1	0.0	0	0	0	0	0
1.1	0.0	0	0	0	0	0
1.1	0.0	0	0	0	0	0
1.1	0.0	0	0	0	0	0
1.1	0.0	0	0	0	0	0
1.0	0.0	0	0	0	0	0
1.0	0.0	0	0	0	0	0

**Notas: El periodo de retorno T se obtuvo con la formula empírica de Weibull  $T=(N+1)/n$**

Con ayuda de la Tabla 4-6, y las gráficas de la Figura 4-10 a) y b) se conserva la tendencia de los valores observados, se muestra también el estimador de error estándar de ajuste, que fue usado como prueba de bondad de ajuste entre todas las distribuciones analizadas; para obtener la distribución que mejor se ajustara se eligió la que presentara el mínimo error. No ocurre la misma tendencia si se comparan los datos de tiempo de ocurrencia como se muestra en la Figura 4-10 c); la razón es que al unir los eventos de tiempo de ocurrencia con los periodos de retorno de su correspondiente déficit la serie no ha presentado una relación satisfactoria como ya se había descrito anteriormente.



**Figura 4-10 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series de a) Déficit y b) Duración máxima y c) Tiempo de ocurrencia**

Para finalizar con el análisis de la estación en la Tabla 4-7 se muestran los resultados de la modelación de eventos máximos con periodos de retorno de 2 a 100 años. Estos resultados podrán ayudar a establecer políticas acordes a la realidad de la cuenca en cuanto a déficit esperado y las duraciones de estos.

**Tabla 4-7 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación El Bledal.**

<b>T Años</b>	<b>Déficit Miles de m<sup>3</sup></b>	<b>Dur. Máx. Días</b>	<b>Tpo. de ocurr. Día</b>	<b>Inicio Día del año</b>	<b>Final Día del año</b>	<b>Inicio Día del año</b>	<b>Final Día del año</b>
2	2.1	26	127	115	140	23-abr	19-may
5	43.1	72	154	118	190	27-abr	08-jul
10	78.3	96	164	116	212	24-abr	29-jul
20	114.8	116	170	112	228	20-abr	15-ago
50	164.5	141	176	105	247	14-abr	02-sep
100	203.0	158	179	100	258	08-abr	14-sep

El análisis realizado para la estación hidrométrica 10027 El Bledal se reprodujo para las estaciones restantes.

## 4.4.2 Estación Huites

Los resultados de las pruebas de homogeneidad de las series de Déficit, Duración e Intensidad que se pueden observar en la Tabla 4-8 muestran que las series no son del todo homogéneas, las gráficas de la Figura 4-11 a) y b) revelan una tendencia negativa en la ocurrencia de los eventos; lo que implica que en para el caso de esta cuenca se esperan de forma global déficits menos severos que en años anteriores; lo que en realidad se refleja en estas pruebas es que los volúmenes de escurrimiento anual reportan una tendencia positiva.

Tabla 4-8 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Huites.

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA

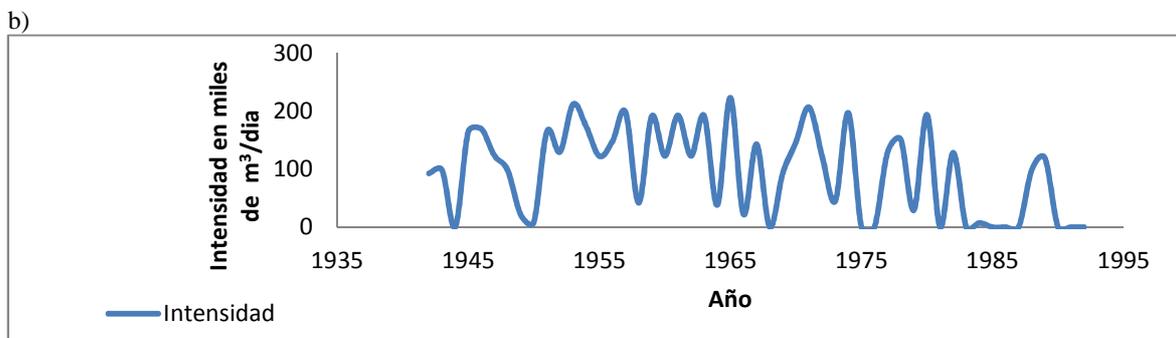
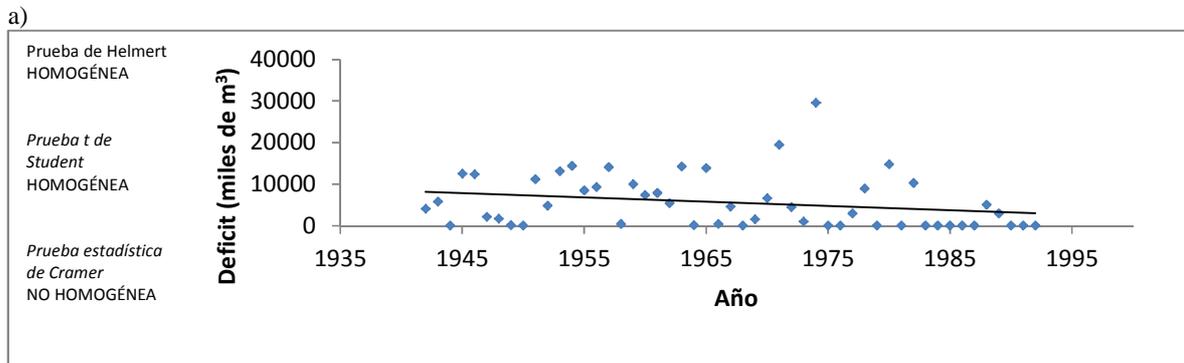
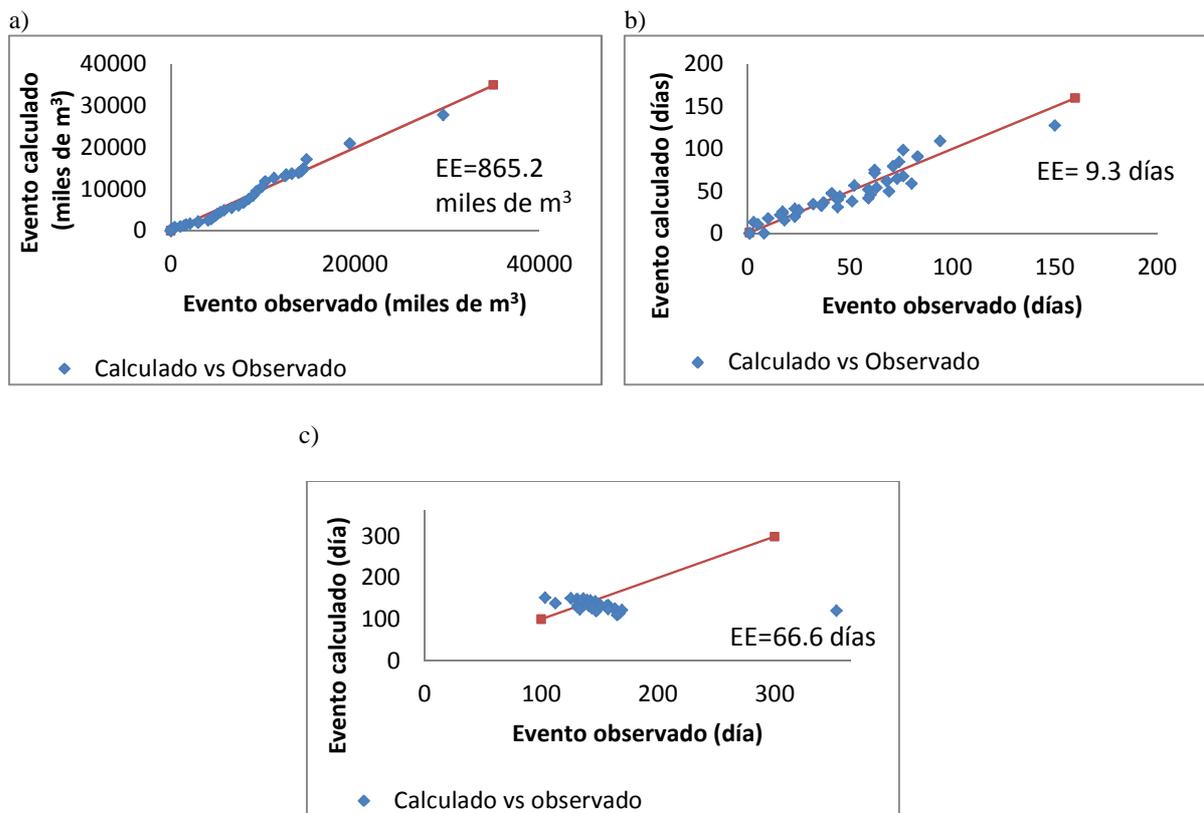


Figura 4-11 Estación 10037 Huites. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación y b) Intensidad del déficit hídrico anual.



**Figura 4-12 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.**

En la Figura 4-12 a), b) y c) se observa el resultado de la comparación entre los eventos observados y los calculados; mostrando un buen ajuste en la serie de Déficit máximo y Duración; el resultado obtenido con la modelación de los eventos de Tiempo de ocurrencia sin embargo no parece haber obtenido estimaciones satisfactorias.

Finalmente con los parámetros de las funciones de distribución con menor error estándar de ajuste obtenidos se procedió a realizar la proyección de eventos para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años cuyo resumen se muestra en la Tabla 4-9.

**Tabla 4-9 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Huites.**

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	2532.5	31	128	113	144	21-abr	22-may
5	12969.9	63	142	110	174	19-abr	21-jun
10	14439.7	83	147	106	189	14-abr	07-jul
20	18452.4	102	150	99	202	08-abr	19-jul
50	27419.5	127	152	89	216	29-mar	02-ago
100	34689.8	145	153	81	226	20-mar	12-ago

### 4.4.3 Estación Bamicori

Las pruebas de homogeneidad para las series de déficit máximo, duración e intensidad (Tabla 4-10) revelan una ligera tendencia positiva, en los últimos años se puede observar un mayor número de eventos con déficit que sobrepasan el valor de la media, Figura 4-13. Sin embargo, la pérdida de homogeneidad en la prueba de Helmert indica que existe un mayor número de secuencias que de cambios en el comportamiento por lo que se pudieran observar tanto periodos húmedos muy persistentes como periodos de déficit con la misma característica.

Tabla 4-10 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Bamicori.

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA

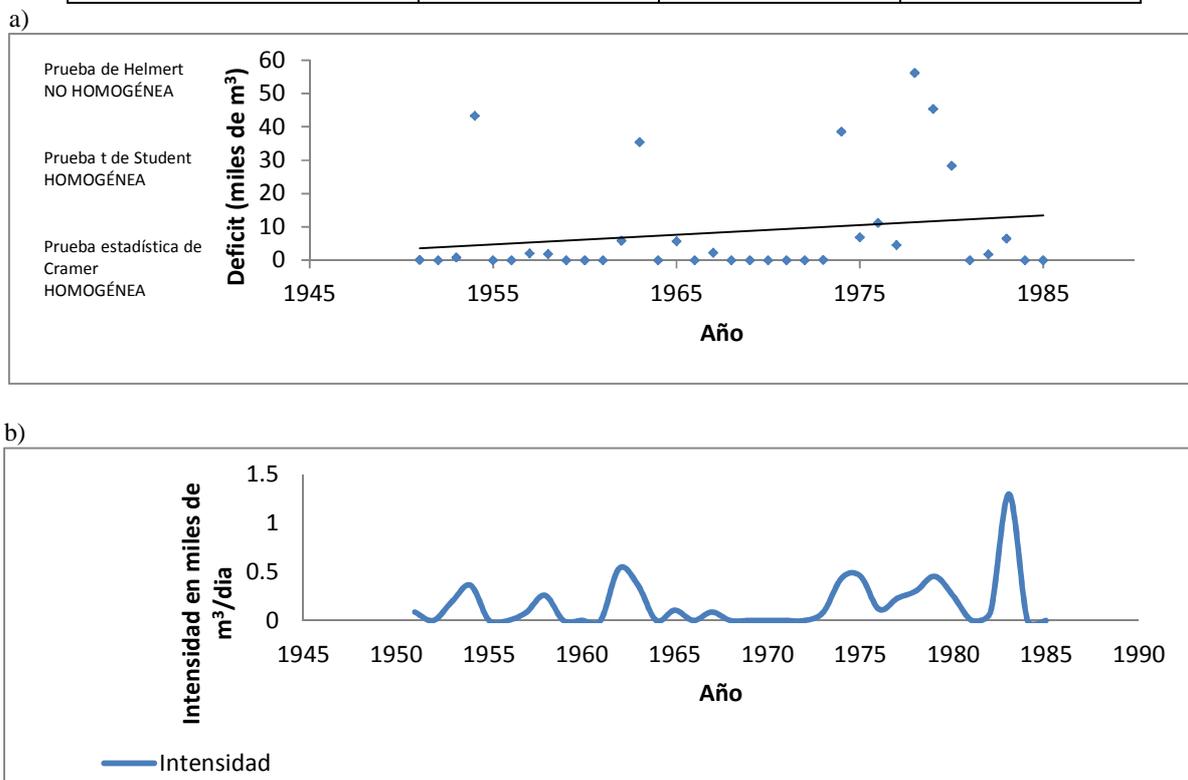
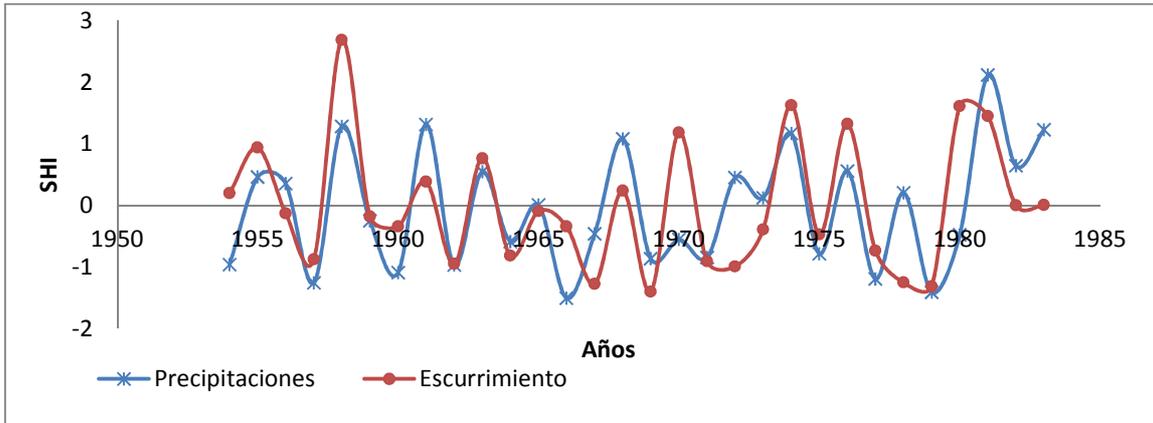


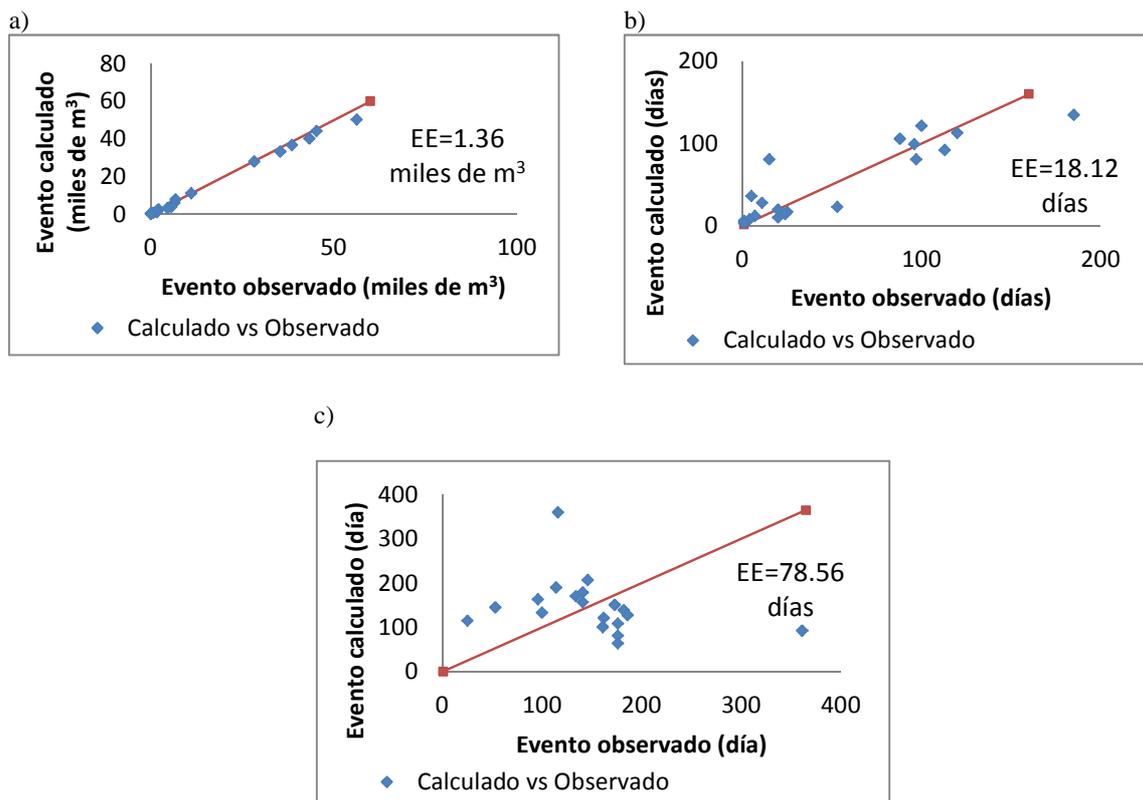
Figura 4-13 Estación 10057 Bamicori. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.

Las gráficas de la Figura 4-15 muestran diferencias entre los 3 ajustes: para el caso del déficit máximo los eventos estimados se acercan a los eventos observados, para el caso de las series de duración el modelo tiene un error estándar de ajuste de 18 días aunque siempre conservando la tendencia y para el caso del tiempo de ocurrencia los eventos estimados se alejan considerablemente con un error estándar de ajuste de 78 días.



**Figura 4-14 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10057 Bamicori.**

Por otra parte se muestra la relación entre el volumen de precipitación estandarizado y el volumen de escurrimiento estandarizado (Figura 4-14), se aprecia una relación directa entre las dos variables.



**Figura 4-15 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.**

La estimación de eventos podría ser usada hasta un periodo de retorno de 20 años, ya que las estimaciones para periodos de retorno mayores no arrojan resultados congruentes; como se muestra en

la Tabla 4-11, en periodos de retorno para los eventos de 50 y 100 años la modelación probabilística sugiere un evento que comienza en un año y termina en el siguiente; asociando los mayores eventos de déficit a estas fechas.

**Tabla 4-11 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Bamicori.**

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	0.5	3	82	80	83	20-mar	23-mar
5	10.3	74	156	120	193	28-abr	11-jul
10	38.2	108	184	130	238	08-may	25-ago
20	45.3	124	214	152	275	30-may	01-oct
50	53.0	141	361	290	431	16-oct	06-mar
100	58.6	153	361	285	438	10-oct	12-mar

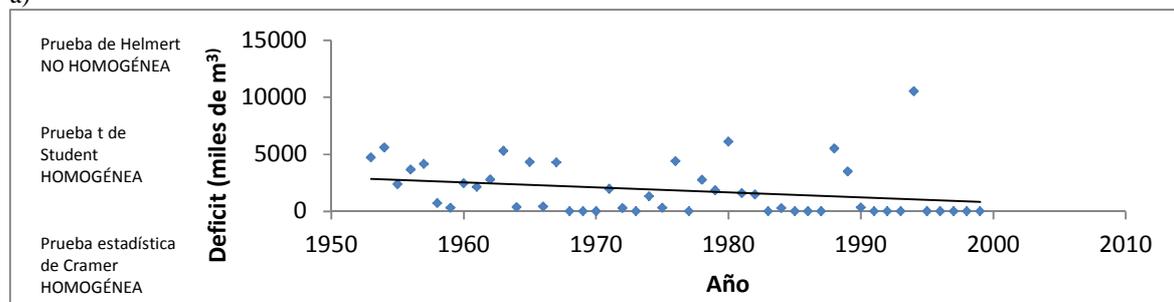
#### 4.4.4 Estación Ixpalino

La serie de datos de déficit máximo e intensidad existe una tendencia a la baja dado que en los últimos años de la muestra no se registraron eventos de déficit (Figura 4-16); sin embargo; la serie de duración conserva la homogeneidad en las tres pruebas realizadas (Tabla 4-12).

**Tabla 4-12 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Ixpalino.**

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA

a)



**Figura 4-16 a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación.**

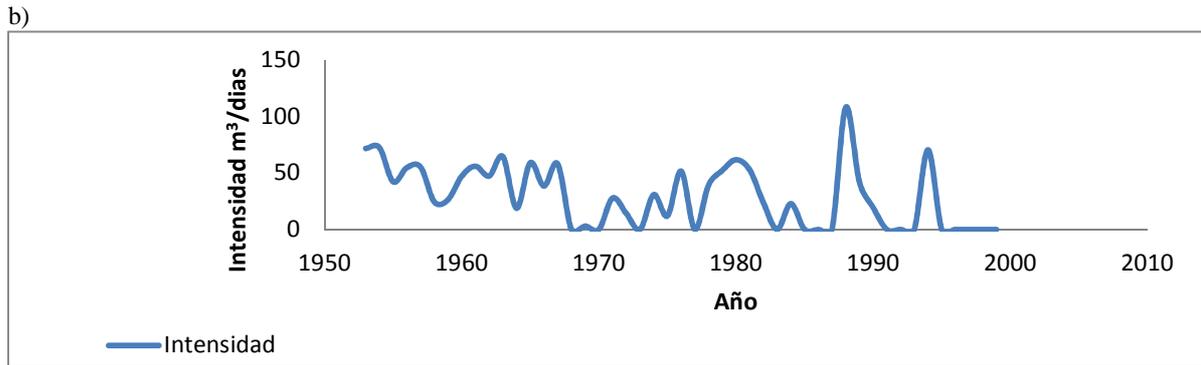


Figura 4-16 Estación 10065 Ixpalino. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.

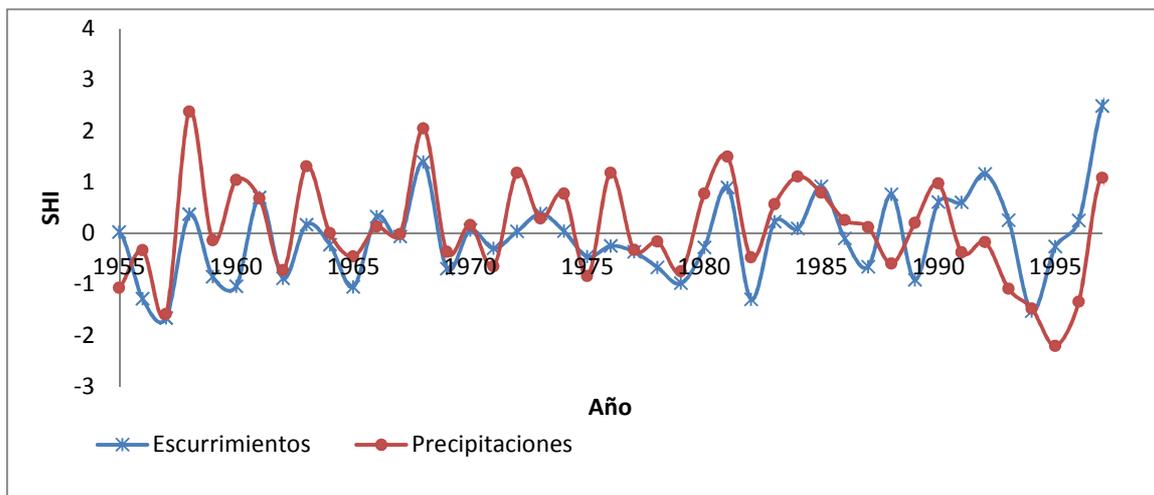


Figura 4-17 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10065 Ixpalino.

Como dato adicional en la Figura 4-17 se muestra el resultado de la obtención de la precipitación media de la cuenca estandarizada comparada con el escurrimiento anual estandarizado en el que se muestra una relación directa entre las dos variables.

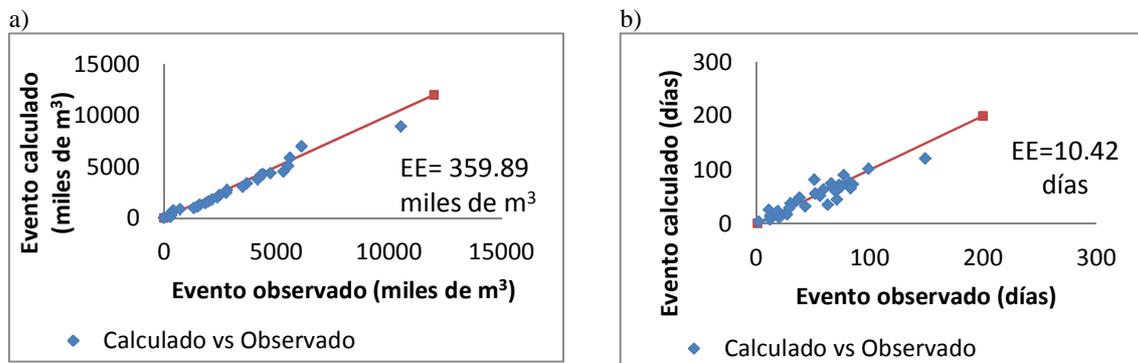


Figura 4-18 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx. y b) Duración.

c)

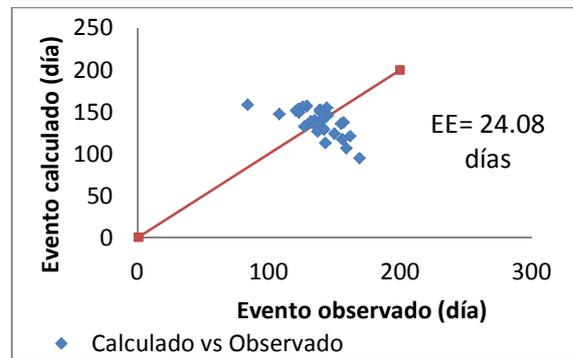


Figura 4-18 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

Los resultados de ajuste de los modelos que se pueden observar en la Figura 4-18 revelan que las variables de Déficit máximo y Duración presenta un ajuste aceptable, no se presenta el mismo caso con la variable Tiempo de ocurrencia. A falta de mejores estimaciones y a reserva de que se requiere un mayor estudio sobre el fenómeno se procedió a realizar la proyección de eventos los cuales se observan en la Tabla 4-13

Tabla 4-13 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Ixpalino.

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	758.8	27	129	116	142	24-abr	21-may
5	3958.4	70	149	114	184	23-abr	02-jul
10	4628.1	78	154	116	193	24-abr	11-jul
20	6493.6	97	157	108	206	17-abr	23-jul
50	9054.2	122	159	98	220	06-abr	07-ago
100	11015.4	140	160	90	230	30-mar	16-ago

#### 4.4.5 Estación Choix

A pesar de que se registre una tendencia negativa en los últimos años, en lo general se preserva la homogeneidad en esta estación (Tabla 4-14).

Tabla 4-14 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Choix.

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA

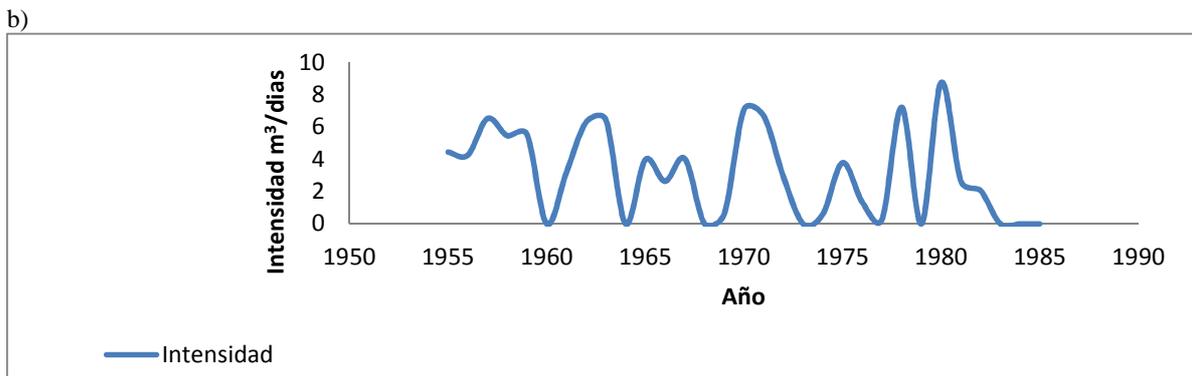
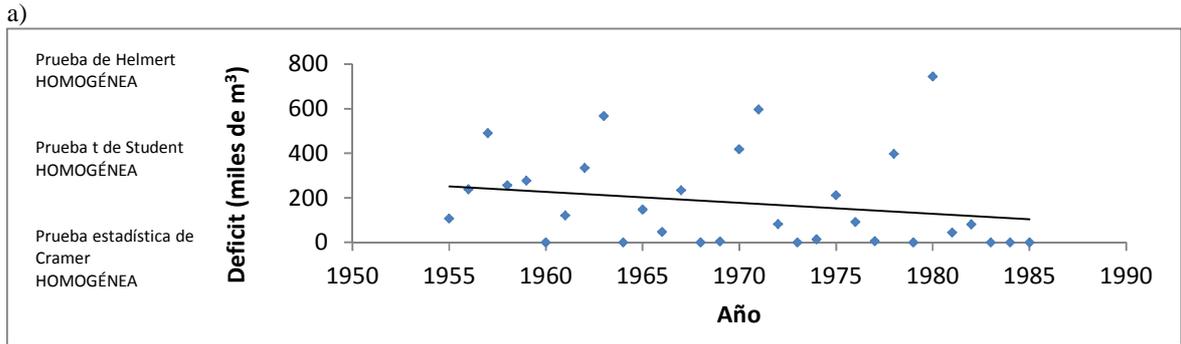


Figura 4-19 Estación 10066 Choix. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.

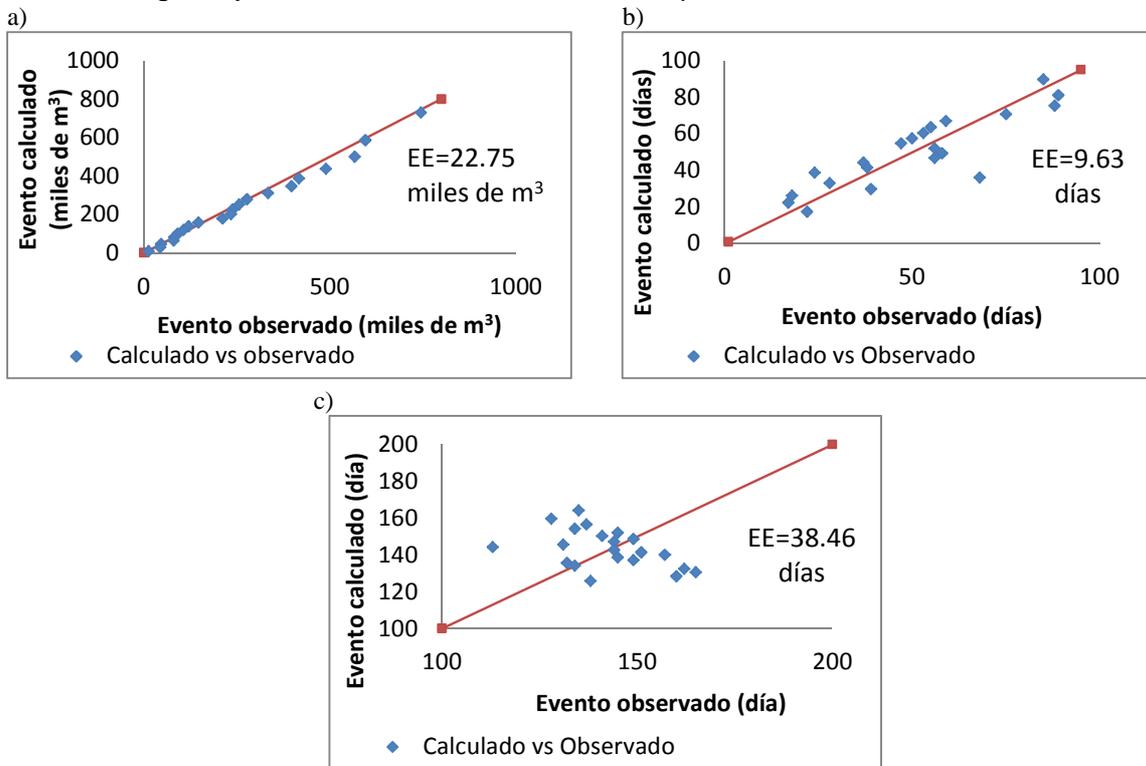


Figura 4-20 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

**Tabla 4-15 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Choix.**

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	100.5	36.1	135.7	118	154	26-abr	01-jun
5	332.2	62.4	149.6	118	181	27-abr	28-jun
10	486.2	74.4	156.1	119	193	27-abr	11-jul
20	633.0	84.1	161.2	119	203	28-abr	21-jul
50	820.5	94.7	166.8	119	214	28-abr	01-ago
100	959.1	101.7	170.5	120	221	28-abr	08-ago

El comportamiento de los ajustes mostrado en la Figura 4-20 revela que no existe relación directa para que sea factible modelar las tres variables de manera conjunta dado que la variable Tiempo de ocurrencia no preserva la tendencia marcada en primera instancia por la variable de Déficit máximo; sin embargo es necesario usar los datos obtenidos de la proyección para poder pronosticar los eventos de diseño (Tabla 4-15), aunque se hace énfasis en que los resultados del análisis presentan cierto grado de incertidumbre.

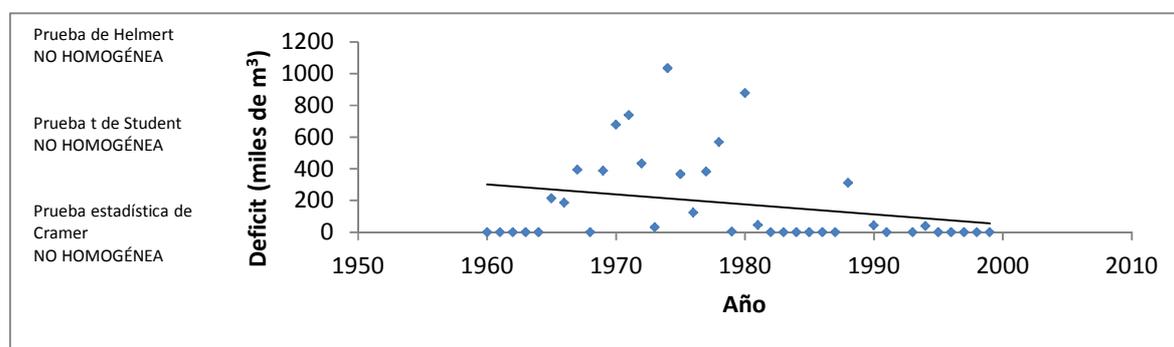
#### 4.4.6 Estación Badiraguato

Se observa en la Figura 4-21 que el número de déficits ha disminuido considerablemente, lo que implica un aumento gradual y constante en el volumen de escurrimiento de la estación; este hecho se observa en el registro de escurrimientos oficial del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. De los resultados del análisis de homogeneidad en esta estación (Tabla 4-16) se recomienda que al interpretar los resultados del análisis de frecuencias se tome en cuenta que el volumen de escurrimiento anual para esta estación está aumentando.

**Tabla 4-16 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Badiraguato.**

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA

a)



**Figura 4-21 Estación 10079 Badiraguato. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación.**

b)

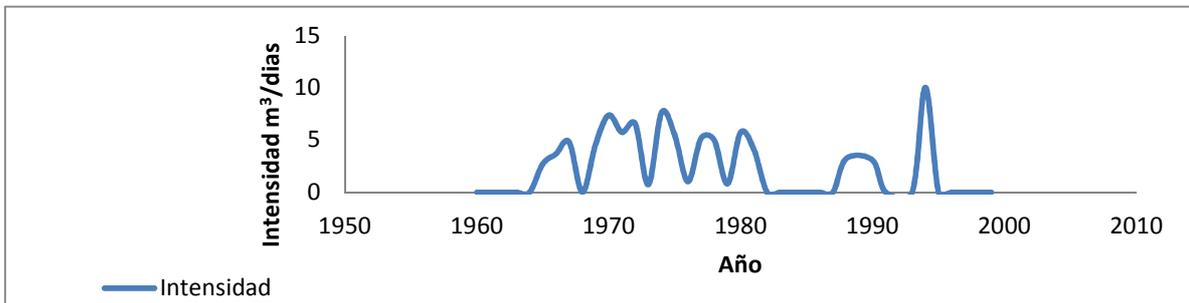
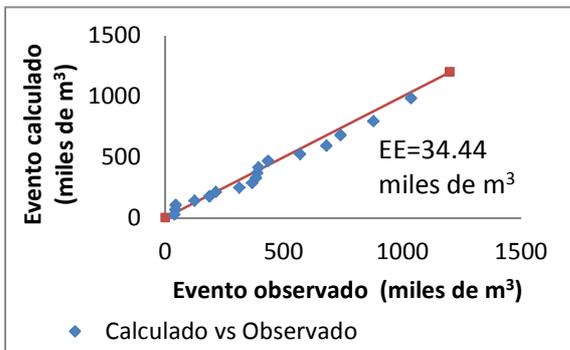
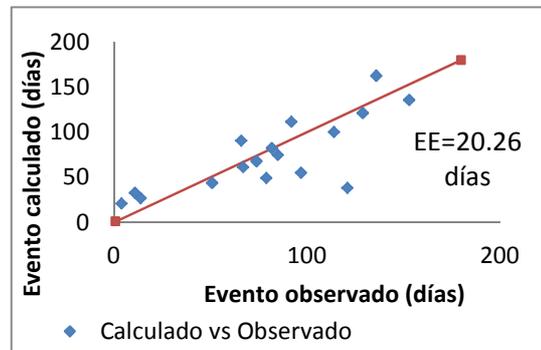


Figura 4-21 Estación 10079 Badiraguato. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.

a)



b)



c)

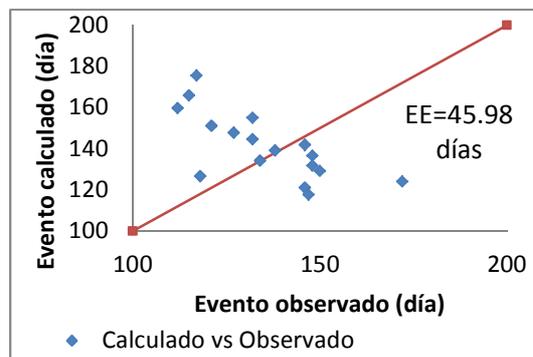


Figura 4-22 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

**Tabla 4-17 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Badiraguato.**

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
5	378.4	76	142	104	181	13-abr	28-jun
10	602.9	113	155	99	212	08-abr	29-jul
20	803.9	137	166	98	235	06-abr	21-ago
50	1051.0	172	179	93	265	02-abr	20-sep
100	1229.3	196	188	90	286	29-mar	11-oct

Los resultados de la modelación de eventos de diseño observados en la Tabla 4-17 no muestran algún ajuste para un periodo de 2 años; este hecho es a causa de que esta estación no se presentan déficits considerables dentro de este periodo, sin embargo este dato podría ser engañoso dada la falta de homogeneidad en las series.

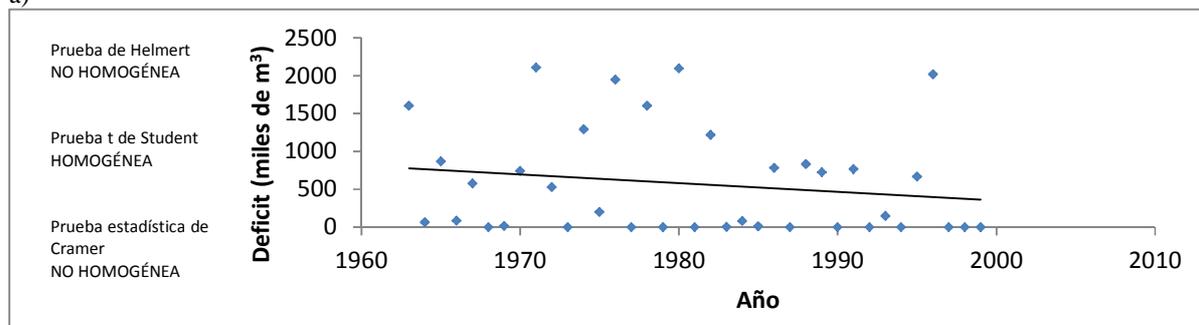
#### 4.4.7 Estación Tamazula

Las pruebas de homogeneidad para las series revelan que las series son homogéneas a pesar de que exista una ligera tendencia negativa en ellas (Figura 4-23 y Tabla 4-18).

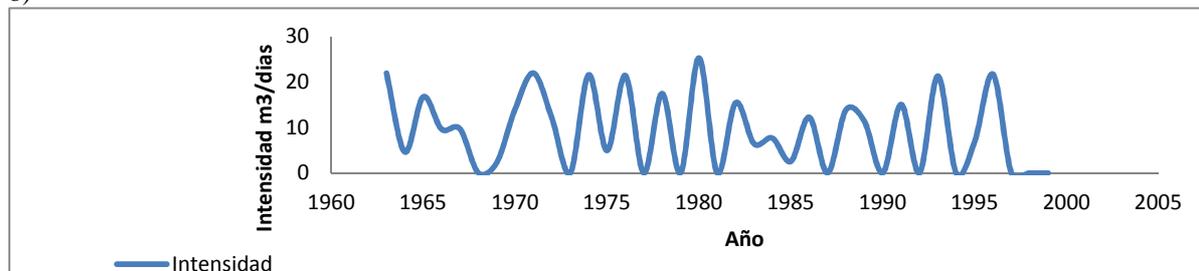
**Tabla 4-18 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Tamazula.**

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA

a)



b)



**Figura 4-23 Estación 10087 Tamazula. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.**

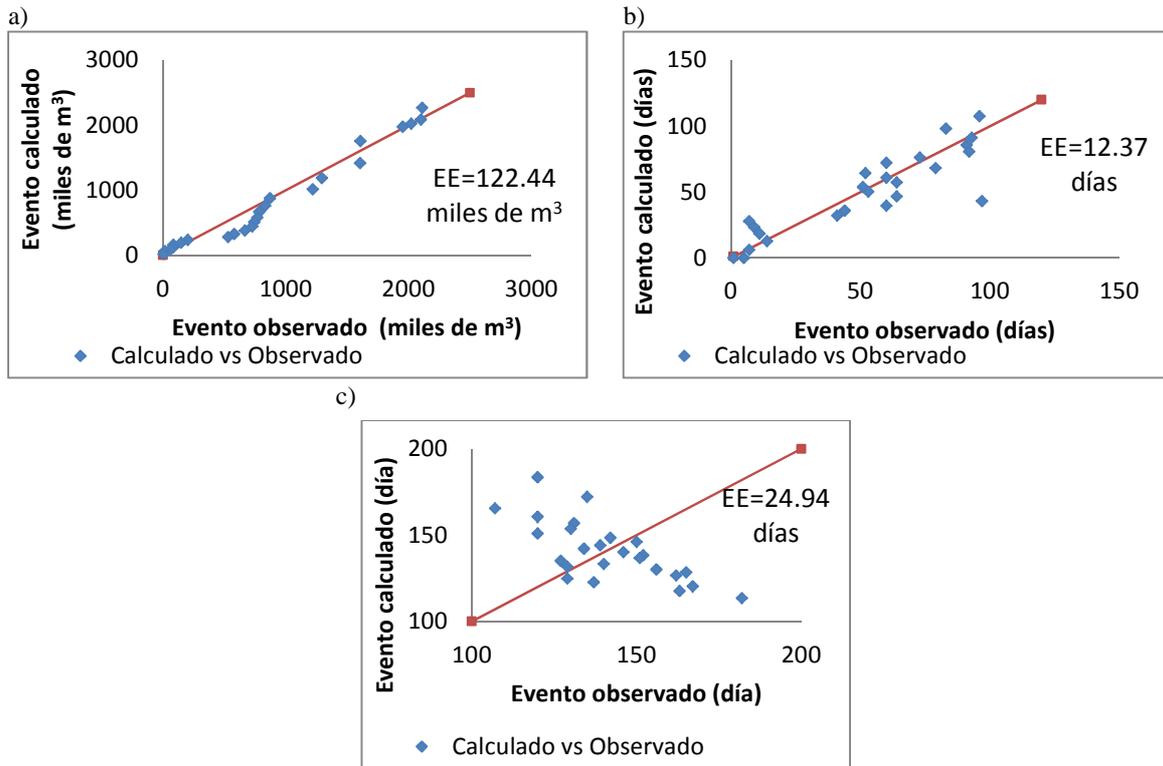


Figura 4-24 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

Los resultados de la modelación muestran que no se encuentra relación directa entre la variable de Tiempo de ocurrencia y las de Déficit máximo y Duración máxima. (Figura 4-24).

Tabla 4-19 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Tamazula.

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	196.7	28	128	115	142	23-abr	21-may
5	1078.8	70	149	115	184	23-abr	02-jul
10	1989.2	87	162	118	205	27-abr	23-jul
20	2093.7	99	173	124	223	02-may	09-ago
50	2455.4	111	188	133	243	11-may	30-ago
100	3022.9	117	199	140	258	19-may	13-sep

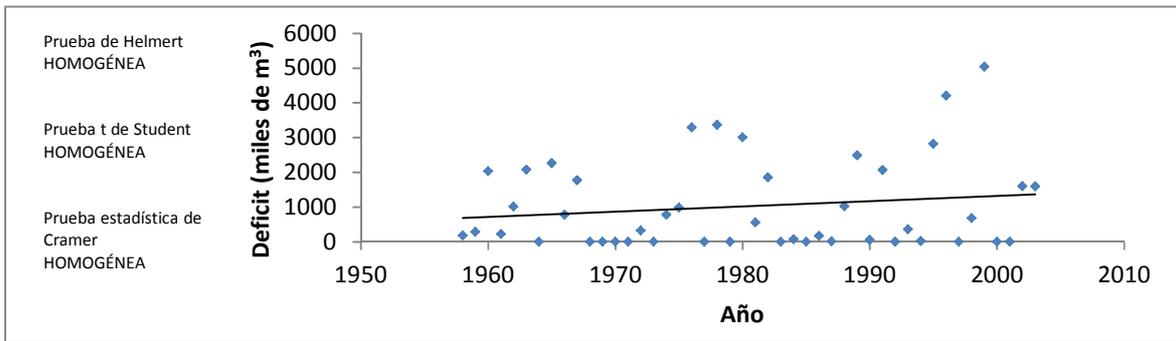
#### 4.4.8 Estación Piaxtla

Aunque existe una ligera tendencia positiva (Figura 4-25), las series de esta estación conservan su homogeneidad (Tabla 4-20).

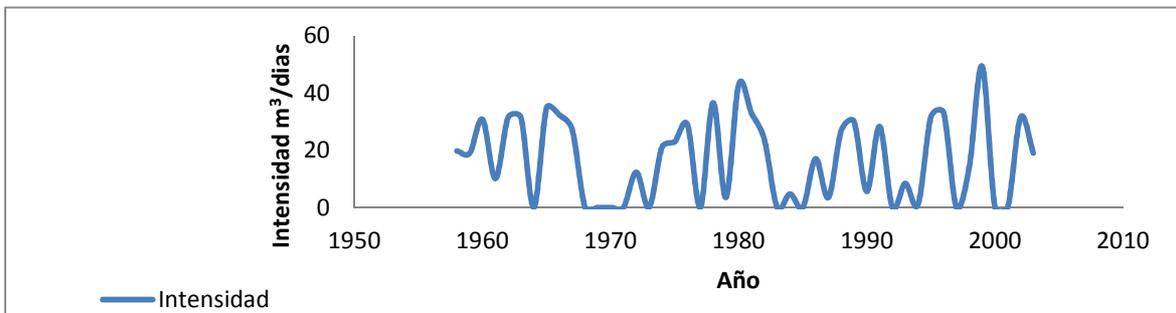
Tabla 4-20 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Piaxtla.

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA

a)

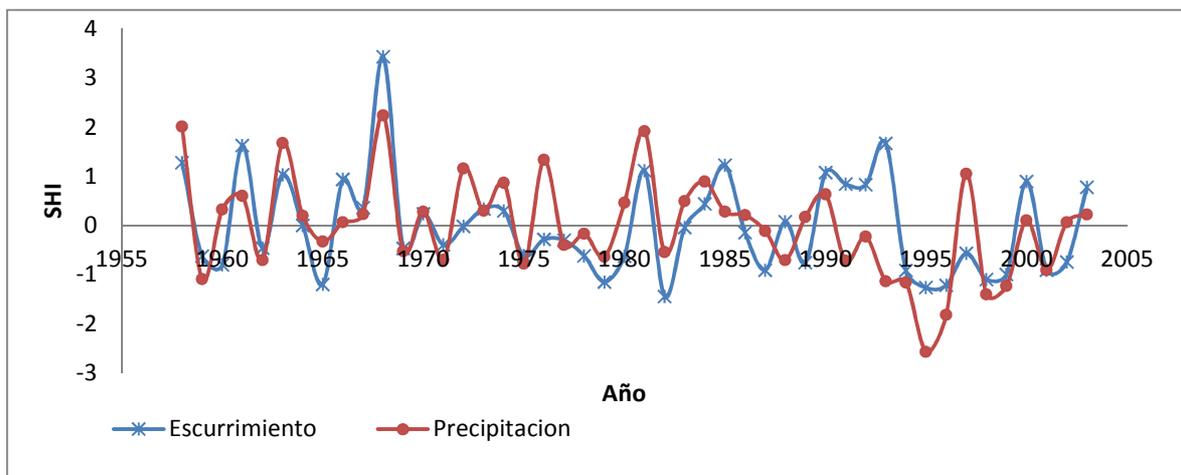


b)



**Figura 4-25 Estación 10111 Piaxtla. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.**

Se muestra también en la Figura 4-26 se muestra el resultado de la obtención de la precipitación media de la cuenca estandarizada comparada con el escurrimiento anual estandarizado en el que se muestra una relación directa entre las dos variables.



**Figura 4-26 Representación gráfica de los volúmenes estandarizados de lluvia y escurrimiento en la estación 10111 Piaxtla.**

Como se muestra en los análisis anteriores la serie de esta estación se mantiene homogénea y su correspondencia entre precipitación y escurrimiento refleja un mismo comportamiento.

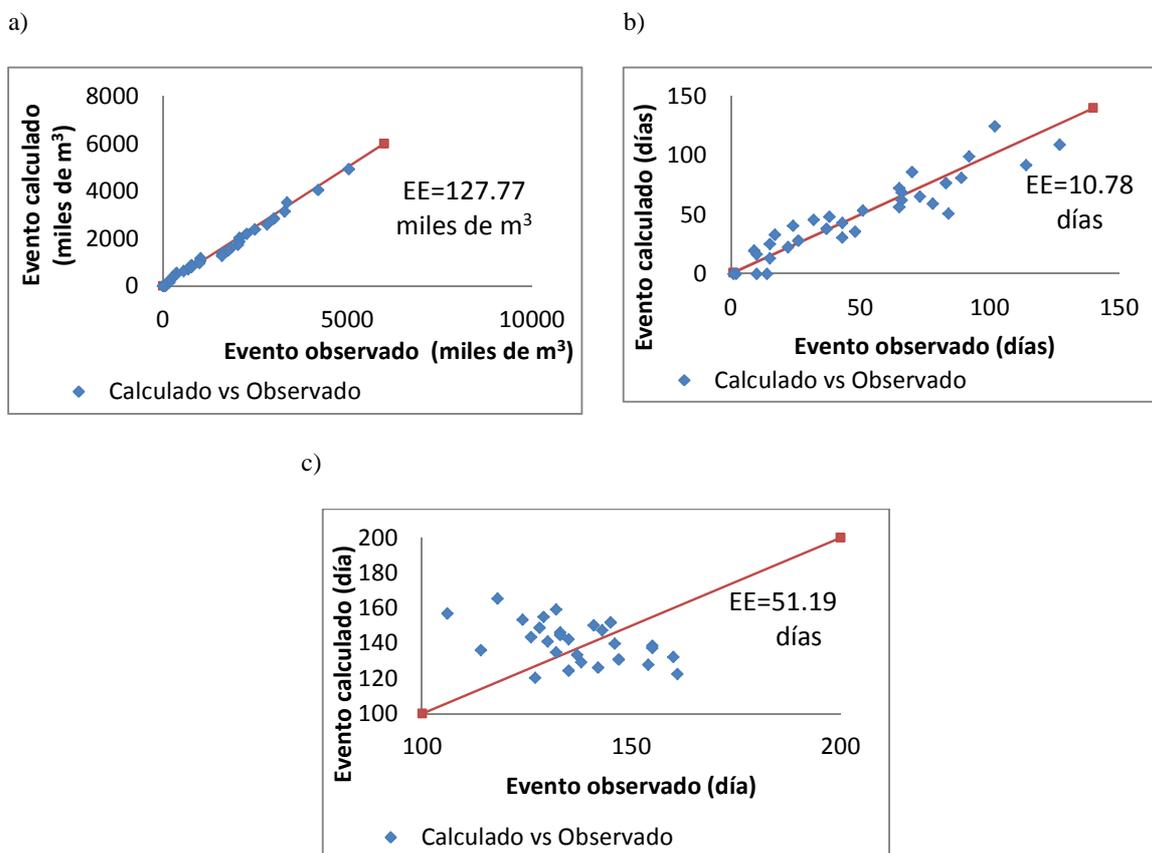


Figura 4-27 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

Tabla 4-21 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Piaxtla.

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	506.4	29	130	115	145	24-abr	23-may
5	1967.8	67	148	115	182	23-abr	29-jun
10	2928.7	88	156	112	199	20-abr	17-jul
20	3841.0	105	161	108	213	17-abr	31-jul
50	5003.9	126	166	103	229	11-abr	15-ago
100	5862.3	140	168	98	239	07-abr	25-ago

#### 4.4.9 Estación Guatenipa II

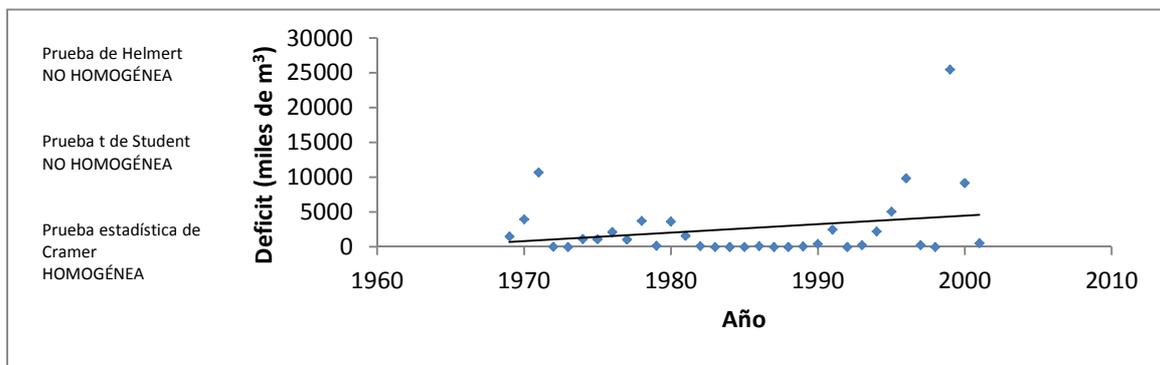
Aunque en la serie de Déficit máximos existan valores relativamente más grandes a la media del registro histórico este incremento no se ve reflejado en las series de duración e intensidad Figura 4-28; en este caso la serie de Duración ejerce una influencia que compensa la tendencia de aumento de

déficit máximo; es decir, aunque el volumen de déficit sea mayor el volumen de déficit por cada día (Intensidad) apenas comienza a mostrar muestras de pérdida de homogeneidad en los últimos años de registro de la serie (Tabla 4-22).

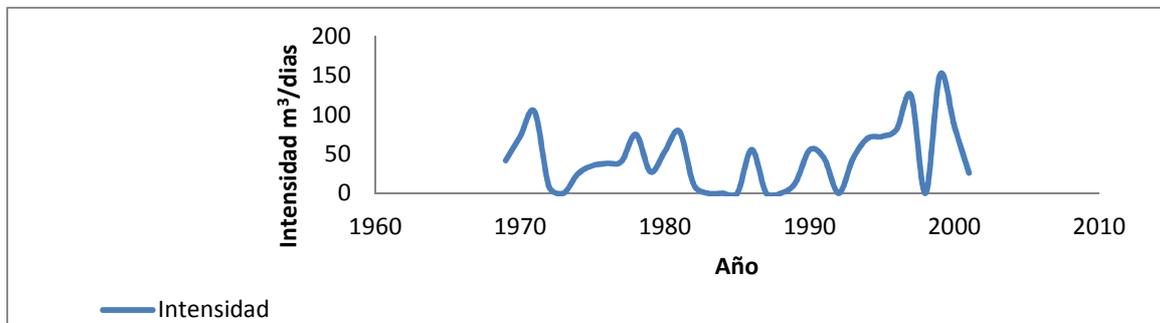
**Tabla 4-22 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Guatenipa II.**

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA

a)



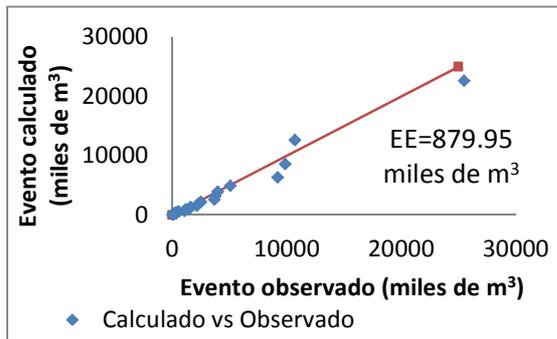
b)



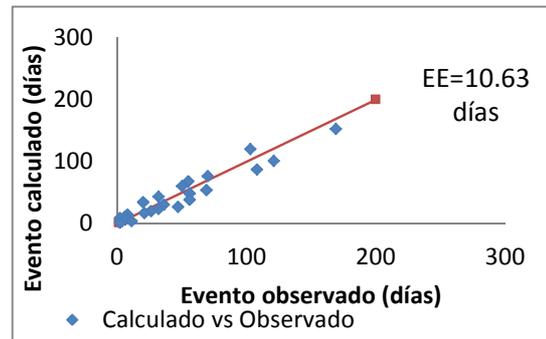
**Figura 4-28 Estación 10112 Guatenipa II. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.**

Los resultados de la modelación repiten el cambio de tendencia en la serie de tiempo de ocurrencia (Figura 4-29).

a)



b)



c)

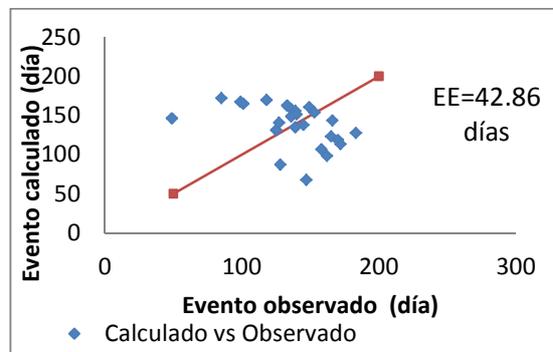


Figura 4-29 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

Tabla 4-23 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Guatenipa II.

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	568.3	17	131	123	140	02-may	18-may
5	3319.3	62	159	128	190	07-may	07-jul
10	7561.3	95	166	119	214	28-abr	31-jul
20	14626.8	128	171	107	234	15-abr	21-ago
50	30336.6	171	173	88	259	27-mar	14-sep
100	49079.2	203	174	73	276	12-mar	02-oct

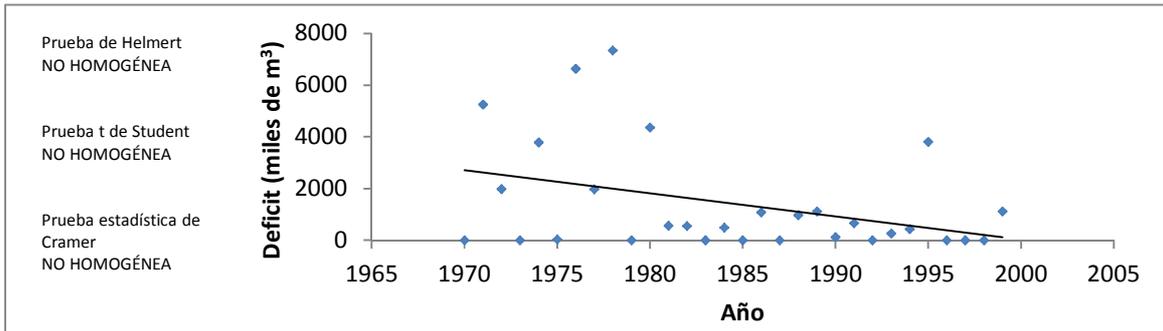
#### 4.4.10 Estación La Huerta

En este caso la estación muestra una tendencia negativa en la serie de déficits máximos (Figura 4-30), sin embargo, la serie de duraciones es homogénea según las tres pruebas realizadas (Tabla 4-24); en lo que respecta a la serie de intensidad esta también tiene tendencia negativa; como ya se había analizado un caso similar en estaciones anteriores es convincente intuir un aumento en el volumen de escurrimiento en la estación.

Tabla 4-24 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación La Huerta.

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmer	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	NO HOMOGÉNEA

a)



b)

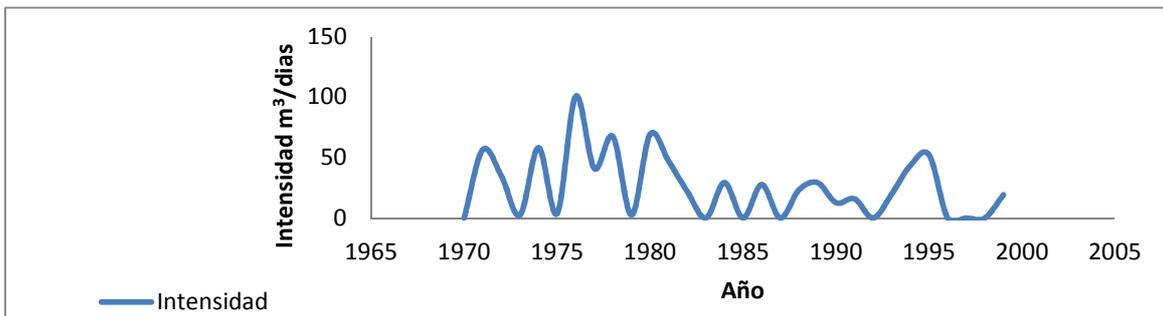
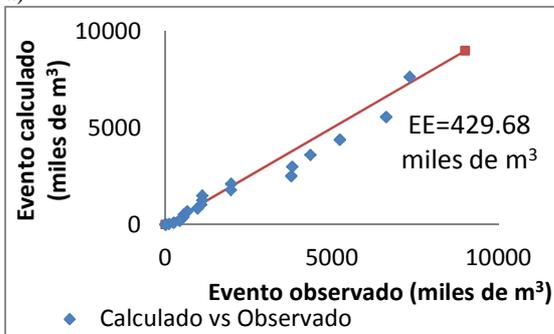


Figura 4-30 Estación 10113 La Huerta. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual.

a)



b)

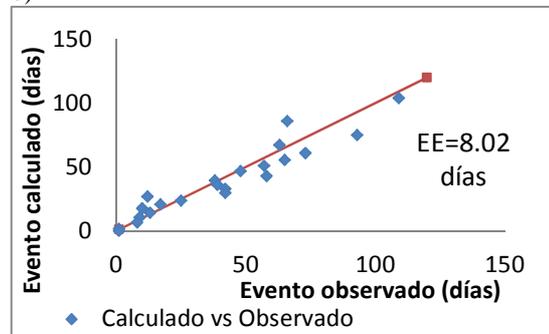


Figura 4-31 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx. y b) Duración (Días).

c)

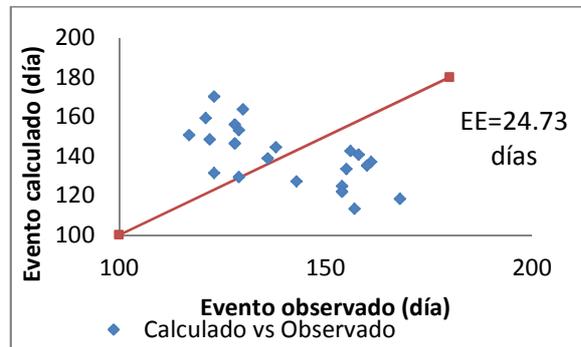


Figura 4-31 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx. (b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

Tabla 4-25 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación La Huerta.

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	342.3	22	131	120	143	29-abr	21-may
5	2428.4	55	149	121	176	30-abr	23-jun
10	4311.3	74	156	119	193	28-abr	11-jul
20	6321.3	93	162	115	208	24-abr	25-jul
50	9133.5	116	166	108	224	17-abr	11-ago
100	11415.1	134	168	102	235	10-abr	22-ago

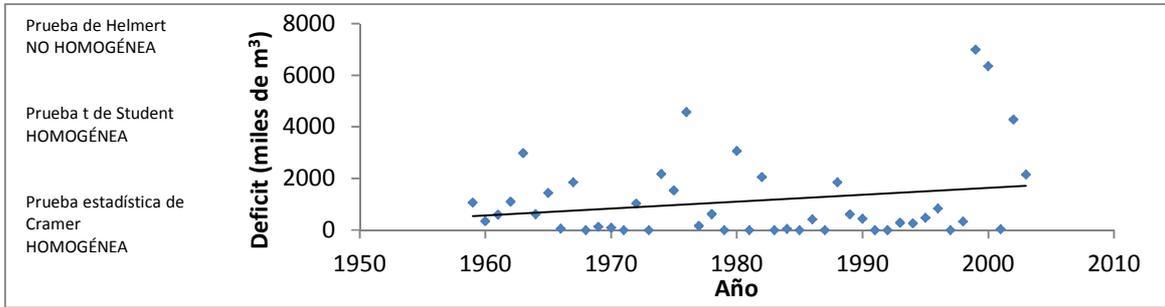
#### 4.4.11 Estación Tecusiapa

Los resultados de las pruebas muestran que a pesar de que en los últimos años ha aumentado la magnitud de los eventos de déficit máximo (Figura 4-32) aún se pueden considerar todas las series como homogéneas (Tabla 4-26).

Tabla 4-26 Resultados de la pruebas de homogeneidad para la estación Tecusiapa.

Pruebas de homogeneidad	Resultado de la prueba		
	Déficit	Duración	Intensidad
Prueba de Helmert	NO HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba t de Student	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba estadística de Cramer	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA

a)



b)

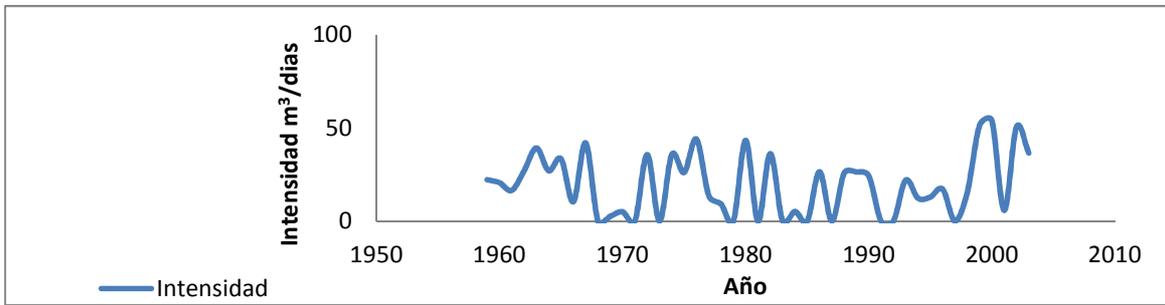
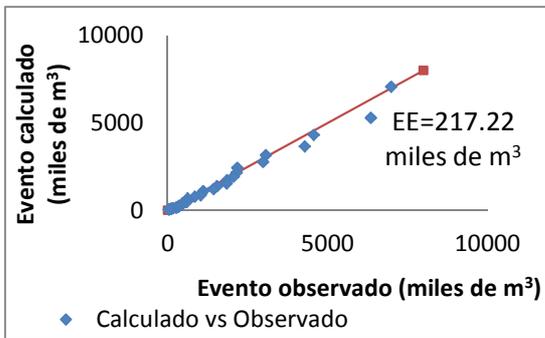


Figura 4-32 Estación 10137 Tecusiapa. a) Gráfica de la evolución de los mayores déficits presentados en cada año de registro para un umbral de 90% en la estación, b) Intensidad del déficit hídrico anual,

a)



b)

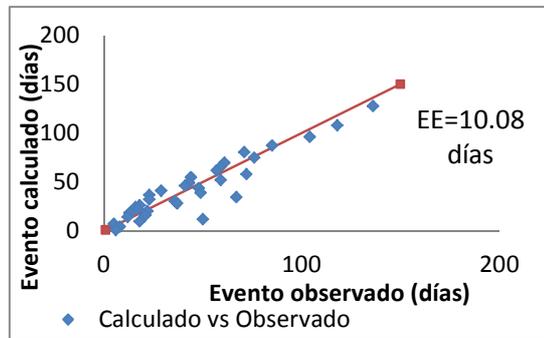


Figura 4-33 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx. y b) Duración.

c)

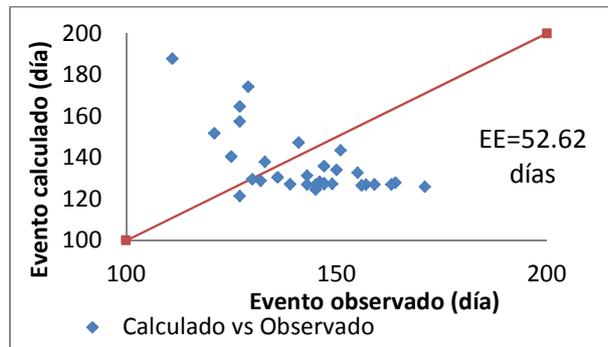


Figura 4-33 Comparación gráfica entre los datos observados y los calculados de las series a) Déficit máx., b) Duración y c) Tiempo de ocurrencia.

Tabla 4-27 Resultados de la modelación de análisis de frecuencias para la estación Tecusiapa.

T Años	Déficit Miles de m <sup>3</sup>	Dur. Máx. Días	Tpo. de ocurr. Día	Inicio Día del año	Final Día del año	Inicio Día del año	Final Día del año
2	357.2	26	127	114	140	23-abr	19-may
5	1886.6	61	143	112	174	21-abr	21-jun
10	3345.9	83	168	126	210	05-may	27-jul
20	4948.9	104	201	149	253	28-may	09-sep
50	7291.3	130	255	190	320	07-jul	14-nov
100	9377.1	149	301	226	376	13-ago	09-ene

#### 4.4.12 Resumen de los resultados observados

Como puede observarse las pruebas de homogeneidad revelan una tendencia particular para cada estación, al contar con los datos puntuales de intensidad es posible ubicarlos espacialmente de manera esquemática con el fin de encontrar zonas donde la intensidad por cada metro cuadrado es mayor; esto se logra dividiendo la intensidad media de la cuenca entre el área de la misma. Al trazar isoclinas que unan los puntos similares se observa una región que comprende las estaciones: Guatenipa II y Tecusiapa, en donde la intensidad de los déficits es mayor; si a esta información se le anexa una escala de tendencia hacia el posible aumento o decremento de las series se observa que la misma zona presenta pendientes positivas que indican que estas estaciones presentan una tendencia positiva (Figura 4-34).

Otro aspecto que es importante resaltar es el deficiente ajuste que se presenta en la serie tiempo de ocurrencia en todas las estaciones y que a pesar de que existe un ajuste en las series de Déficit máximo y duración en general la calidad de las proyecciones decremanta, ya que, si bien es posible modelar los eventos de déficit y su duración no es posible estimar con la misma certeza la fecha de inicio y termino de la misma.

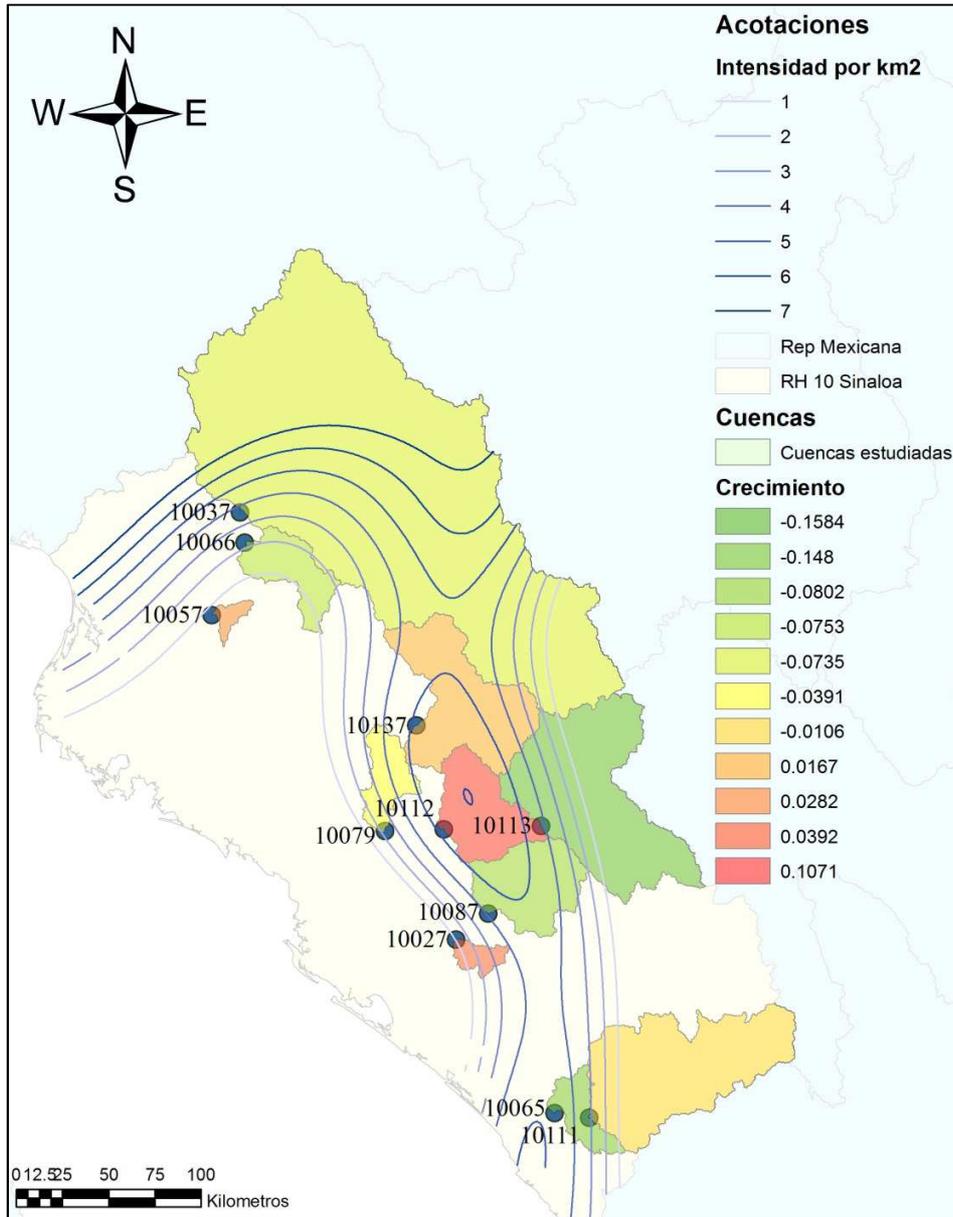


Figura 4-34 Representación gráfica de las intensidades medias en miles de m<sup>3</sup> por día por km<sup>2</sup> (isolineas); así como la pendiente de las series de intensidades máximas.

#### 4.5 Aplicación del modelo de cadenas de Markov para series anuales

Los nombres de los ríos seleccionados para su estudio con una base de datos histórica de entre 31 y 57 años se resumen en la Tabla 4-28, se presentan los estadísticos de las series anuales como la media,  $\mu$ , coeficiente de variación,  $cv$  y el coeficiente de autocorrelación serial,  $\rho_1$ . Como se desprende de esta tabla los ríos seleccionados para el estudio representan la diversidad en cuanto a los regímenes de flujo (flujos anuales), con  $cv$  fluctúan entre 0.35 y 1.42 y  $\rho_1$  de 0.00 (al azar o casi nulo efecto de correlación de retraso anual) a 0.47 (algún efecto de correlación de retraso anual). Esta gran variabilidad en los

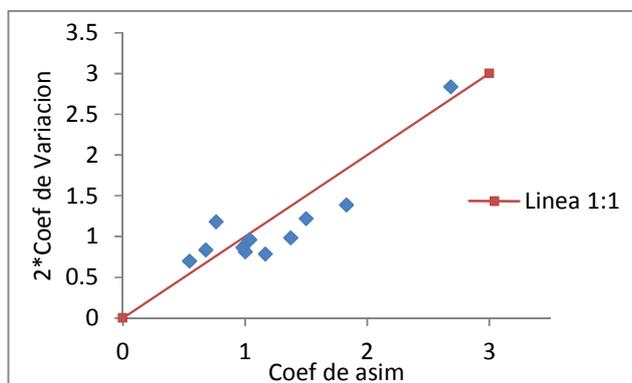
regímenes de flujo ofrece una ventaja significativa en la prueba del modelo para deducir inferencias basadas en los resultados de los modelos.

**Tabla 4-28 Detalles de los ríos elegidos para el estudio con las principales características basadas en flujos anuales.**

No.	Nombre del río y ubicación	Media (m <sup>3</sup> /s)	cv	$\gamma$	$\rho_1$
1	EL BLEDAL	527.96	0.70	1.83	0.04
2	HUITES	4161.65	1.42	2.69	0.09
3	BAMICORI	146.45	0.59	0.76	-0.20
4	IXPALINO	19099.76	0.48	1.04	0.32
5	CHOIX	3415.48	0.39	1.17	0.27
6	BADIRAGUATO	2927.04	0.61	1.50	0.22
7	TAMAZULA	7358.95	0.35	0.55	0.07
8	PIAXTLA	11426.81	0.41	1.00	0.00
9	GUATENIPA II	18098.93	0.42	0.68	0.32
10	LA HUERTA	12813.13	0.49	1.37	0.47
11	TECUSIAPA	8798.63	0.43	0.98	0.08

**cv: coeficiente de variación  $\gamma$ :coeficiente de asimetría  $\rho_1$ : coeficiente de autocorrelación serial de retraso 1**

Otra hecho que es importante resaltar de la Tabla 4-28 y que se muestra en la Figura 4-35 es que  $\gamma$  y cv tienden a estar vinculados a través de una relación  $\gamma = 2cv$ , lo que, para Sharma y Panu de conformidad con sus investigaciones (2008, 2010) implica que las series mensuales y semanales de flujo pueden ser descritas por el uso de una función de distribución gamma; este hecho será relevante en los posteriores pasos del proceso.



**Figura 4-35 Relación entre el coeficiente asimetría y el doble de coeficiente de variación.**

En la Tabla 4-29 se observan los resultados de la aplicación de las fórmulas (3.5) y (3.6) para series anuales; dado que en esta serie el tamaño de muestra es pequeño se recurrió a las fórmulas (3.7) y (3.8). Se observa que las longitudes de los déficits estimados con base en la ley empírica de Weibull tienden a estar subestimadas. Sin embargo, a valores de umbral más bajo ( $Q = 0.45-0.05$ ), los valores predichos de  $E(L_t)$  en comparación con los déficits observados se ajustan de mejor manera, tal como se representa en la Figura 4-36 (a).

**Tabla 4-29 Valores resumidos de los niveles de umbral, probabilidades condicionales, duraciones observadas ( $L_T$ -ob) y estimadas  $E(L_T)$  para el umbral correspondiente a  $q=0.5$  para longitudes anuales de sequía.**

Estación	T (año)	$e_0$ - ob	Método de conteo		E( $L_t$ ) (año)		Weibull	Hazen	Modelo usado
			q	qq	$L_t$ -ob	(años)			
EL BLEDAL	57	-0.28	0.47	0.49	5	1975-1979	5	5	Marcov 1

Estación	T (año)	$e_0 - ob$	Método de conteo		E(L <sub>T</sub> ) (año)		Weibull	Hazen	Modelo usado
			q	qq	L <sub>T</sub> -ob	(años)			
HUITES	51	-0.11	0.51	0.54	8	1950-1957	5	6	Marcov 1
BAMICORI	35	-0.13	0.55	0.49	3	1971-1973 y 1977-1979	4	5	Marcov 1
IXPALINO	47	-0.17	0.47	0.58	6	1975-1980	6	6	Marcov 1
CHOIX	31	-0.19	0.52	0.60	3	1955-1957 y 1965-1967	4	5	Aleatorio
BADIRAGUATO	40	-0.23	0.48	0.55	6	1975-1980	5	6	Marcov 1
TAMAZULA	37	-0.09	0.49	0.51	6	1975-1980	4	5	Marcov 1
PIAXTLA	46	-0.16	0.50	0.50	6	1975-1980 y 1994-1999	5	6	Aleatorio
GUATENIPA II	33	-0.11	0.45	0.57	8	1994-2001	4	6	Marcov 1
LA HUERTA	30	-0.22	0.57	0.71	6	1994-1999	6	6	Marcov 1
TECUSIAPA	45	-0.16	0.42	0.45	3	2001-2003	4	5	Aleatorio

Se evaluó la bondad de ajuste de las predicciones basadas en el modelo elegido utilizando el coeficiente de la eficiencia, COE; este estadístico reveló que la predicción usando la ley empírica de Weibull es apenas suficiente (0.38). Con el fin de mejorar la estimación, la probabilidad de excedencia se modela con la ley empírica de Hazen es decir, probabilidad de excedencia =  $1/2n$ ; usando la fórmula de Hazen, el valor de T ( $= 2 \times n$ ) en las ecuaciones ( 3.5 ) y ( 3.6 ). Los valores de la E resultante ( $L_T$ ) tienden a ser más grandes según lo revelado en la Figura 4-36 (b) al aumentar en un 19% del COE (COE = 0.57). Por otra parte, un ligero exceso de predicción es una característica deseable para la movilización de recursos y el diseño de dimensiones de almacenamiento para combatir las situaciones de déficit. Por lo tanto, para los pequeños tamaños de muestra, se encuentran comúnmente en las series flujo anual, la ley empírica de Hazen tiende a ser más confiable que la ley empírica de Weibull para el análisis de la cadena de Markov de longitudes de déficit.

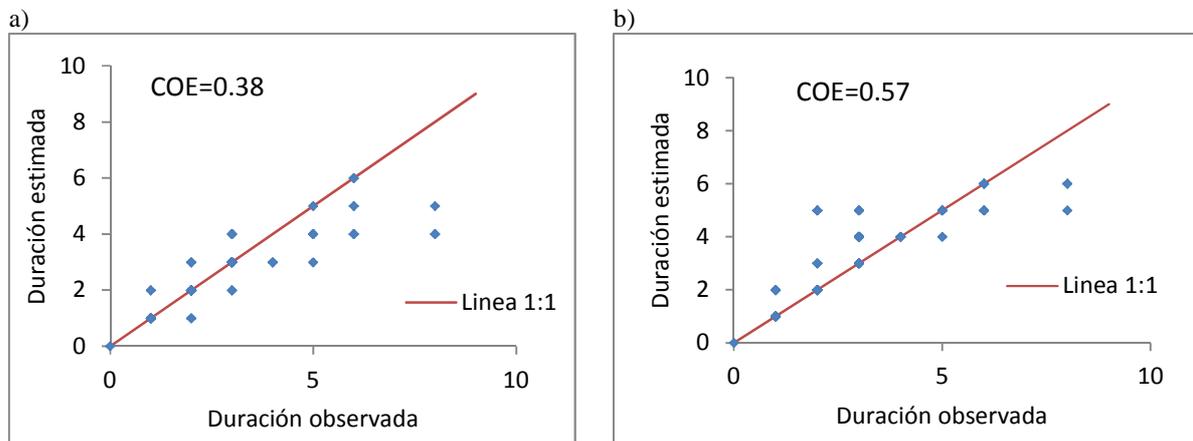


Figura 4-36 Comparación de  $L_T$ -ob y  $E(L_T)$  en series de tiempo anual usando Cadenas de Markov-1 o modelo aleatorio: (a) Ley empírica de Weibull, y (b) Ley empírica de Hazen.

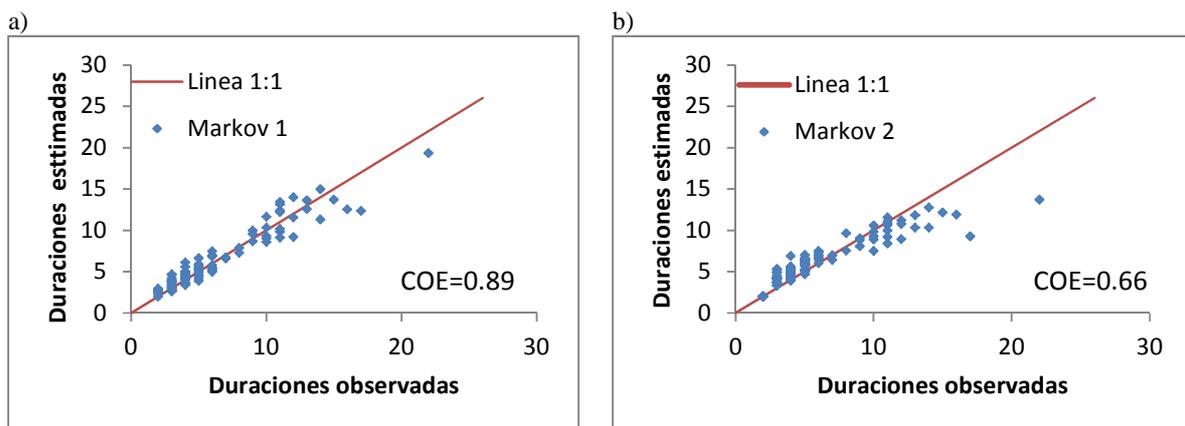
## 4.6 Aplicación del modelo de cadenas de Markov para series mensuales y semanales

Las series mensuales  $SHI_i$  se truncaron en los niveles  $e_0$  tal que correspondan los valores de  $q$  que van de 0.5 a 0.05. En vista de la existencia de muestras suficientemente grandes de registros observados en las escalas mensuales y semanales de tiempo, no se presentó ninguna dificultad en encontrar el valor de  $q$ . Los valores de  $E(L_T)$  que son usados para el caso de series mensuales son el modelo de cadena de Markov-1 y el modelo de cadena de Markov-2 y fueron comparados con las contrapartes observados ( $L_T$ -ob). Para fines ilustrativos, las estimaciones detalladas para la estación El Bledal se resumen en la Tabla 4-30.

**Tabla 4-30 Resultados del cálculo de los parámetros y estimación de la longitud de déficits de series mensuales para la estación El Bledal; parámetros estimados por el método del conteo.**

q	$e_0$	$q_q$	$q_p$	$q_{qq}$	$q_{qp}$	$L_T$ -ob	$E(L_T)$ (meses)	
							Markov 1	Markov 2
0.5	-0.27	0.69	0.31	0.69	0.31	11	13	12
0.45	-0.31	0.67	0.27	0.67	0.33	11	12	11
0.4	-0.35	0.65	0.23	0.67	0.33	10	12	11
0.35	-0.39	0.62	0.21	0.64	0.36	10	10	10
0.3	-0.43	0.59	0.18	0.60	0.40	10	9	9
0.25	-0.48	0.50	0.17	0.50	0.50	6	7	7
0.2	-0.52	0.41	0.15	0.36	0.64	5	6	6
0.15	-0.57	0.30	0.12	0.26	0.74	3	5	5
0.1	-0.64	0.29	0.08	0.20	0.80	3	4	4
0.05	-0.74	0.21	0.04	0.14	0.86	3	3	4

La predicción,  $E(L_T)$  y la longitud de la sequía observada ( $L_T$ -ob) se representan en la Figura 4-37, de la que es evidente que las estimaciones de Markov-1 de Markov-2 están subestimadas de las longitudes de déficit.



**Figura 4-37 Comparación de  $L_T$ -ob mensuales y  $E(L_T)$  usando los modelos (a) Cadena de Markov-1 y (b) Cadena de Markov-2.**

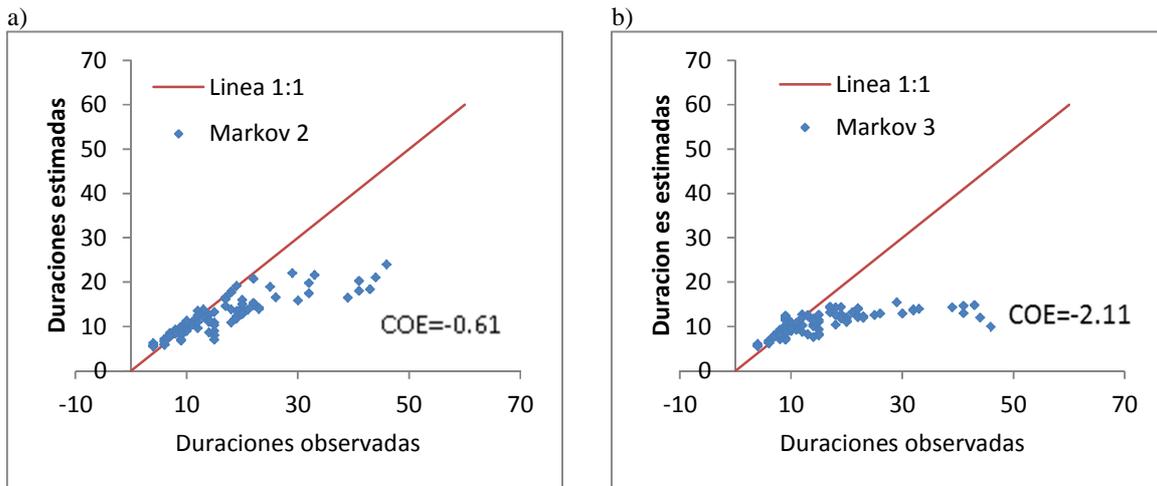
Sin embargo, el ajuste del modelo de la cadena de Markov-1 parece ser ligeramente mejor (COE = 0.89) que el modelo la cadena de Markov-2 (COE = 0.66). El ajuste entre las longitudes de déficit observado y el estimado fue satisfactorio sólo en niveles de bajo umbral, a saber: 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05. En altos niveles de umbral, en particular a 0.5 (nivel medio) y 0.4 la diferencia fue muy superior. Una razón para esta discrepancia en la predicción de  $E(L_T)$  se puede atribuir a la alta sensibilidad del parámetro  $q_q$  (para el caso de primer orden) o  $q_{qq}$  (segundo orden) debido a que se requiere un gran tamaño de muestra ( $> 1000$ ) para encontrar parámetros estables (Chin 1977). Debido a que el parámetro anterior aparece como una función logarítmica en el denominador de las ecuaciones ( 3.5 ) y ( 3.6 ), un pequeño cambio en su valor numérico hace un cambio significativo en su valor logarítmico y por lo tanto cambia marcadamente la predicción de  $E(L_T)$  . Entre otras razones, se puede argumentar que los modelos de cadena de Markov-1 o cadena de Markov-2 representan una simplificación de los procesos de la memoria a largo de estos caudales de los ríos. En otras palabras, se puede afirmar que hay un margen para mejorar las estimaciones de los parámetros o de inducción de modelos alternativos que son capaces de simular la persistencia en las series.

Para el caso de las series semanales los valores observados ( $L_T$ -ob) y los estimados obtenidos  $E(L_T)$  se representan en la Figura 4-38 y los cálculos detallados pertinentes se resumen en la Tabla 4-31 para el caso de la estación El Bledal.

**Tabla 4-31 Resultados del cálculo de los parámetros y estimación de la longitud de déficits de series semanales para la estación El Bledal; parámetros estimados por el método del conteo.**

q	e <sub>0</sub>	q <sub>q</sub>	q <sub>p</sub>	q <sub>qq</sub>	q <sub>qp</sub>	q <sub>qqq</sub>	q <sub>qqp</sub>	L <sub>T</sub> - ob	E(L <sub>T</sub> ) (años)		
									Markov 1	Markov 2	Markov 3
0.5	-0.24	0.78	0.22	0.82	0.18	0.83	0.17	29	25	22	15
0.45	-0.27	0.74	0.21	0.78	0.22	0.78	0.22	19	21	19	14
0.4	-0.30	0.72	0.19	0.76	0.24	0.77	0.23	18	19	18	14
0.35	-0.33	0.67	0.18	0.75	0.25	0.77	0.23	18	16	18	14
0.3	-0.37	0.63	0.16	0.73	0.27	0.77	0.23	17	13	17	14
0.25	-0.40	0.61	0.13	0.74	0.26	0.78	0.22	17	12	16	14
0.2	-0.45	0.55	0.11	0.71	0.29	0.75	0.25	17	10	15	13
0.15	-0.52	0.55	0.08	0.71	0.29	0.75	0.25	13	10	14	12
0.1	-0.61	0.54	0.05	0.73	0.27	0.82	0.18	13	9	13	13
0.05	-0.73	0.57	0.02	0.76	0.24	0.83	0.17	13	8	12	8

A partir de la Tabla 4-31, es evidente los modelos no siguen la tendencia de los eventos observados; inclusive en lo que respecta al modelo de cadena de Markov-3 la discrepancia es aún mayor (COE=-2.11). Aunque los índices de ajuste para el modelo Markov-1 fueron ligeramente mejores (COE = 0.16) las estimaciones no resultan aplicables. Teniendo en cuenta el tiempo de cálculo y el esfuerzo necesarios para estimar los parámetros adicionales, una extensión del análisis para el modelo de Markov-3 no parece razonable. Sin embargo, dado que el modelo de cadena de Markov-1 preserva ligeramente las tendencias se considera razonable que es posible mejorar los parámetros ya que, como ya se había mencionado estos resultan en extremo sensibles.



**Figura 4-38 Comparación de  $L_T$ -ob semanales y  $E(L_T)$  usando los modelos (a) Cadena de Markov-2 y (b) Cadena de Markov-3.**

Los análisis semanales y mensuales revelan que existen grandes discrepancias entre el valor predicho y el observado en los umbrales más altos. En los niveles de bajo umbral, es decir,  $q < 0.20$ , las discrepancias entre el déficit estimado y el observado son menos pronunciadas. En los umbrales más altos, si las estimaciones de probabilidades condicionales  $q_q$ ,  $q_{qq}$ ,  $q_{qqq}$  y se ajustan al alza en 1 a 10%, las longitudes de déficit previstas, el valor de  $E(L_T)$  se incrementará en consecuencia. Esta observación proporciona un impulso para el empleo de un procedimiento o método que sea capaz de estimar el acoplamiento de los parámetros antes mencionados con una precisión razonable para producir  $E(L_T)$  comparables a los observados homólogos.

#### **4.7 Aplicación del modelo para series mensuales y semanales con revisión de parámetros.**

Mediante la inserción de los valores de  $\sigma^2$  en la ecuación ( 3.10 ) se obtuvo la estimación mejorada de  $q_q$  (denotado como  $q_q'$ ) mediante procesos iterativos. Basándose en las estimaciones de  $q_q'$ ,  $q$  y  $p$ , la estimación de  $q_p'$  fue mejorada usando la ecuación ( 3.11 ). Para el caso de las secuencias SHI mensuales y semanales los valores de los parámetros revisados  $q_q'$  y  $q_p'$  se introdujeron en la ecuación ( 3.5 ) y ( 3.6 ) para obtener los nuevos valores de  $E(L_T)$ . Un ejemplo de los resultados obtenidos para el caso de la estación El Bledal se muestra en la Tabla 4-32 y Tabla 4-33. La comparación global de los resultados observados frente a los estimados se muestra en las Figura 4-39 y Figura 4-40.

Como ya se ha comentado en la metodología se adoptó una regla en la que la nueva estimación de  $q_{qq}$  (denotado por  $q_{qq}'$ ) es igual a  $\alpha_1 * q_q'$ . Otro parámetro estimado es  $q_{qp}'$ . Para las secuencias de  $SHI_i$  de todas las estaciones, el parámetro  $q_{qp}'$  se estimó con la relación  $q_{qp}' = \alpha_2 * q_{qq}'$ ; Para cada estación  $\alpha_2$  es el valor promedio basado en todos los niveles de umbral. Estas estimaciones es también se encuentran ejemplificadas en la Tabla 4-32 y Tabla 4-33.

**Tabla 4-32 Resultados del cálculo de duraciones de déficit mensuales para la estación El Bledal usando parámetros mejorados.**

$\sigma^2$	qq'	qp'	qqq'	qqp'	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$L_T - ob$	Markov 1	Markov 2
5.67	0.66	0.34	0.61	1.11	1.01	0.44	11	12	32
4.54	0.63	0.30	0.58	1.06	1.00	0.50	11	11	27
3.94	0.61	0.26	0.56	1.02	1.03	0.50	10	10	22
3.21	0.58	0.23	0.53	0.97	1.04	0.56	10	9	18
2.79	0.55	0.19	0.51	0.93	1.03	0.67	10	9	15
1.51	0.45	0.18	0.42	0.76	0.99	1.00	6	7	15
0.85	0.35	0.16	0.33	0.60	0.89	1.75	5	5	13
0.48	0.26	0.13	0.24	0.44	0.85	2.88	3	4	11
0.42	0.24	0.08	0.22	0.41	0.68	4.00	3	4	8
0.28	0.18	0.04	0.17	0.31	0.69	6.00	3	3	6

**Tabla 4-33 Resultados del cálculo de duraciones de déficit semanales para la estación El Bledal usando parámetros mejorados.**

$\sigma^2$	qq'	qp'	qqq'	qqp'	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$L_T - ob$	Marcov 1	Marcov 2
27.02	0.83	0.17	0.98	0.33	1.04	0.23	29	30	263
17.47	0.79	0.17	0.94	0.32	1.04	0.29	19	25	73
15.23	0.77	0.15	0.92	0.31	1.06	0.32	18	23	57
12.38	0.75	0.13	0.90	0.30	1.12	0.33	18	21	42
10.32	0.73	0.11	0.87	0.30	1.17	0.36	17	19	33
9.78	0.73	0.09	0.87	0.29	1.21	0.36	17	18	30
7.19	0.69	0.08	0.82	0.28	1.28	0.41	17	15	22
6.88	0.68	0.06	0.82	0.28	1.29	0.41	13	14	20
7.43	0.69	0.03	0.83	0.28	1.36	0.37	13	13	19
8.85	0.72	0.01	0.85	0.29	1.34	0.31	13	12	18

Es evidente a partir de las Figura 4-39 y Figura 4-40 se puede observar que el modelo de la cadena de Markov-2 no resulta satisfactorio debido a que el valor de COE ha decrecido a 0.34 para longitudes mensuales sequía. Un escenario similar se nota por las sequías semanales donde el estadístico COE se encuentra en rangos negativos (-0.05). Este resultado se debe a que para estimar los promedios de las relaciones  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  se parte de la hipótesis de que estos valores deben ser constantes para todos los umbrales; este no es el caso de la mayoría de la estaciones donde existen rangos muy variados y por consiguiente un simple promedio no describe el comportamiento de toda la población.

El modelo de cadena de Markov-1 muestra considerable mejoría en las estimaciones mensuales con un COE de 0.94 por lo que se puede considerar satisfactorio el ajuste para el caso de las series mensuales. En el caso de las series semanales no se encontró mejoría aceptable así que se recurrió a la estimación de parámetros por ensayo y error como lo sugiere la literatura (Sharma & Panu, 2012). La Figura 4-41 muestra los resultados de esta estimación notándose que los valores estimados esta vez sí conservan la tendencia pero no para mejorar el ajuste con respecto al modelo de cadena de Markov-1 para esta misma serie; de esta manera se agotaron los procedimientos para encontrar un ajuste satisfactorio sin embargo no se encontró un ajuste satisfactorio para las series semanales.

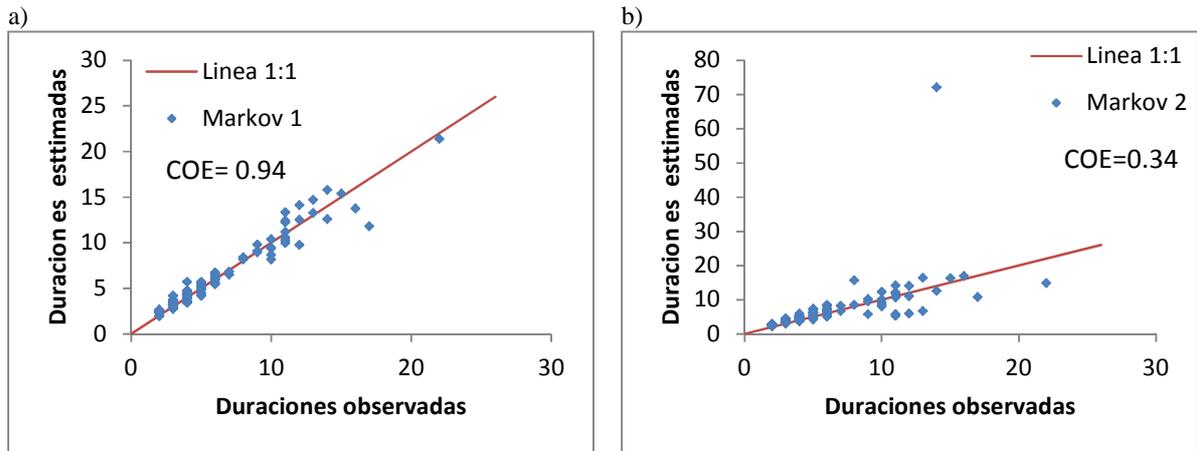


Figura 4-39 Comparación de  $L_T$ -ob mensuales y  $E(L_T)$  usando los modelos (a) Cadena de Markov-1 y (b) Cadena de Markov-2 empleando la revisión de parámetros estimados.

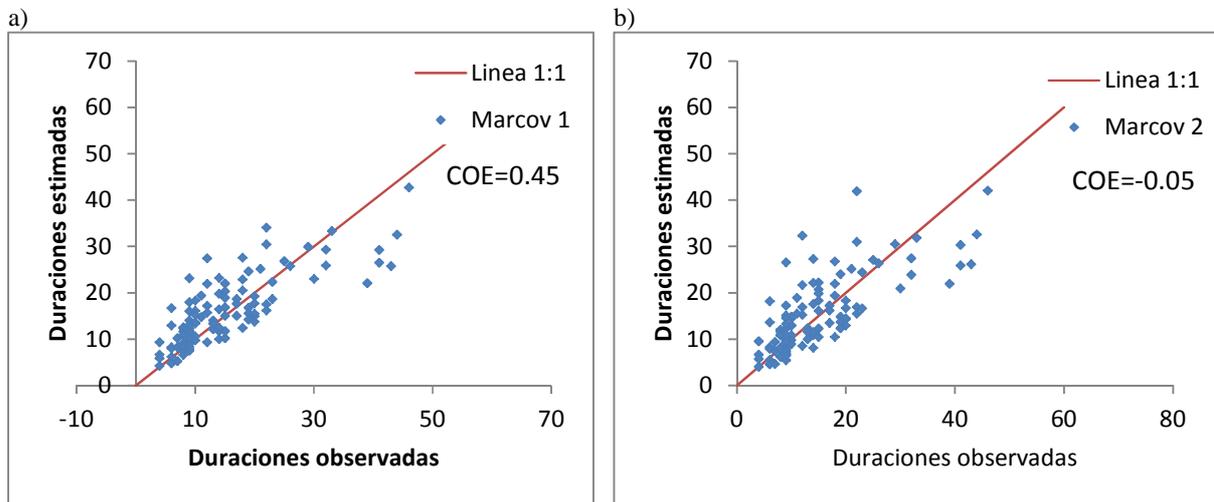
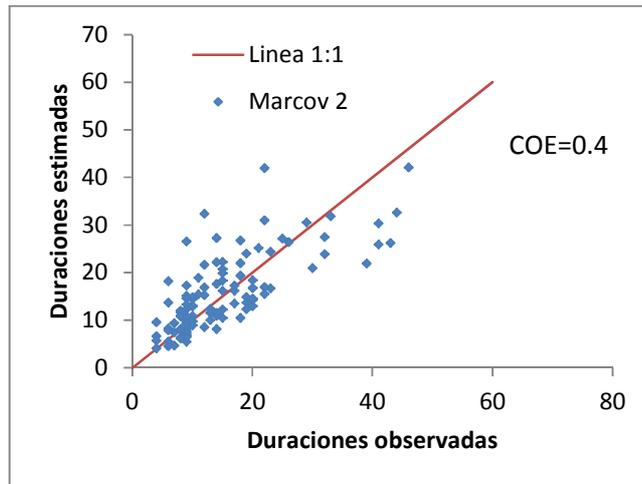


Figura 4-40 Comparación de  $L_T$ -ob semanales y  $E(L_T)$  usando los modelos (a) Cadena de Markov-1 y (b) Cadena de Markov-2 empleando la revisión de parámetros estimados.



**Figura 4-41 Comparación de  $L_T$ -ob semanales y  $E(L_T)$  usando los modelos para el modelo de cadena de Markov-2 empleando la revisión de parámetros estimados mejorados.**

A pesar del empleo de diferentes métodos de estimación de parámetros, los resultados del modelo de la cadena de Markov-2 no mejoraron la predicción de longitudes de déficit, ya sea para la escala de tiempo mensual o semanal.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la recolección de datos se observa que existen pocas estaciones hidrométricas con suficientes datos para realizar análisis de déficits; cabe mencionar que los análisis descritos en este trabajo se pueden complementar con el uso de la regionalización de las estaciones; lo que incrementaría tanto el tamaño de la muestra como el área de la zona de estudio ya que se introducirían aquellas estaciones desechadas en primera instancia por su corto registro de datos y al hacerlo sus cuencas correspondientes también entrarían dentro del estudio regional.

En combinación con un análisis de precipitación los resultados de las pruebas de homogeneidad temporal de las series resultan significativos para fines de reconocimiento y enfoque de esfuerzos para mitigar los factores negativos que influyen en la pérdida de homogeneidad tales como la deforestación y los cambios de uso de suelo entre otros. Las proyecciones de eventos de diseño están condicionadas a la presencia o falta de homogeneidad en las series de datos; como se muestra en el capítulo 4 un gran número de estaciones presenta una tendencia en la serie.

Otra conclusión importante que resulta del análisis de las series meteorológicas es que la existencia de un evento extremo de precipitación (depresión tropical, tormenta tropical o huracán) en un año que es clasificado como seco en la serie de precipitaciones se vea reflejado al mismo tiempo como un año húmedo en la serie de escurrimientos; este fenómeno resulta importante para evaluar los efectos que tiene un evento ciclónico en el comportamiento de las series hidrológicas y matizar de manera particular los efectos ambientales y socioeconómicos que se presentan en este singular fenómeno en el caso de que estos existieran y que sea el déficit la causa.

En el enfoque de serie anual máxima se modeló el mayor evento dentro de un año hidrométrico; para las variables de Déficit Máximo y Duración se encontraron ajustes satisfactorios, no así para la serie de Tiempo de Ocurrencia en la que ninguna estación analizada mostro ajuste; las causas de este hecho radican principalmente en que esta serie no sigue la misma tendencia que las dos primeras, por ello se recomienda no tratar esta variable con el análisis de eventos extremos máximos; dado que las gráficas revelan una tendencia inversa un análisis para eventos extremos mínimos podría resultar conveniente en estudios posteriores.

Las distribuciones: Gamma de 3 parámetros, Gumbel y General de Valores Extremos fueron las que mejor se ajustaron a las series, cabe resaltar que en todas las series se analizó la posibilidad de que existieran distribuciones mezcladas encontrando, en algunas estaciones, una útil herramienta para la modelación de los eventos.

Para el caso de la modelación de eventos duración del déficit máximo en una escala de tiempo anual y sobre la base de los resultados anteriores, puede conjeturarse que los modelos de la cadena de Markov en combinación con la ley empírica de posiciones de Hazen tienden a proporcionar una mejor predicción de las longitudes de déficit. En lo que a las series mensuales respecta se observa un ajuste aceptable con el uso del modelo de cadena de Markov-1 una vez efectuada la revisión y mejora de los parámetros obtenidos inicialmente por el método de conteo directo. Un caso muy diferente fue el de las series semanales en las que no se encontró un ajuste satisfactorio para la modelación de las duraciones de los déficits aun empleando la revisión de parámetros; por lo que se determina que, a pesar de que el método ha comprobado su eficiencia en otras cuencas, no es factible modelar las series semanales de la Región Hidrológica número 10 con el modelo de cadenas de Makov.

Los resultados obtenidos son un diagnóstico de cada zona estudiada; es necesario vincular estos resultados con los impactos generados de tal manera que se puedan adoptar políticas a largo plazo para identificar y mitigar los efectos provocados por los déficits hídricos futuros; ello requiere un análisis socioeconómico detallado en cada región.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aswathanarayana, U. (2001). *Water Resources Management and the Environment*. Rotterdam: Balkema.
- Box, G. E., & Jenkins, G. M. (1976). *Time series analysis forecasting and control*. San Francisco.
- Chin, E. H. (1977). Modeling daily precipitation occurrence process with Markov chain. *Water Resources Research*, 6(13), 949-956.
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). (6 de Mayo de 2013). *Organismo de Cuenca Pacífico Norte*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/ocpn/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=c813f07c-448c-40f1-987e-1da36b9d14cd|Con%C3%B3cenos|1|0|0|0>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (15 de Noviembre de 2012). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Obtenido de BANDAS: [http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com\\_wrapper&view=wrapper](http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com_wrapper&view=wrapper)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Diálogos por el Agua y el Cambio Climático: la Gestión de la Vulnerabilidad ante las Sequías. *Conceptos Fundamentales*, (pág. 24). Mexico D.F.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). (06 de Mayo de 2013). *Portal de Geoinformación*. Obtenido de SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Escalante Sandoval, C. A., & Reyes Chávez, L. (2008). *Técnicas estadísticas en hidrología*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería.
- Gobierno del Estado de Sinaloa. (2012). *Segundo informe de gobierno*. Culiacán: Gobierno de Estado de Sinaloa.
- Gómez, J. F., Aparicio, J., & Patiño, C. (2011). *Manual de análisis de frecuencias en hidrología* (Primera ed.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (15 de Noviembre de 2012). *Enciclopedia de los Municipios de México: Sinaloa*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/sinaloa/>
- Lettenmaier, D. P. (2009). Global climate change: effects on hydrologic cycle. En I. C. Organización de las Naciones Unidas para la Educación. *The 3<sup>rd</sup> United Nations World Water Development Report: Water in a Changing World* (págs. 181-210). París: UNESCO.
- Martínez Bazúa, D. (2006). Impacto de las sequías en el estado de Sinaloa dentro de la actividad agrícola y ganadera. *Tesis*. México D.F.

- McKee, T. B., Doesen, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology*, (págs. 179-184). Anaheim.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*, 157-175.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 3(10), 282-289.
- Reyes Chávez, L. (2001). Análisis Regional de Sequías. *Tesis*. México, D.F., México.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2 de Abril de 2012). SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (SIAP). Miguel Hidalgo, Distrito Federal, México.
- Sen, Z. (1977). Run sums of annual flow series. *Journal of Hydrology* (35), 311-325.
- Sharma, T. C., & Panu, U. S. (2010). Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 1(55), 79-92.
- Sharma, T. C., & Panu, U. S. (2012). Prediction of hydrological drought durations based on Markov chains: case of the Canadian prairies. *Hydrological Sciences Journal*, 4(57), 705-722.
- Sheffield, J., Wood, E., & Roderick, M. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 435-440.
- Tallaksen, L. M., Madsen, H., & Clausen, B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, 1(42), 15-33.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (2003). *Introduction to hydrology* (Quinta ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Woo, M.-K., & Tarhule, A. (1994). Streamflow droughts of northern Nigerian. *Hydrological Sciences Journal*, 1(39), 19-34.