

01162 : 6

Zey



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE FRECUENCIAS DE SEQUIAS PARA EL ESTADO DE SINALOA

T E S I S

PRESENTADA POR:

FERNANDO GARCIA PAEZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA (HIDRAULICA)

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL



NOVIEMBRE 1998

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **DEDICATORIAS**

**Para Eva Angelina, mi esposa**

**Por su cariño, tolerancia y solidaridad que me ha demostrado siempre.**

**Para Fernando, Evangelina y Jorge, mis hijos.**

**Por su maravillosa compañía y su motivación constante.**

**Para mis padres: Rosalva y Juan,**

**Por el cariño que siempre me han brindado y que son correspondidos ampliamente.**

**Para mis hermanos: Juan, Guadalupe, José Manuel, Elvira, Cesar, Benjamín, Alfredo, Gloria, Rosalva y Marco Vinicio.**

## **AGRADECIMIENTOS**

***A mi hermano Benjamín y a su esposa María del carmen, que sin su apoyo no hubiera sido posible culminar esta tarea académica.***

***Al Dr. Carlos Escalante Sandoval, por otorgarme una nueva visión en mi formación académica que me permitió conocer una técnica para la planeación de los recursos hidráulicos del estado de Sinaloa.***

***A los miembros del jurado: Dr. Rodolfo Silva, M. En I. Lilia Reyes, Dr. Jesús Gracia y M. En I. Víctor Franco, por sus contribuciones especializadas para mejorar el trabajo desarrollado.***

***A la Universidad Autónoma de Sinaloa y a su Facultad de Ingeniería que impulsan día a día el fortalecimiento de los cuadros académicos de la Institución.***

***A la Universidad Nacional Autónoma de México, por recibirme de nueva cuenta y así poder concluir con el grado de Maestría.***

# Í N D I C E

	<b>Página</b>
Índice de figuras. ....	i
Índice de tablas. ....	iv
Resumen. ....	v
Nomenclatura ....	vii
Introducción ....	viii
<b>1 ANÁLISIS DE SEQUÍAS EN MÉXICO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes. ....	1
1.1.1 Características de las sequías en México .....	5
1.1.2 Sequías en el México antiguo .....	5
1.1.3 Sequías en la época colonial (1521-1821) .....	6
1.1.4 Sequías en el siglo XIX (1819-1919).....	7
1.1.5 Sequías en el período 1910-1977.....	7
1.2 Características de las sequías en Sinaloa. ....	8
<b>2 CARACTERÍSTICAS DEL ESTADO DE SINALOA.</b> .....	<b>11</b>
2.1 Localización, límites y extensión. ....	11
2.2 Fisiografía. ....	11
2.3 Clima. ....	15
2.4 Temperatura. ....	18
2.5 Hidrología superficial. ....	18
2.5.1 Panorama general del agua superficial en el estado de Sinaloa. ....	20
2.6 Región hidrológica 10, Sinaloa. ....	22
2.6.1 Cuenca del río Fuerte. ....	22
2.6.2 Cuenca del estero Bocorehuis. ....	24
2.6.3 Cuenca Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste. ....	28
2.6.4 Cuenca del río Sinaloa. ....	28
2.6.5 Cuenca del río Mocorito. ....	29

2.6.6	Cuenca del río Culiacán. ....	30
2.6.7	Cuenca del río San Lorenzo. ....	30
2.6.8	Cuenca del río Piaxtla-río Elota- río Quelite. ....	31
2.7	Región hidrológica 11. ....	31
2.7.1	Cuenca del río Presidio. ....	32
2.7.2	Cuenca del río Baluarte. ....	32
2.7.3	Cuenca del río Acaponeta. ....	33
2.8	Agricultura. ....	34
2.8.1	Sistemas de riego. ....	34
2.8.2	Ciclos agrícolas. ....	35
2.9	Industria. ....	36
2.10	Generación de energía eléctrica. ....	36
2.11	Población. ....	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE FRECUENCIAS</b>	
	<b>DE SEQUÍAS. ....</b>	<b>38</b>
3.1	Información. ....	38
3.2	Estadísticos muestrales. ....	39
a)	Coeficiente de variación.....	39
b)	Determinación del coeficiente de autocorrelación ....	39
c)	Media muestral.....	41
d)	Varianza muestral. ....	41
e)	Función de autocorrelación parcial .....	42
3.3	Pruebas estadísticas.....	43
3.3.1	Prueba de normalidad para variables de series de tiempo.....	43
3.3.1.1	Test de normalidad utilizando el coeficiente de sesgo.....	43
3.3.1.2	Test de Kolmogorov-Smirnov .....	45
3.3.1.3	Normalización de series de tiempo de precipitación anual .....	47
3.3.2	Verificación de la independencia de las series. ....	48
3.3.2.1	Test de Anderson (1941) para independencia de las series.....	49

3.3.2.2	Run-test (Saldarriaga y Yevjevich 1970).	49
3.3.3	Estacionariedad de las series de tiempo.	55
3.3.3.1	Test de estacionariedad utilizando coeficientes de autocorrelación de retraso uno.	56
3.3.3.2	Test de Kendall Para la estacionariedad de la media.	56
3.4	Selección de modelos.	58
3.5	Análisis de los procesos de precipitación anual.	64
3.6	Modelos autorregresivos.	65
3.6.1	Descripción de los modelos AR.	66
3.6.2	Prueba sobre la suposición del modelo AR(1).	72
3.6.3	Generación de muestras sintéticas.	73
3.6.4	Selección del número de muestras a ser generadas.	75
3.6.5	Determinación de las características de las sequías.	77
<b>4</b>	<b>APLICACIONES.</b>	<b>79</b>
4.1	Descripción de las estaciones meteorológicas con base en su ubicación.	79
4.2	Precipitación promedio mensual y anual.	80
4.3	Agrupamiento de las estaciones climatológicas.	84
4.4	Resultados de las pruebas de normalidad.	84
4.5	Resultados de las pruebas de independencia.	91
4.6	Resultados de las pruebas de estacionariedad.	101
4.7	Resultados de la prueba para confirmar la aplicación del modelo autorregresivo AR(1).	101
4.8	Resultados de la generación de muestras sintéticas.	111
4.9	Resultados de los análisis de frecuencias de sequías para el estado de Sinaloa.	111
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>162</b>
	Bibliografía.	166

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
No.	
1. Definición de los déficit de agua en una serie de precipitación anual. ....	2
2. Área-intensidad de las sequías más severas en los últimos 40 años. ....	9
3. Marco Fisiográfico Nacional. ....	12
4. Fisiografía del estado de Sinaloa. ....	13
5. Climas del estado de Sinaloa. ....	17
6. Isotermas para el estado de Sinaloa. ....	19
7. División hidrológica para el estado de Sinaloa. ....	23
8. Ubicación de los Distritos de Riego. ....	25
9. Definición de corridas positivas y negativas para un nivel de truncamiento dado. ....	52
10. Región de aceptación de la hipótesis nula con dos colas. ....	55
11. Series de tiempo de la ec. (29), función de autocorrelación de la ec (37) y la función de autocorrelación parcial ec. (6). ....	69
12. Definición de las características de las sequías. ....	78
14. Ubicación de las estaciones climatológicas en el estado de Sinaloa. ....	81
15. Plano de isoyetas para el estado de Sinaloa. ....	83
16. Regiones de precipitación homogénea. ....	90
17. Resultados de las probabilidades asociadas con la duración de sequías para cada nivel de truncamiento. ....	117
18. Resultados de las probabilidades asociadas a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación. ....	121
19. Resultados de las probabilidades asociadas con la intensidad de la sequía, para cada nivel de truncación. ....	125
20. Resultados de los períodos de retorno asociados a la duración de la sequía para cada nivel de truncación. ....	129

21	Resultados de los períodos de retorno asociados a las deficiencias de agua por cada nivel de truncamiento. ....	133
22	Resultados de los períodos de retorno asociados con la intensidad de la sequía en cada nivel de truncamiento. ....	137
23	Valores de la probabilidad de ocurrencia de sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es la media.....	142
24	Probabilidades asociadas con la sequía de un año cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media .....	143
25	Probabilidades asociadas con la sequía de un año cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media .....	144
26	Probabilidades asociadas con la sequía de un año cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media .....	145
27	Probabilidades asociadas con la sequía de un año cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media .....	146
28	Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año cuando el nivel de truncamiento es la media.....	147
29	Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media.....	148
30	Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media.....	149
31	Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media.....	150
32	Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media.....	151
33	Períodos de retorno asociados con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es la media muestral.....	152
34	Períodos de retorno asociados con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media .....	153

35	Períodos de retorno asociados con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media .....	154
36	Períodos de retorno asociados con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media .....	155
37	Períodos de retorno asociados con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media .....	156
38	Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es la media muestral.....	157
39	Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media muestral.....	158
40	Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media muestral.....	159
41	Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media muestral.....	160
42	Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media muestral.....	161

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA No.	PÁGINA
1. Presas del estado de Sinaloa. ....	21
2. Características de los Distritos de Riego. ....	26
3. Volúmenes de escurrimiento del estado de Sinaloa. ....	27
4. Tabla del test de normalidad para sesgo para tamaños de muestra $< 150$ ....	45
5. Clasificación de deciles para períodos secos y húmedos. ....	60
6. Clasificación del PDSI para períodos secos y húmedos. ....	61
7. Valores del SPI. ....	63
8. Distribución de estaciones climatológicas por municipio en Sinaloa. ....	79
9. Cantidad de estaciones climatológicas de acuerdo a la duración mensual de la lluvia. ....	82
10. Estaciones ordenadas mediante el coeficiente de variación. ....	85
11. Resultados de las pruebas de normalidad. ....	92
12. Resultados de las pruebas de independencia. ....	96
13. Resultados de las pruebas de estacionariedad. ....	102
14. Resultados de la prueba para confirmar el modelo autorregresivo AR(1). ....	107
15. Resultados de las pruebas de normalidad hecha a los residuales. ....	112

## RESUMEN

Se presenta una técnica para analizar sequías meteorológicas en el estado de Sinaloa utilizando datos de precipitación promedio anual y aplicando el Modelo Autorregresivo AR(1) para generación de muestras sintéticas.

El procedimiento consistió en aplicar pruebas estadísticas para verificar la normalidad, independencia y estacionariedad de los datos originales; adicionalmente se confirmó el uso del Modelo Autorregresivo aplicando la prueba del correlograma parcial.

Se agruparon las estaciones climatológicas de acuerdo a los valores del coeficiente de variación, los resultados permitieron definir ocho regiones con precipitación homogénea que se dibujaron con base en los polígonos de Thiessen. También se encontró que el 95% de las estaciones se encuentran entre los valores de 0.14 y 0.71 del citado coeficiente.

La identificación de sequías se realizó mediante los métodos *Run-Length*, *Run-Sum* y *Run-Intensity* que corresponden a la duración, deficiencia y la intensidad de la sequía respectivamente. La estrategia de modelación de dichos métodos consiste en establecer una demanda de agua promedio anual que actúa como nivel de truncamiento de las series generadas. Lo anterior constituye la base de cálculo para el estudio de sequías. Es decir, los datos de precipitación anual que estén por debajo del nivel de truncamiento, indican un déficit en el suministro de agua. Para este trabajo se establecieron cinco niveles de truncamiento con valores referenciados al promedio de la serie original. Los valores utilizados fueron los siguientes:  $\bar{x}$ ,  $0.9\bar{x}$ ,  $0.8\bar{x}$ ,  $0.7\bar{x}$ ,  $0.6\bar{x}$ .

Se obtuvieron gráficas de sequías para probabilidades y períodos de retorno asociados con la duración, suma e intensidad de la sequía para cada nivel de truncamiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos se encontró que las sequías más importantes presentan duraciones de uno a tres años. Asimismo, la mayoría de ellas se localizan en la parte Norte del estado y más específicamente en los municipios de Sinaloa, Choix, El Fuerte y Ahome.

Para definir las regiones con valores de la duración, suma e intensidad de las sequías, se construyeron planos de isolíneas para el estado de Sinaloa que ubican con precisión las áreas críticas de sequías.

Los planos de isolíneas contenidos en este trabajo permiten aplicar y adaptar procesos de planeación de los recursos hidráulicos para las distintas regiones del estado de Sinaloa, así como la implementación de medidas para mitigar las sequías meteorológicas.

## NOMENCLATURA

$I(t)$	Suministro de agua.
$D(t)$	Demanda de agua
$Y(t)$	Serie de lluvia dependientes del tiempo.
CV	Coefficiente de variación.
S	Desviación estándar muestral.
$\bar{x}$	Media muestral.
$r_k$	Coefficiente de autocorrelación de retraso k
$r'_k$	Coefficiente de autocorrelación con tendencia corregida.
$\sigma$	Desviación estándar poblacional
$\hat{\gamma}$	Estimador del coeficiente de sesgo.
$u_{1-\alpha/2}$	Cuantil $1 - \alpha/2$ de la distribución normal estándar.
$\alpha$	Nivel de probabilidad de rechazo.
$D_\alpha$	Test estadístico para un nivel de significancia $\alpha$ .
$X_t$	Serie de precipitación anual.
N	Tamaño de la muestra.
k	Número de retrasos
$x_0$	Nivel de truncación arbitrario.
$N_j^+$	Longitud de la j-ésima corrida positiva.
$N_j^-$	Longitud de la j-ésima corrida negativa.
$\varepsilon_t$	Serie de lluvia independiente del tiempo.
$\phi_i$	Coefficientes de autorregresión.
$\sigma_\varepsilon^2$	Varianza residual.
$\hat{\varepsilon}_t$	Estimador de los residuales de la muestra.
$\xi_1 \xi_2$	Números aleatorios estándar.
$u_1 u_2$	Números aleatorios de la distribución uniforme (0,1).

## INTRODUCCIÓN

La investigación referente al tema de "Análisis de Frecuencias de Sequías para el estado de Sinaloa", se sitúa entre los esfuerzos que se realizan a nivel internacional para aplicar y adaptar procesos de planeación de los recursos hidráulicos.

Los modelos autorregresivos se han adoptado en varias partes del mundo para analizar procesos de sequías con base en datos de precipitación diaria, mensual y anual.

En Sinaloa, el fenómeno de la sequía está recibiendo atención por la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.), por la Confederación de Asociaciones de Agricultores del Estado de Sinaloa (C.A.A.D.E.S.) y por algunas instituciones educativas, esto se debe a que el 60% de la economía sinaloense está sustentada en el sector de la agricultura de riego.

Los modelos autorregresivos aplicados a datos de precipitación promedio anual han resultado una herramienta conveniente para el estudio y análisis de frecuencias de sequías asociadas con su duración, intensidad y severidad promedio.

La modelación matemática de estas herramientas es fundamental para comprender el comportamiento aleatorio de la ocurrencia de las lluvias en cualquier región cuya utilidad final es establecer políticas sobre administración y planeación de los recursos hidráulicos a corto y mediano plazo.

La estrategia de modelación de series de lluvias para análisis de sequías requiere conocer la demanda de agua promedio anual. Esta variable actúa en el modelo como un nivel de truncamiento de las series observadas y constituye la base de cálculo para su estudio. Es decir, los datos de precipitación anual que estén por debajo del nivel de truncamiento indican un déficit en el suministro de agua. Por otro lado, los datos de precipitación anual que estén por arriba del nivel de truncamiento constituyen un superávit en el suministro de agua.

Para simular con cierto grado de confianza los modelos de lluvia, se requiere verificar la adecuación de los datos mediante pruebas estadísticas. En este trabajo se utilizaron las pruebas de Sesgo y de Wald-Wolfowitz para verificar la normalidad de los datos observados, el test de Anderson para probar la independencia y se confirmó el uso del modelo Autorregresivo mediante la prueba del correlograma parcial y el run-test propuesto por Saldarriaga y Yevjevich (1970) para probar la independencia de los datos.

En este trabajo se determinó que el modelo que se ajusta a las series de precipitación anual es el Autorregresivo Lineal de Primer Orden AR(1). En este último se calcularon los residuales y en ambos se obtuvieron lluvias sintéticas para cada estación. Posteriormente a los residuales se les aplicó las pruebas de normalidad para comprobar la elección del modelo.

A los datos generados por el modelo AR(1), se les aplicó la teoría estadística de rachas (corridas) para generar cien muestras de cada estación, de manera que se identificaran eventos de sequía relativas a cinco niveles diferentes de truncamiento. Para cada estación climatológica y nivel de truncamiento, se obtuvieron las probabilidades asociadas con la duración de las sequías mayor que  $N$  años (*run-lengths*), probabilidades relacionadas con la deficiencia de agua mayor que la demanda (*run-sum*) y se obtuvo el valor de la probabilidad contenida en la severidad promedio de la sequía mayor que un valor  $R$  (*run-intensity*). Además, para cada nivel de demanda se obtuvieron los períodos de retorno asociados con las sequías, lo que permitió calcular el período de retorno para tener un evento de sequía mayor que  $N$  años; así como responder la pregunta de si cuál es el período de retorno para tener un evento de sequía relacionado con la deficiencia de agua mayor que el nivel de demanda y conocer el período de retorno para tener un evento de sequía con severidad promedio mayor que  $R$ .

En el trabajo se describe la metodología para la selección del modelo matemático, las pruebas aplicadas a los datos observados y a las muestras sintéticas, se presentan gráficas de análisis de frecuencias de sequías y las isolíneas que delimitan las regiones con problemas de deficiencia de agua.

Esta investigación pretende adecuar el modelo autorregresivo lineal a las series de precipitación anual del estado de Sinaloa, con la finalidad de calcular frecuencias de duración, intensidad y severidad promedio de sequías asociadas con probabilidades y períodos de retorno.

Los objetivos particulares son:

- Establecer el Modelo Autorregresivo Lineal de Orden Uno AR(1) para las series de precipitación que resulten estacionarias en la media, independientes y que sus residuales acepten las hipótesis de normalidad.
- Evaluar los coeficientes de autocorrelación de las series observadas mediante la gráfica de correlogramas corregidos por tendencia y probar las hipótesis relacionadas con la función de autocorrelación parcial.
- Calcular y obtener mediante el método de *run-length* gráficas de frecuencias de sequías para el estado de Sinaloa relacionadas con probabilidades y períodos de retorno donde intervengan la duración, intensidad y severidad promedio de las sequías.
- Estudiar la evolución, el estado del arte y antecedentes del desarrollo de modelos de precipitación pluvial para analizar frecuencias de sequías.

La revisión de la literatura se enfocó a extraer el conocimiento acerca de las diversas modelaciones matemáticas que gobiernan el proceso de la ocurrencia de la lluvia como son: teoría de rachas (corridas), pruebas estadísticas para comprobar la aleatoriedad y homogeneidad de los datos, modelos autorregresivos de primer orden, probabilidad, períodos de retorno y parámetros estadísticos (media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, coeficiente de autocorrelación y marcas de clase). Esto permitió identificar los avances que se tienen en algunos lugares del mundo sobre esta herramienta y

como se han desarrollado los modelos autorregresivos para realizar análisis de frecuencias de sequías.

Dado el estado real del conocimiento en el tema de los modelos autorregresivos resulta necesario evaluar los resultados obtenidos hasta 1990 con el comportamiento del fenómeno sequía en los últimos siete años; de esta manera, se podrá obtener una medida del grado de dispersión de los datos que permita modificar o calibrar el modelo propuesto.

Este trabajo se desarrolló con base en un modelo que incluye parámetros y pruebas estadísticas que representan la ocurrencia de las lluvias con cierto porcentaje de error, por lo que resultaría conveniente aplicar pruebas desarrolladas recientemente para verificar las características de las series de tiempo. Además de lo anterior, sería conveniente aplicar un test de persistencia en los extremos, ya que de acuerdo a Elthair (1987) la persistencia dentro de los extremos es una característica genuina de los procesos de precipitación. Aunado a lo anterior, se puede probar que las cantidades de precipitación anual en Sinaloa han declinado significativamente, para ello, basta con desarrollar pruebas para enfocar directamente la caída en la media.

Por otro lado, la demanda de agua propuesta como un nivel de truncamiento constante de las series, en realidad varía cada año en forma ascendente, por lo que las consideraciones hechas en este trabajo de que dicho parámetro varía desde el 100 al 60% de la media, deberá ser sujeta a una evaluación más rigurosa de los resultados. Además, el nivel de truncamiento aplicado a series de lluvias sintéticas y que se utilizan para pronósticos de sequías en base a probabilidades y períodos de retorno, deberán ser calculados con base en una demanda de agua proyectada. Así, de esta manera se podrán establecer políticas de administración de los recursos hidráulicos con mayor certidumbre.

El análisis planteado en este trabajo no pretende agotar el tema tan extenso y a la vez incipiente en el conocimiento de la modelación de lluvias para Sinaloa, sino establecer las bases e iniciar la discusión sobre esta propuesta con el propósito de definir una

herramienta matemática que permita establecer cuál es el modelo autorregresivo que se ajusta a los datos de lluvia para las estaciones climatológicas de Sinaloa.

En el capítulo uno se presenta un análisis de sequías en México, en el se incluye la definición de sequía hidrológica. Se definen sus características estadísticas tomando como base la serie de precipitación anual y un nivel de demanda. Además, se describen las generalidades de las características de la sequía en México tomando como referencia los efectos que se han presentado en períodos arbitrarios de tiempo. Aunado a lo anterior, se hace referencia a las características de las sequías más severas en el estado de Sinaloa durante los últimos 40 años de acuerdo a la superficie afectada.

En el capítulo dos se describen las características físicas del estado de Sinaloa haciendo referencia a las provincias fisiográficas de la entidad, al clima, temperatura y a la hidrología superficial. Además, se describen las regiones hidrológicas que pertenecen al estado con base en las cuencas de los ríos. También se mencionan las características de los Distritos de Riego, los volúmenes de escurrimiento y las presas ubicadas en la entidad. Asimismo, se hace referencia a las actividades económicas relacionadas con el uso del agua como son la agricultura, industria, generación de energía eléctrica y población.

El capítulo tres presenta la metodología para el análisis de frecuencias de sequías. Se definen los estadísticos muestrales que intervienen en el desarrollo de este trabajo y se describen las características de las pruebas estadísticas que se utilizan para verificar la normalidad, independencia y estacionariedad de las series de lluvia. Se presenta además una descripción detallada de los modelos autorregresivos en general, haciendo énfasis en el tipo AR(1) y en las pruebas estadísticas para confirmar su uso.

El capítulo cuatro expone los resultados obtenidos al aplicar el modelo autorregresivo Ar(1) a las series de lluvia del estado de Sinaloa. Resalta lo referente a la descripción de las estaciones meteorológicas con base en su ubicación en los municipios, las precipitaciones promedio mensual y anual, el agrupamiento de las estaciones tomando

como referencia el coeficiente de variación, los resultados de las pruebas de normalidad, independencia, estacionariedad y los resultados de las pruebas para confirmar la aplicación del modelo autorregresivo AR(1). Además se generaron cien muestras de lluvia sintética para cada estación climatológica, mismas que fueron comparadas con cinco niveles de truncamiento para obtener las probabilidades y períodos de retorno asociados con las características de sequías denominadas *Run-Length*, *Run-Sum* y *Run-Intensity*.

Finalmente se obtienen los planos de isolíneas del estado de Sinaloa que muestran las regiones con probabilidad de ocurrencia de sequías, los valores de las deficiencias de agua y las intensidades de la sequía para períodos de uno a seis años.

# 1. ANÁLISIS DE SEQUÍAS EN MÉXICO.

## 1.1 Antecedentes.

La sequía se define como la ausencia de precipitación o la ocurrencia de una precipitación débil en una región durante un gran período de tiempo. Meteorológicamente la sequía es concebida como movimientos extremos de la atmósfera que originan descensos lentos de masas de aire continental que producen una compresión adiabática que incrementa la temperatura y por tanto reducción de la humedad relativa (Peixoto Pinto, 1979). Además, dicho descenso produce una inversión de la temperatura la cual incrementa la estabilidad de la atmósfera de tal manera que previene la formación de nubes espesas que puedan generar precipitación. Las sequías no son fenómenos locales, frecuentemente están asociados con situaciones climáticas anticiclónicas, el descenso de masas de aire es más intenso en la franja Este de anticiclones subtropicales semipermanentes, a menudo llamados centros de acción, cuando estos centros de acción son desplazados de su posición promedio o están anormalmente desarrollados, ellos traen masas de aire secas o húmedas en la región, que durante el descenso producen las condiciones para la sequía. Estos centros de acción se dirigen hacia los frentes polares e interactúan con la depresión barociclónica asociada con el frente polar. Ésta se desplaza fuera de las latitudes normales a diferentes zonas donde provoca una disminución en la precipitación. Por tanto, la sequía en un área está asociada con la precipitación en otra parte.

Para definir y describir las características de las sequías se han utilizado teorías de probabilidad, de estadísticas matemáticas y algunos procesos estocásticos a los resultados de observaciones y experimentos que varían en el tiempo y en el espacio.

El hecho es que las teorías de procesos aleatorios normales e independientes adoptan el desarrollo de teoremas y ecuaciones de modelos simétricos, mientras que las variables aleatorias que describen las características de las sequías son a menudo distribuidas asimétricamente en el tiempo y en el espacio con cierto grado de dependencia. Por lo que se han aplicado procesos estocásticos dependientes que relacionan variables normales que tienen dependencia secuencial



- Los que asignan el concepto de pruebas aleatorias a la ocurrencia de cada sequía (modelación de eventos conjuntos). Este enfoque no está basado en resultados de intervalos de tiempo sucesivos, como en el caso anterior, más bien consideran la sequía completa como un evento aleatorio a ser investigado. Las sequías son eventos usualmente raros y los procesos de Poisson aplicados en este método para describirlas forman parte del desarrollo de la teoría estadística llamada la teoría renovación (Cox, 1967).

Uno de los problemas centrales de la estadística es la predicción de sequías, al respecto se han usado los siguientes dos enfoques:

- Desarrollo de relaciones estadísticas entre las variables a predecir. En este enfoque interviene la teoría general de correlación y regresión (Jhonston, 1972) que da una mayor contribución al respecto, pero la potencialidad de otros métodos son ignorados. Tales métodos como el análisis del componente vertical (Anderson, 1964), mediante el cual un conjunto de variables independientes pueden ser expresadas (en términos de un nuevo conjunto de variables independientes), o el análisis de factor y grupo (Lawly et al, 1975), que pueden reducir significativamente el número de variables o casos para ser estudiados (Yevjevich, Vujica, 1983).

- Los que utilizan información contenida en valores pasados de una variable que se pretende predecir su comportamiento futuro. Básicamente esta es la aplicación de la teoría de procesos estacionarios de Markov (Hannon 1960; Box et al, 1970). Sus limitaciones y potencialidades en el estudio de series de tiempo hidrológicas ha sido revisado por diversos investigadores (Delleur et al, 1976) (Yevjevich, Vujica, 1983).

El problema de actualizar parámetros con variaciones en el tiempo es importante, por lo que diferentes técnicas basadas en enfoques bayesianos (Harrison et al 1976) y técnicas de filtro (Kalman et al 1961) han sido desarrolladas y aplicadas en Hidrología (O' Conell, 1977 y Chao lin-Chiu 1978).

La validez de este enfoque presenta restricciones en análisis a corto tiempo. Sin embargo en períodos grandes las condiciones de dependencia serial pueden ser importantes para el estudio de sequías. Desafortunadamente la persistencia de las condiciones de ocurrencia de sequías no ha sido bien entendida, de manera que las mediciones estándar de dependencia serial al igual que los parámetros de autocorrelación o el espectro de la varianza son equivalentes a los parámetros de autocorrelación o el espectro de la varianza (Yevjevich, 1979). Una sugerencia alternativa ha sido el uso del análisis de rango (Hurst et al, 1969 y Lloyd 1979) para los períodos de tiempo no superpuestos y los métodos bayesianos (Yevjevich, Vujica, 1983).

La generación de muestras hidrológicas resulta beneficioso en acciones de planeación, diseño y operación de sistemas de recursos hidráulicos. Por lo que se han desarrollado dos enfoques en modelación y simulación estadística de sequías: (1), el uso de series de datos hidrológicos de variables que definen la sequía, usualmente de dependencia autorregresivo o ARMA (Autorregresivo, con promedios móviles) y (2), simulación de sequías con multi variables.

Algunas investigaciones significantes han sido hechas en la generación de series de tiempo hidrológicas mediante el modelo estacionario de Markov, que simula tanto las distribuciones marginales y las propiedades de dependencia con el tiempo. Sin embargo, a menudo se plantean dudas acerca de la preservación de características de las series con relación a las propiedades de los rangos de dependencia que son importantes en el estudio de las sequías. Por otro lado, la simulación de muestras multivariadas es aplicada a menudo a otros procesos tales como tormentas (Kavvas et al, 1975), sin embargo, ha tenido suficiente atención para la aplicación de este enfoque a las sequías. Debido a que en la generación de muestras de precipitación tiende a generar tiempos entre tormentas y valores de precipitación dentro de cada tormenta que podrían afectar el análisis de sequías y distorsionar la curva masa del déficit de agua durante cada sequía.

Los impactos de la sequía se incrementan con el tiempo debido a la dependencia de ésta con el desarrollo económico. Sus impactos son subrayados por eventos recientes tales como las sequías en los años 1972 y 1973 en la Unión soviética, la sequía de 1977-1979 en los Estados Unidos, en 1976 en Inglaterra, la dramática sequía en Sahel y en el Este de Africa en los inicios de

los setentas, el registro de sequías en Australia y Brazil, . . . etc. Esto ha hecho que las organizaciones internacionales, principalmente aquellas interesadas en desastres naturales, ambientales, producción de alimentos, crecimiento poblacional y desertificación a menudo organizan conferencias y simposios para tratar los problemas relacionados con las sequías.

### **I.1.1. Características de las sequías en México**

Los efectos de las sequías en México han sido muy intensas durante los últimos años. Desde 1977 hasta los inicios de 1980 el déficit de lluvia causó muchas pérdidas en la agricultura y la ganadería. El nivel de almacenamiento de las presas en 1980 limitó la generación de energía eléctrica.

Las investigaciones sobre este tema en el país son escasas en comparación con los estudios alcanzados en otros fenómenos hidrometeorológicos. Ello es debido a que las manifestaciones del fenómeno de la sequía (inicio y término) no están fácilmente definidas y pueden verse únicamente a través de sus consecuencias. Además el hecho de que las sequías tienen diferentes significancia para los diferentes especialistas que no han permitido establecer criterios y principios uniformes que podrían explicar su dinámica e impactos.

Los aspectos de las sequías menos conocidos en México son sus recurrencias en el pasado, sus características hidrometeorológicas y sus impactos económicos y sociales; de manera que a continuación se expondrá un sumario general con el propósito de establecer una secuencia cronológica de recurrencias y evaluar su importancia en las eras antigua, colonial, moderna y contemporánea:

### **I.1.2. Sequías en el México antiguo.**

Aunque el conocimiento disponible y las fuentes de información no son bastante precisas para el establecimiento de la extensión y características de las sequías de esa época. Los datos

indican que la sequía fue un fenómeno frecuente y sus efectos devastadores tuvieron impacto en la economía agrícola del México prehispánico (Sancho y Cervera, 1983)

Las fuentes indígenas y las crónicas antiguas mencionan que en aquellos años cuando "llovió fuego" o de que la lluvia no fue suficiente, las cosechas de maíz se perdieron, los niveles de los lagos disminuyeron, las chinampas tocaron fondo y los demás cultivos fueron diezmados.

En los años de sequía las autoridades de la población en el Valle de México usaron diversas formas para combatir sus impactos, se prohibió tomar maíz fuera del Valle de México (bajo pena de muerte). El maíz fue comprado en otras provincias y recurrieron a otras formas de alimentación a base de raíces de tule, peces, ranas y camarones de los grandes lagos.

### **I.1.3 Sequías en la época colonial (1521 - 1821).**

A pesar de que no hay estudios previos para consulta, investigaciones del período 1521 - 1821 revelan 50 casos de sequías en el Valle de México y 26 casos en el área del Bajío; de todos ellos, se reportan cinco que tuvieron dos años consecutivos (1597 - 1598, 1720 - 1721, 1641 - 1642, 1701 - 1702 y 1808 - 1809) y dos se prolongaron hasta tres años (1616 - 1617 - 1618 y 1808 - 1809). Cuando la sequía coincidía con otros fenómenos meteorológicos, tales como heladas y granizo, causaba catástrofes agrícolas de la época colonial, como la crisis agrícola de 1695, 1785 y 1808 - 1809 (Sancho y Cervera, 1983).

Aparte de la escasez y altos costos de especulación, las crisis agrícolas provocaron grandes movimientos migratorios, propagación e intensificación de epidemias, paro de las actividades agrícolas, desempleo en el campo y ciudades, muertes masivas de indígenas, tensión social en las ciudades y ocasionalmente levantamiento y disturbios. Las sequías de 1624, 1695, 1749, 1785 y 1808 - 1809 tuvieron esas características.

#### **I.1.4 Sequías en el siglo XIX (1819 - 1919).**

Las investigaciones de sequías en este período muestran que ocurrieron fenómenos devastadores como en la época colonial, sus impactos fueron sentidos en el sector económico.

La información disponible para el período 1821 a 1874 es muy escasa debido a la falta de fuentes de información adecuada y reportes de actividades agrícolas. Durante este período 11 sequías fueron registradas. En contraste para el período desde 1875 a 1910 se encuentran fuentes continuas y representativas que puntualizan la existencia de 29 años secos en 35 años del período. La más destacadas y severas sequías, en términos de su amplitud e impacto económico y social, fueron las de 1822 - 1823 y 1834 - 1835 en Yucatán, 1854 en Querétaro y la de 1868 que afectó a los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Aguascalientes, Nuevo León, Coahuila y el Valle de México. Durante el tiempo del Porfiriato, las sequías mas severas que ocurrieron fue en los años 1872, 1875, 1884 - 1885, 1891 - 1892, 1901 y 1908 (Sancho y Cervera, 1983).

#### **I.1.5 Sequías en el período 1910 - 1977**

Investigaciones realizadas en este período muestran la existencia de 38 años secos. También se encontró sequías consecutivas para los siguientes años: 1917 - 1928, 1932 - 1935, 1937 - 1939, 1949 - 1951, 1969 - 1972 y 1975 - 1977. Además se reportan sequías muy severas en los años 1935, 1953, 1957, 1960, 1962 - 1969 y 1977. Por lo anterior, se puede afirmar que desde 1930 se observan fluctuaciones climáticas que están siendo recurrentes en México. En términos de regiones y de acuerdo a las fuentes de información, se tiene que los estados afectados seriamente son: Coahuila con 22 sequías reportadas en el período en cuestión, Nuevo Laredo con 18, Chihuahua con 13 y Sonora y Tamaulipas con 12 años secos cada uno (Sancho y Cervera, 1983).

Aunque no es abundante la información colectada en este período para este fenómeno, se ha detectado que cuando se presentaban sequías extremadamente severas,

caía la producción de granos y los cultivos comerciales, por lo que se llevaba a cabo la exportación de productos agrícolas y ganaderos .

## **I.2 Características de las sequías en Sinaloa.**

Las sequías afectan el régimen pluvial y como consecuencia éste afecta las actividades humanas. Aunque en el presente no se tiene una metodología específica para la predicción de sequías con suficiente grado de confianza, ya sea sobre una base anual o estacional, se realizan algunas inferencias del comportamiento de las sequías a través de análisis estadísticos de registros históricos.

Para el análisis estadístico con base en 160 estaciones climatológicas con un mínimo de 4 años de registro, con datos no disponibles y longitudes de registro diferente; se procede en primer lugar a completar los datos homogéneos mediante análisis de regresión y correlación múltiple.

La precipitación total anual de cada estación por períodos de uno, dos, tres y cinco años continuos son usados para el análisis. La media es usada como parámetro indicativo del valor promedio de la precipitación. Diferentes distribuciones de probabilidad son aplicadas a las precipitaciones anuales para saber cual es la que mejor se ajusta. Los resultados obtenidos mediante esta técnica son probabilidades de precipitación anual iguales o mas grandes que el 75% de la precipitación media anual (S.A.R.H. 1989)

También se obtienen curvas que definen las características del área o extensión, magnitud, duración y frecuencia de precipitaciones para el estado. Del mismo modo, en función de la extensión e intensidad de la precipitación, se obtienen las sequías más severas de los últimos 40 años incluyendo 1977, 1978 y 1979. La figura 2 presenta una comparación gráfica de diferentes sequías. De esta gráfica puede verse que la sequía de 1953 fue la más severa en el período estudiado y la sequía de 1977 ocupó el tercer lugar.

Durante el año de 1979 y en los inicios de 1980 existen reportes de las áreas afectadas por el retraso de las lluvias o de pequeños suministros de agua a las presas. Los

impactos causados por esta sequía fueron alarmantes en el Norte de Sinaloa, ya que se perdieron la totalidad de los cultivos.

Los bajos almacenamientos de agua implicaron serias restricciones en las áreas bajo riego, de manera que 200,000 has de doble cultivo no se sembraron, además se redujo la producción de energía hidroeléctrica que ocasionó implementar un programa de cortes deliberados de energía para las ciudades más importantes.

Los sectores de la economía más afectados en 1978 - 1980 fueron la agricultura y la ganadería con grandes pérdidas económicas.

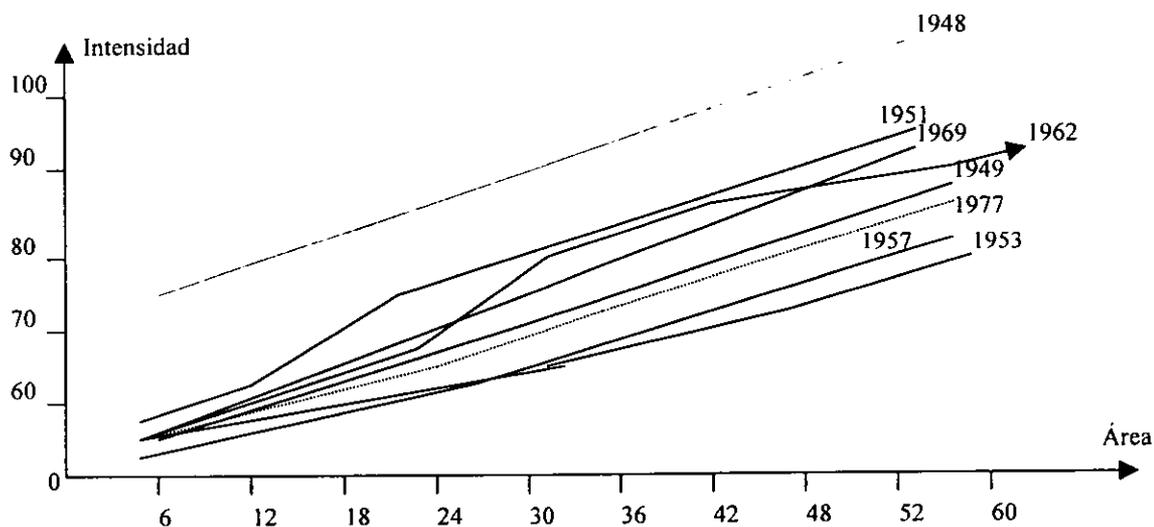


Fig. 2 . Área-intensidad de las sequías más severas en los últimos 40 años

FALTA PAGINA

No. **10**

## **2. CARACTERÍSTICAS DEL ESTADO DE SINALOA.**

### **2.1 Localización, límites y extensión.**

El estado de Sinaloa se ubica en el Noroeste del país a los 22 ° 30' 40" y 27° 02' 42" de latitud Norte y a los 105° 23' 20" y 109° 28' 48" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich al Norte limita con los estados de Sonora (Noroeste) y Chihuahua, al Sur con Nayarit (Sureste) y al Este con Durango, al Oeste con las aguas del Golfo de California y del Océano Pacífico. La superficie del estado es de 58,328 km<sup>2</sup>, ocupa el décimo séptimo lugar a nivel nacional, lo que representa el 3.0% de la superficie de la República Mexicana. Cuenta con 608 km<sup>2</sup> de superficie insular, 17,751 km<sup>2</sup> de plataforma continental, 656 km de litoral, 221,600 has de lagunas litorales y 57,000 has de aguas continentales. La topografía en Sinaloa alcanza alturas que van desde la zona de litoral, hasta las estribaciones de la sierra, donde se reportan alturas de 2780 msnm (INEGI, 1995).

### **2.2 Fisiografía.**

En el estado de Sinaloa es posible diferenciar dos provincias fisiográficas (D.G.C., 1981), misma que comparte con los estados vecinos. La primera domina la porción Oeste y se denomina Llanura Costera del Pacífico, la segunda conocida como Sierra Madre Occidental y ubicada al Este de la entidad. La figura 3 presenta el marco fisiográfico general de la República Mexicana.

La Provincia Llanura Costera del Pacífico, se presenta en una franja orientada NW-SE, paralela a la costa y limitada hacia el Oeste por el Golfo de California, posee elevaciones que varían desde el nivel del mar hasta los 450 msnm; se caracteriza por la homogeneidad de sus topofomas de llanuras con lomeríos bajos; sin embargo es posible diferenciar algunos accidentes que permiten subdividirla en tres subprovincias, siendo estas: Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa, Costera de Mazatlán y Delta del Río Grande Santiago. Geomorfológicamente esta provincia refleja un ciclo de relativa madurez con desarrollo importante de suelos. La figura 4 presenta la fisiografía del estado de Sinaloa.



### PROVINCIAS FISIOGRAFICAS

- I.- Península de Baja California
- II.- Llanura Sonorense.
- III.- Sierra Madre Occidental.
- IV.- Sierras y Llanuras del Norte.
- V.- Sierra Madre Oriental.
- VI.- Gran Llanura de Norteamérica.
- VII.- Llanura Costera del Pacífico.
- VIII.- Llanura Costera del Golfo Norte.
- IX.- Mesa del Centro.
- X.- Eje Neovolcánico.
- XI.- Península de Yucatán.
- XII.- Sierra Madre del Sur.
- XIII.- Llanura Costera del Golfo Sur.
- XIV.- Sierras de Chiapas y Guatemala.
- XV.- Cordillera Centroamericana.

### MARCO FISIOGRAFICO NACIONAL

Fig. 3. Marco Fisiográfico Nacional (INEGI, 1995)

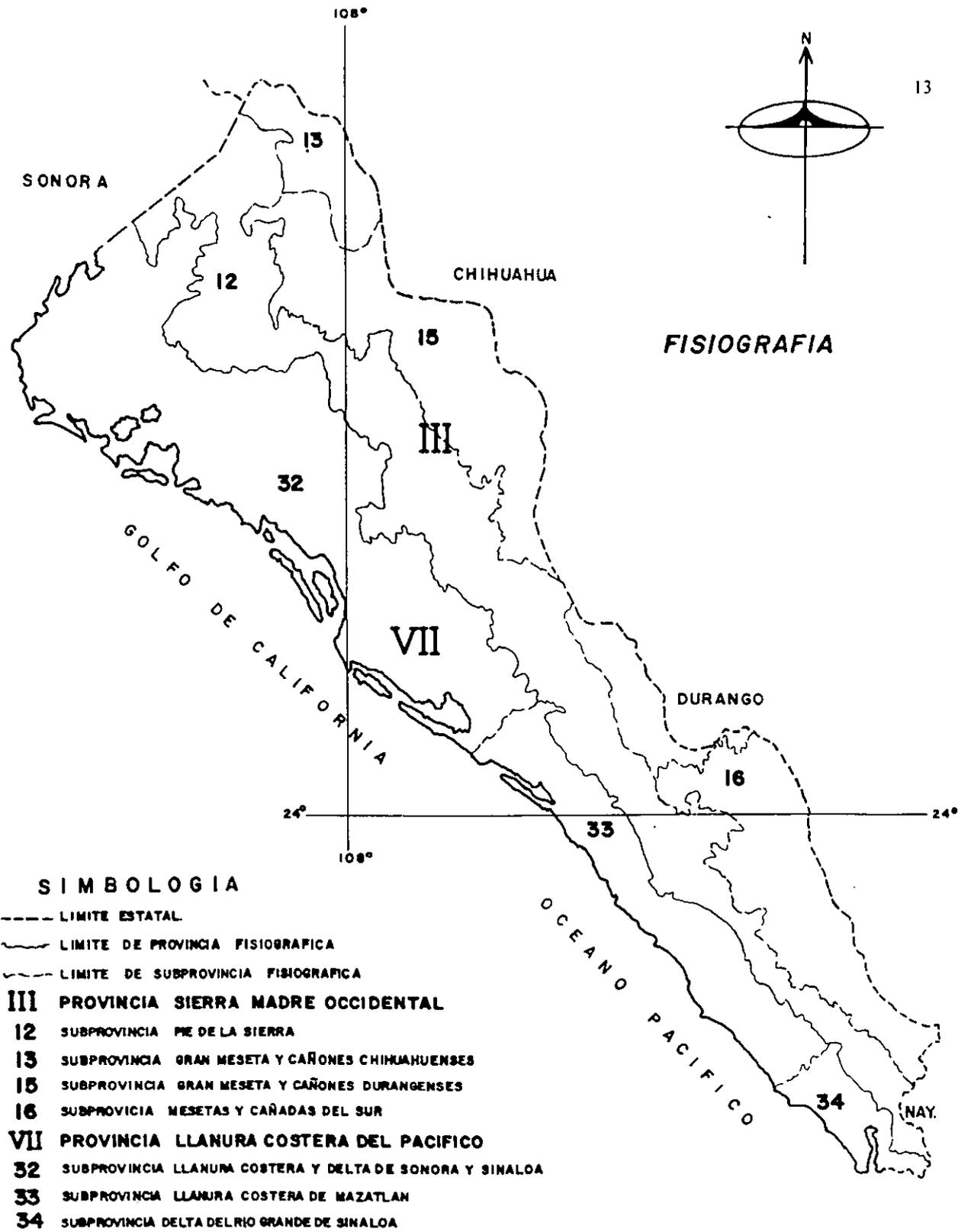


fig. 4. Fisiografía del estado de Sinaloa (INEGI, 1995).

Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa. Se ubican al Noroeste de la entidad y se prolongan al estado de Sonora. Sus rasgos distintivos son la asociación de topofomas de llanuras ciénegas, zonas salinas, dunas, playas y barras de arena; los relieves de sierras localizadas en el extremo Noroeste le dan la característica a esta subprovincia.

Subprovincia Costera de Mazatlán. Localizada en la parte central del estado, constituyendo la región media de la Provincia Llanura Costera del Pacífico, siendo además la más extensa, en la cual dominan topofomas de llanuras con lomeríos bajo esculpidos sobre zócalos rocosos y playas hacia el límite costero (INEGI, 1995).

Subprovincia Delta del Río Grande de Santiago. Situada en el extremo Sur del estado, es la de menor extensión, diferenciándose de las anteriores por sus llanuras costeras, generalmente salinas y sujetas a inundación.

Provincia Sierra Madre Occidental. Delimitada por una franja de orientación NW-SE, paralela y colindante con la provincia fisiográfica Llanura Costera del Pacífico ubicada al Oeste. La altura de sus relieves varía de los 100 hasta los 2780 msnm. Esta provincia se conforma por sierras altas y bajas, asociadas con valles y cañones, que reflejan un ciclo geomorfológico juvenil. Así, elementos fisiográficos más específicos, permiten la definición de cuatro subprovincias enmarcadas dentro de la Provincia Sierra Madre Occidental. La figura 4 presenta la ubicación de esta provincia (INEGI, 1995).

Subprovincia Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses. Los rasgos fisiográficos más sobresalientes se hallan expuestos en los estados de Sonora y Chihuahua. En Sinaloa solo se aprecia en la porción Norte, en una extensión pequeña. Las topofomas de mayor relevancia pertenecen a sierras altas, con cañones abruptos que conforman el paisaje típico; valles y lomeríos con llanuras asociadas complementan el panorama.

Subprovincia Pie de Sierra. Su delimitación forma un cinturón alienado NW-SE, atravesando longitudinalmente la entidad. Se caracteriza por topofomas serranas con lomeríos y valles asociados dominando en el extremo Noroeste y porción media de esta subprovincia;

mientras en el extremo sureste es patente la presencia de lomeríos y valles sobre las topoformas de sierras. Esta subprovincia expone rasgos fisiográficos que denotan una transición entre topoformas de alto relieve y aquellas que se encuentran hacia la costa, que son parte de un ciclo geomorfológico relativamente maduro.

Subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses. Situada al extremo Este del estado, configurándose topoformas bien definidas de serranías altas y escarpadas con abundancia de cañones, que constituyen el paisaje típico.

Subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur. Las topoformas de sierras con relieve escarpado, cañones ásperos y prolongados rigen el panorama de esta subprovincia, cuya localidad representativa se sitúa en el extremo Sureste de Sinaloa.

### **2.3 Climas.**

Las particularidades del clima en Sinaloa están regidas por los factores planetarios tales como: latitud y longitud, que unido a otros elementos como: la altitud, la circulación atmosférica y la cercanía del Océano Pacífico y vinculado a esto la presencia de la barrera que representa la Sierra Madre Occidental propician variaciones en la precipitación, temperatura y evaporación que es lo que ha dispuesto la gama climática de la entidad.

La variabilidad regional del clima está condicionada en gran medida por la intervención de masas de aire húmedo en las costas y en las laderas montañosas que bordean al Océano Pacífico y el Golfo de California, así pues no sólo el factor orográfico condiciona la distribución de lluvias en la entidad, también existen las vías de carácter convectivo típicas del verano, producto del calentamiento de masas de aire que asciende verticalmente y asociadas con gran nubosidad, lo que viene a proveer de intensas lluvias, por otro lado existen lluvias que resultan del choque de masas de aire con diferente temperatura y que desarrollan un movimiento ciclónico (lluvias ciclónicas), esto ocurre principalmente en verano y principio de otoño. Como consecuencia de lo anterior y sumado a los demás factores que intervienen, los climas son diversos y se manifiestan en distintas partes del estado. Basándose en el sistema de clasificación climática empleada por Köppen y

modificada por Enriqueta García (1973) se pueden identificar en la entidad los siguientes tipos climatológicos.

Muy seco-muy cálido. Localizado en las cercanías de la bahía de Perihuate sobre la costa y hacia el extremo Noroeste de la entidad; registra una temperatura media anual de 22° a 24°C y posee una precipitación media anual de 100 - 400 mm.

Seco-muy cálido. Se encuentra a lo largo de la llanura costera en la faja donde se ubica la agricultura de riego, en la porción Noroeste de la entidad, la temperatura se encuentra generalmente de 24° a 26°C, con excepción en la Sierra San Francisco ubicada en el límite con Sonora donde la temperatura media es menor que 22°C y en la porción Suroeste del poblado El Fuerte donde la temperatura media es mayor a los 26°C con precipitación media anual de 400 - 500 mm (INEGI, 1995).

Semiseco-muy cálido. Se localiza en la porción Oriente, entre las zonas de valles y el límite con la Sierra Madre Occidental, se presenta esta franja abarcando desde el Noroeste de Mazatlán hasta los límites con Sonora con precipitación media anual de 500 a 800 mm y temperaturas de 22° a 24°C.

Cálido-subhúmedo. Se le ubica en la parte baja de las poblaciones de Chinobampo, Bacurito, Badiraguato, Mazatlán, Escuinapa y Teacapán, su temperatura media anual supera los 26°C, la precipitación oscila de 700 a 1200 mm, pero en el Sureste del estado tiene rangos mayores alcanzando hasta 1500 mm (Gbn. del edo. de Sinaloa, 1993).

Por último se tienen otros tipos de climas de menor importancia que se presentan dentro del estado son los semicálidos-semihúmedos y templado-subhúmedo, entre otros localizándose, la mayoría de estos en la porción Noroeste y con los límites con Chihuahua en las partes de mayor altura dentro de la entidad, con precipitación media de 800 a 1200 mm; alcanzando en el Sureste hasta 1500 mm. y temperatura que oscila entre 14° a 22°C. La figura 5 presenta la ubicación de los climas en Sinaloa.

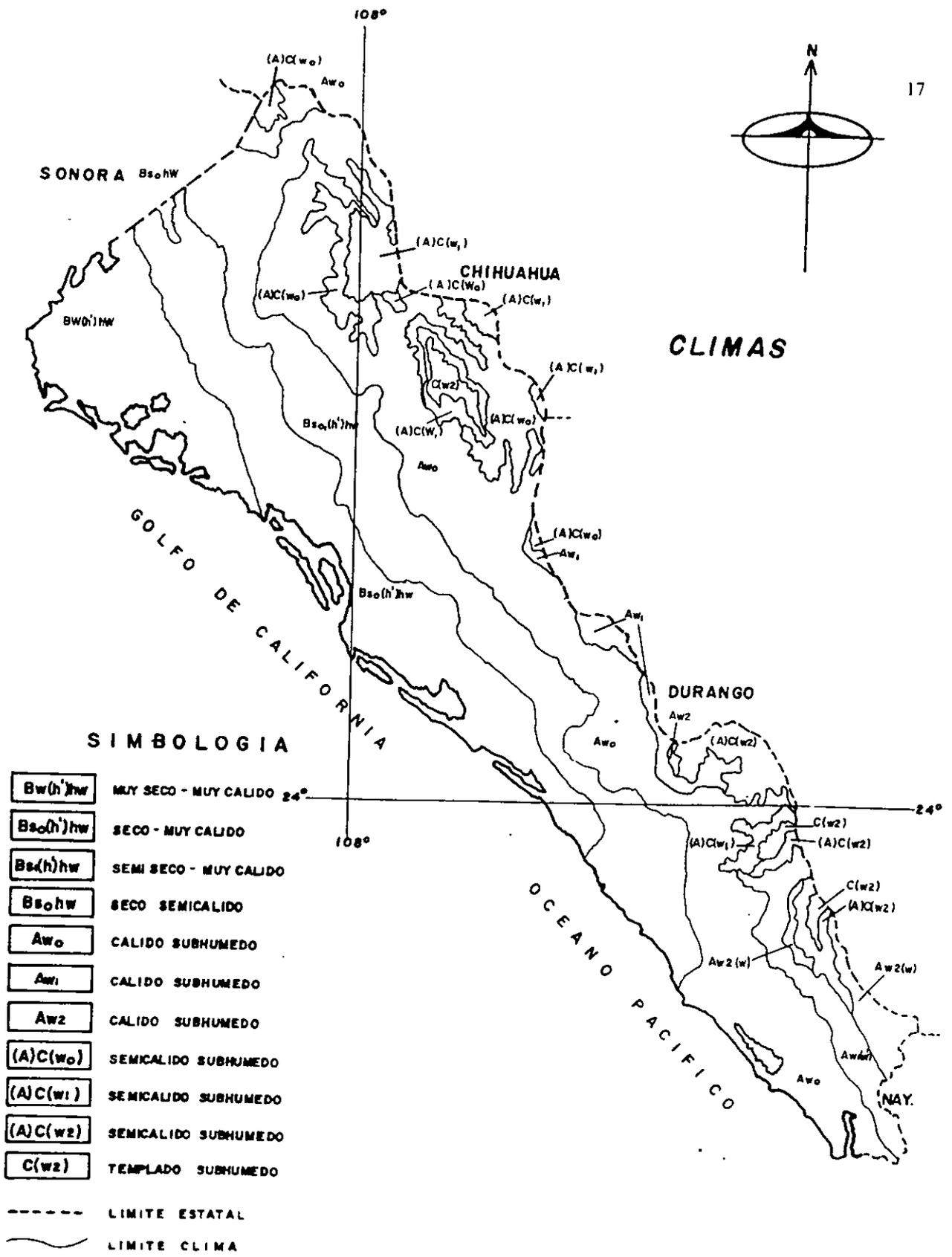


Fig. 5. Climas del estado de Sinaloa (INEGI, 1995).

## **2.4 Temperatura.**

Con lo que respecta a la temperatura se ha observado que los valores de la carta de isotermas muestran amplia variación e incluso en zonas locales, de Norte a Sur y de la Costa a la Sierra como se puede apreciar en la figura 6. Provincia Llanura del Pacífico; en su porción Sureste, dentro del estado, la isoterma de mayor valor es la de 26°C y en una zona muy local de la Sierra Madre Occidental en la porción Noroeste.

En la Provincia Llanura Costera del Pacífico el rango de mayor distribución es el que va de 24° a 26°C de temperatura media anual.

La Provincia Sierra Madre Occidental. Aquí el trazo de las isotermas siguen la misma orientación preferencial que el de las sierras (Noroeste-Sureste) y su valor tiende a disminuir hacia el Oriente, el valor más alto es el de la isoterma 24°C, ubicada en la zona de mayor altitud dentro de la entidad (INEGI, 1995).

## **2.5 Hidrología superficial.**

La descripción del comportamiento del agua superficial se hará tomando como referencia dos aspectos fundamentales: en primer término se aludirá al análisis de la red hidrográfica como elemento natural y como segundo aspecto la descripción de las obras y actividades para la utilización del recurso.

El inicio lo constituye el encuadre del estado con la división hidrológica de la República Mexicana realizado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y adecuada por la Dirección General de Geografía (INEGI). Con el fin de estudiar cada región hidrológica de manera más detallada, es necesario recurrir a otro nivel de información que es el de cuenca. A partir del análisis por cuenca se otorga una mejor descripción de las características hidrológicas del medio, así como de su infraestructura, lo que permite dimensiones de manera más real la capacidad potencial de escurrimiento.

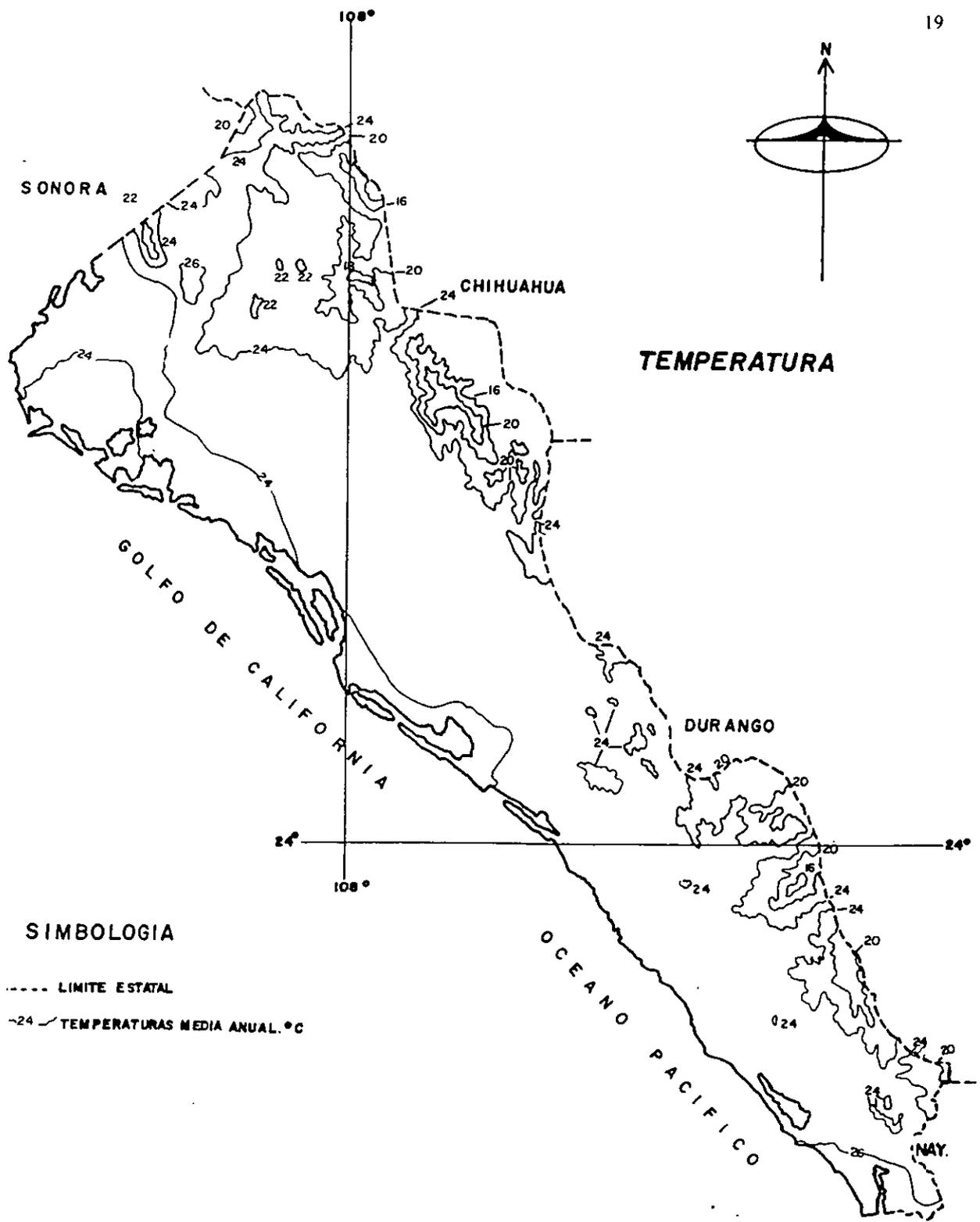


Fig. 6. Isotermas para el estado de Sinaloa

La zonificación de la entidad de acuerdo a un rango de escurrimiento determinado a partir de un método indirecto empleado por el Departamento de Hidrología de la Dirección General de Geografía, constituye un medio clave en la captación de agua superficial.

### **2.5.1 Panorama general del agua superficial en el estado de Sinaloa.**

La entidad está enmarcada en las siguientes regiones hidrológicas: 10, Sinaloa y 11, Presidio -San Pedro, las cuales forman parte de la vertiente Occidental

De las anteriores regiones hidrológicas, la de mayor importancia para el estado es la número 10, Sinaloa; localizada al Noroeste del país, misma que abarca los estados de Durango, Chihuahua y Sonora, en ella quedan incluidas todas las corrientes que descargan en el Océano Pacífico, desde los 23° 25' hasta 25° 48' Latitud Norte; dentro del estado de Sinaloa las corrientes principales corresponden a los ríos: Quelite, Piaxtla, Elota, San Lorenzo, Culiacán, Tamazula, Humaya, Mocorito, Sinaloa y Fuerte, entre otros. Presentan una dirección en términos generales de Noreste a Suroeste hasta desembocar al Océano Pacífico, o en el Golfo de California, dichas corrientes se originan en el flanco Oeste de la Sierra Madre Occidental o bien en las estribaciones de dicho flanco.

Las principales corrientes fluyen en general por zonas con desniveles adecuados para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica, así como por zonas con una topografía propicia para la creación de vasos de almacenamientos y finalmente cuando traspasan la zona serrana y atraviesan la zona de llanuras, su uso se destina a la actividad agrícola (INEGI, 1995).

La región hidrológica 10, presenta menor importancia que la anterior, debido a la poca extensión dentro del estado y a la escasa infraestructura hidráulica que presenta.

En la actualidad sin contar almacenamientos menores, ni presas derivadoras se tienen un total de 13 presas siendo las de mayor importancia la Miguel Hidalgo (Mahone), Adolfo López Mateos y Sanalona. La tabla 1 presenta las presas que se encuentran en el estado de Sinaloa. No obstante la infraestructura actual, no se ha alcanzado el desarrollo completo en el uso de las aguas

Tabla 1. Presas del estado de Sinaloa

P R E S A S												
NOMBRE	CORRIENTE HIDROGRÁ FICA	MUNICI PIO	AÑO DE TERMINA CIÓN	CORTINA			CAPACIDAD (millones de m <sup>3</sup> )			PROPÓ SITO	CAPACIDAD DE LA HIDROELECTRI CA (Kw)	CAPACIDAD MÁXIMA DEL VERTEDOR m <sup>3</sup> /s
				TIPO	ALTURA (m)	LONGITUD (m)	UTIL	AZOLVE	TOTAL			
MIGUEL HIDALGO (Mahone)	Río Fuerte	El Fuerte	1964 2da. etapa	ER	81	2905	1930	350	3,355	R/C/G	59,400	7,550
JOSEFA ORTIZ DE D.	Arroyo Alamos	El Fuerte	1967	ER	44	2730	460	35	607	R/C	—	1,870
GUSTAVODÍAZ ORDAZ (Bacurato)	Río Sinaloa	Sinaloa	1983	—	101	870	1610	190	2,900	R/G	90,000	7,410
GUILLERMO BLAKE A. (El Sabinial)	Arroyo Ocotomi	Sinaloa	1985	—	81.2	375	1260	40	487	R	—	3,000
EUSTAQUIO BUELNA	Río Moconito	Salvador Alvarado	1975	—	41	2000	115	35	344	R	—	2,170
ADOLFO LÓPEZ M	Río Humaya	Culiacán	1964	ER	105.5	765	2462	48	3,160	R/C/G	90,000	5,600
SANALONA	Río Tamazula	Culiacán	1948	ER	81	1,031	804	39	845	R/C/G	14,000	6,800
JOSÉ LÓPEZ PORTILLO (Comedero)	Río San Lorenzo	Cosala	1981	TE	136	400	2100	700	3,400	R/G	90,000	3,000
AURELIO BENASSINI (El Salto)	Río Eioia	Eioia	1988	—	73	370	345	70	810	R	—	4,356
LOS HORCONES	Arroyo Mecatán	Mazatlán	-----	-----	22	780	—	—	14	R	—	—
LAS HIGUERAS	Arroyo Las Higuera	El Rosario	-----	—	27	366	—	—	13	R	—	—
AGUSTINA RAMÍREZ	Arroyo Escuinapa	Escuinapa	-----	—	38	100	—	—	7.0	R	—	—
LA CAMPANA	Arroyo La Campana	Escuinapa	—	—	18.5	400	—	—	6.5	R	—	—

TIPO DE PRESA  
TE = Tierra  
CB = Contrafuente  
ER = Enrocamiento  
PG = Gravedad  
AC = Arco

PROPOSITO  
R = Riego  
C = Control de avenidas  
G = Generación de Energía Eléctrica.  
A = Abastecimiento

Fuente: Gerencia Estatal de la  
Comisión Nacional del Agua, 1991

superficiales, para ello se está llevando a cabo a la práctica el proyecto hidráulico de mayor trascendencia en el Noroeste del país denominado Sistema Hidráulico del Noroeste (SHINO), cuyo objetivo es la transferencia de agua del norte de Nayarit y Sur de Sinaloa, para el riego con capacidad agrícola, tanto en el Norte de Sinaloa y Sur de Sonora, el proyecto contempla presas de almacenamiento, derivadoras, áreas para riego y obras de intercomunicación entre las cuencas, permitiendo así, un incremento en la superficie de cultivo de 940,000 has, correspondiendo el 10% al estado de Nayarit, 30% a Sonora y el 60% al estado de Sinaloa para ello se empleará 1,200 millones de m<sup>3</sup> anuales de agua aproximadamente.

## **2.6 Región hidrológica 10, Sinaloa.**

Esta región abarca una superficie de 102,922.18 km<sup>2</sup>, por lo que se sitúa en el sexto lugar, atendiendo a la extensión de las demás regiones hidrológicas del país. En el estado de Sinaloa se encuentra su porcentaje mayoritario y corresponde al 46.17% (48,079.15 km<sup>2</sup>), comprendiendo parte de todas sus cuencas. La figura 7 presenta la división hidrológica para el estado de Sinaloa.

### **2.6.1 Cuenca del Río Fuerte.**

Es la cuenca más importante de la región hidrológica 10, tanto por su extensión como por los escurrimientos que en ella se generan, abarca un área total de 33,835.85 km<sup>2</sup>, de los cuales 6,719.14 km<sup>2</sup> pertenecen al estado de Sinaloa y su precipitación media anual es de 654.80 mm. La geometría que presenta es de forma arqueada con orientación Sureste-Noroeste en su parte inicial y en el cierre presenta forma alargada con orientación al Suroeste. (figura 14), la corriente superficial mas importante de la cuenca es el río Fuerte.

En la cuenca del río fuerte existen 42 estaciones hidrométricas distribuidas estratégicamente, las de mayor importancia son: la estación San Francisco, ubicada en el río fuerte cuyo registro promedio de caudal es de 2490.57 millones de m<sup>3</sup>, estación Palo Dulce ubicada sobre el río Chinipas, registra la entrada de esta corriente a la entidad con un volumen medio anual de 983.16 millones de m<sup>3</sup>, procedentes del estado de Chihuahua, estación Cazanate, sobre el arroyo

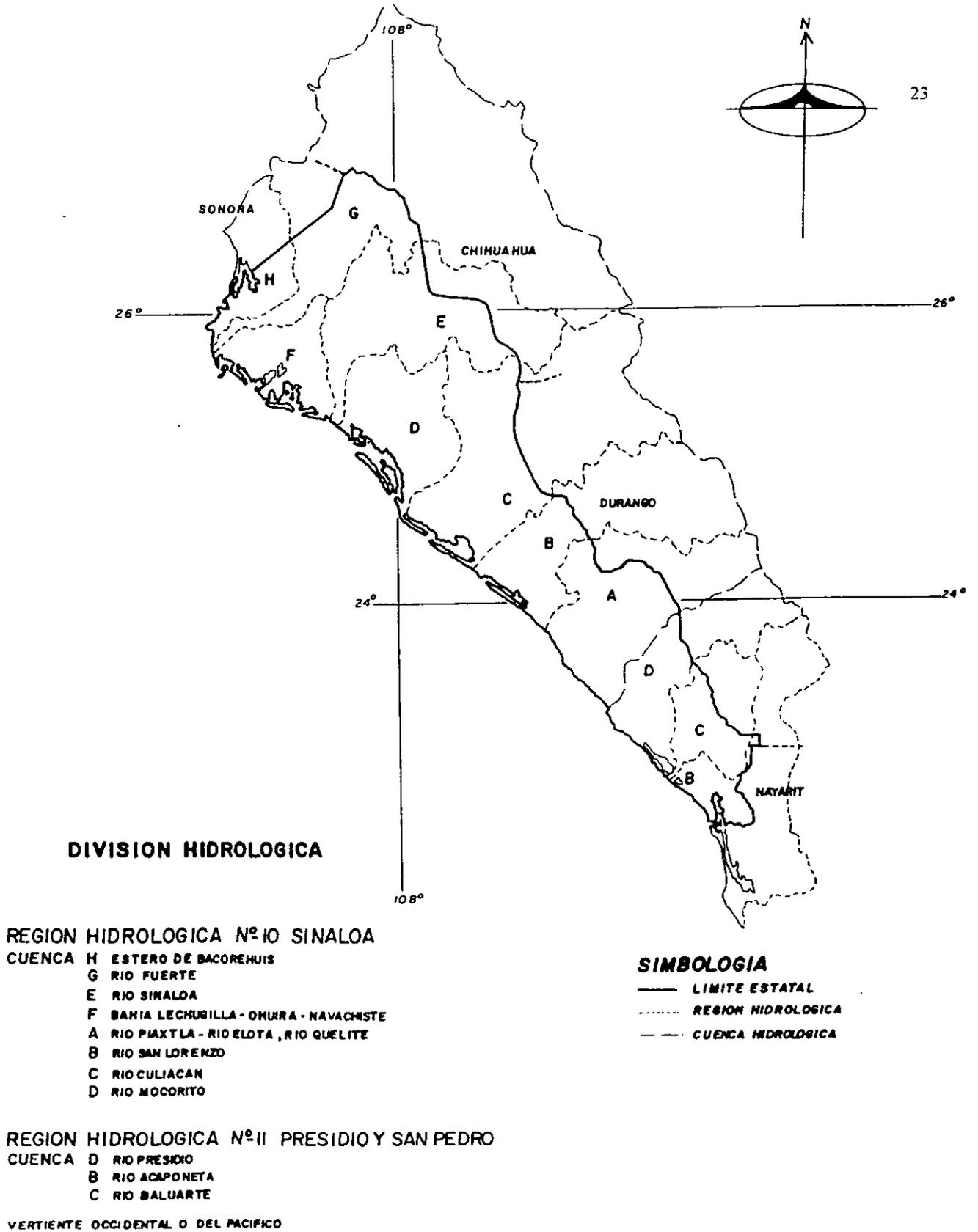


Fig. 7. División hidrológica para el estado de Sinaloa (INEGI, 1995)

Álamos, la cual registra un volumen medio de 118.92 millones de  $m^3$ /año proveniente de Sonora, estación Las Cañas sobre el río fuerte registra un volumen medio anual 4,129.49 millones de  $m^3$  y la estación San Miguel Zapotitlán sobre el río Fuerte que da información referente al gasto de agua que desemboca en el Golfo de California que es de 1,248.39 millones de  $m^3$  (INEGI, 1995).

En la parte baja de la cuenca se ubican los distritos de riego 076, Valle del Carrizo con una superficie aproximada de 42,578 has y el 075 río Fuerte con una superficie de 98,690 has, correspondiente a los municipios de Ahome, El Fuerte y Sinaloa de Leyva, los principales cultivos son trigo, frijol, sorgo, soya, maíz, arroz y hortalizas. La figura 8 presenta los distritos del riego de Sinaloa y la tabla 2 describe las características de los Distritos de Riego en el estado.

El agua superficial se destina preferentemente al uso agrícola y en menor escala están los usos doméstico, industrial y pecuario.

Para la porción de la cuenca perteneciente al estado de Sinaloa, se cuantificó un escurrimiento anual de 550.05 millones de  $m^3$ , procedentes de un volumen medio precipitado de 4399.73 millones de  $m^3$ /año y un coeficiente de escurrimiento de 12.51% . La tabla 3 describe los volúmenes de escurrimiento en Sinaloa.

### **2.6.2 Cuenca del estero Bocorehuis.**

Se encuentra en el Noroeste de Sinaloa entre los límites con Sonora y al Noroeste de la región hidrológica 10, con una superficie total de 3,769.36  $km^2$  dentro de la entidad esta cuenca tiene una extensión de 1,897.76  $km^2$ , con una precipitación total anual promedio de 346.09 mm y una pendiente general baja (Gbno. del edo. de Sinaloa, 1993)

Los rasgos hidrográficos dentro del estado están constituidos por una gran cantidad de arroyos de corta trayectoria y pequeños cauces que se pierden antes de desembocar en el Golfo de California.

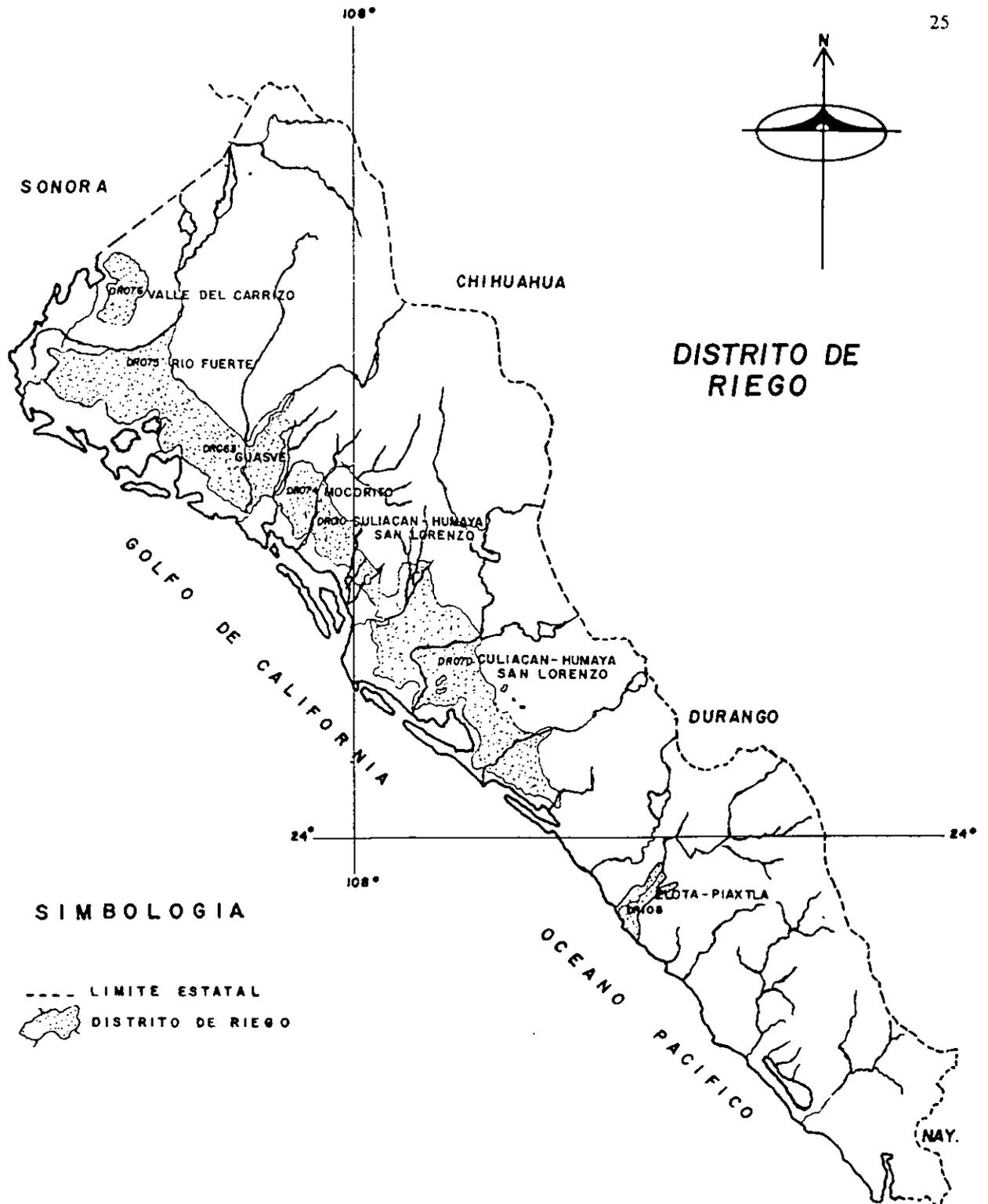


Fig. 8. Ubicación de los Distritos de Riego (INEGI, 1995).

Tabla 2. Características de los Distritos de Riego en Sinaloa.

Nombre y Número	Superficie (has)	Municipio	Canales principales					Canales secundarios		Longitud de drenes (km)	Cultivos principales	
			Nombre	Capacidad m <sup>3</sup> /s	Longitud (km)	Revestido (km)	Longitud (km)	Revestido (km)				
076 Valle del Carrizo	42,578	Ahome, El fuerte	C.P. Norte	2800	269	195	436.45	0.0	533.24	Trigo, Soya, Maiz, Sorgo y Hortalizas		
			C.P. Sur	3103	3885	11698						
075 Rio Fuerte	326,690	El Fuerte, Ahome, Sinaloa de Leyva	C.P. Valle del Fuerte	1350	790	0	2,144.0	163.0	2,610.0	Trigo, Frijol, Sorgo, Maiz, Soya y Arroz		
			C.P. Margen Derecha (Cahuahuas)	300	570	0						
063 Guasave	98,680	Guasave, Sinaloa de Leyva	C.P. Bamao	3998	455	455					Soya, Algodon, Maiz, sorgo, Frijol, Hortaliza y Frutales	
			C.P. Burtion	5.0 a 10.0	150	0						
			C.P. Sinaloa	500	650	650						
			C.P. Margen Derecha (Arroyo Ocoroni)	656	155	155			1,081.9	278.91		848.4
			C.P. Margen Izquierda (Arroyo Ocoroni)	1042	175	175						
			C.P. Dolores	10	125	125						
			C.P. Macipamaripita	20	152	152						
074 Mocorito	41,500	Angostura Salvador Alvarado Guasave	C.P. Humaya	400	290	290	420.28	156.1	395.5	Trigo, Maiz, Frijol, Soya, Sorgo y Hortaliza		
			C.P. Oriental El Dorado	880	870	0						
010 Culiacán Humaya San Lorenzo	272,595	Culiacán Navolato Angostura Salvador Alvarado Mocorito	C.P. Rosales	300	469	0					Trigo, Maiz, Frijol, Hortaliza, Sorgo, Arroz, soya, Frutales y Caña	
			C.P. Del Sur	300	469	0						
			C.P. Humaya	1000	1520	1520						
			C.P. San Lorenzo Viejo	50	30	0	3,401.35	1,176.46	3,384.23			
			C.P. San Lorenzo Nuevo	1100	635	635						
			C.P. Colorado	170	280	Revestido en Tramos						
			C.P. Colorado Nuevo	450	4028	Construcción						
			C.P. Rojo	85	110	0						
			C.P. Salto Norte	500	714	521	10.0	10.0	369.0			Maiz, Frijol y Sorgo
			C.P. Piaxtla San Lorenzo	743	1020	604						

Fuente: SARH, Distrito de Riego, 1991.

Tabla 3. Volúmenes de los escurrimientos en Sinaloa

Región Hidrológica	Cuenca Hidrológica	Área dentro del estado (km <sup>2</sup> )	Precipitación Media Anual en la Cuenca (mm)	Volumen Anual Precipitado Millones de (m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Escurrimiento en Porcentaje	Volumen de Escurrimiento Anual (millones de m <sup>3</sup> )	Vol. de Escurr. Anual que se interna al estado (millones de m <sup>3</sup> )	Vol. de Escurr. de la última estación Aguas Abajo (millones de m <sup>3</sup> )
RH 10 Sinaloa	H Estero de Bacorehuis	1,897.76	346.091	656.797	2.7169	17.8445		
	G Río Fuerte	6,719.14	654.805	4,399.729	12.5129	550.5351	3,592.6491	1,248.3959
	F Bahía Lechuguilla Ohuira Navachiste	4,038.36	330.132	1,333.98	5.5564	74.0782		
	E Río Sinaloa	8,280.16	799.377	6,618.972	13.6433	903.0492	1,035.7293	1,973.2415
	D Río Mocorito	7,171.426	626.904	4,519.164	10.5747	477.8883		
	C Río Culiacán	9,143.418	706.657	6,461.241	12.550	810.8983	1,995.2193	3,141.2757
	B Río San Lorenzo	4,121.247	636.204	2,621.957	12.595	330.2538	1,621.3788	1,621.3788
	A Río Piaxtla Río Elota Quelite	6,707.637	815.935	5,472.997	13.99	765.7134	1,026.750	1,918.5456
	D Río Presidio	3,924.097	1,006.028	3,947.751	14.2379	562.0769	682.984	983.8486
	C Río Baluarte	2,757.628	1,231.36	3,395.6349	15.4842	525.7869	56.00	1,706.9588
RH 11 Presidio San Lorenzo	B Río Acaponeta	1,743.57	954.988	1,665.0624	14.408	239.9029	142.223	142.223
	Total	5,650.411	726.83	41,092.506		5258.027	9,469.9488	12,735.866

El uso exclusivo para este recurso propicia el desarrollo de las labores pecuarias. El volumen medio anual precipitado en la entidad es de 656.80 millones de  $m^3$  con un coeficiente de escurrimiento de 2.72% el escurrimiento disponible para esta zona es de 17.85 millones de  $m^3$ /año.

### **2.6.3 Cuenca Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.**

Con una superficie de 4,038.37  $km^2$  localizada al Noroeste de la región hidrológica 10 y al Noroeste del estado de Sinaloa, con una precipitación total anual de promedio estimada en 330.136 mm y con una pendiente general baja, posee forma triangular, se encuentra limitada en la parte Norte-noroeste por la cuenca del río Fuerte, hacia la parte oriental por la cuenca del río Sinaloa, de la misma región hidrológica y por la porción Suroeste por el Golfo de California. En esta cuenca se originan varios escurrimientos de longitud restringida y de poca importancia que derivan su caudal hacia la cuenca Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste. En esta cuenca no se encuentra ninguna estación hidrométrica y la infraestructura hidráulica se restringe a la red de canales y drenes para irrigación, que en algunos casos drenan hacia cuerpos de agua interiores como la Laguna de Jupabampo. En gran parte de la cuenca se encuentran asentados los distritos de riego 075, río Fuerte y el 063, Guasave pertenecientes a los distritos de Ahome y Guasave, los cultivos más importantes en esta zona son: trigo, soya, sorgo, maíz, algodón, hortalizas entre otros (INEGI, 1995).

El empleo primordial del agua superficial es para uso agrícola seguido por el doméstico, industrial y pecuario, considerando las características hidrológicas de la cuenca se evaluó un coeficiente de escurrimiento de 5.56% con un volumen medio anual precipitado de 1,333.20 millones de  $m^3$ , que relacionado con el coeficiente de escurrimiento, determina un volumen drenado de 74.08 millones de  $m^3$  anuales.

### **2.6.4 Cuenca del Río Sinaloa.**

Posee una superficie total de 12,499.74  $km^2$  de los cuales 8,280.12  $km^2$  se encuentran dentro del estado de Sinaloa; existe en esta porción de la cuenca una precipitación media anual de

799.37 mm, una pendiente general que varía de la alta a media con excepción de la zona de planicie donde se considera baja, la geometría de esta área asemeja una escuadra, la corriente superficial de mayor importancia es el río Sinaloa, que tiene su origen en la Sierra Madre Occidental dentro del estado de Chihuahua. La cuenca cuenta con una pendiente de 0.19% y cuenta con once estaciones hidrométricas distribuidas la mayor parte de ellas sobre el río Sinaloa.

El distrito de riego 063 Guasave se localizó en la parte baja de la cuenca con una superficie de 98,690 has en los municipios de Guasave y Sinaloa de Leyva, los cultivos principales son: sorgo trigo, algodón, maíz, frijol, hortalizas y árboles frutales.

El agua superficial se emplea fundamentalmente en el uso agrícola y en menor escala están los de uso pecuario e industrial, la cuantificación del recurso agua en la cuenca del río Sinaloa arrojó un volumen medio precipitado de 6,618.99 millones de m<sup>3</sup> anuales y un coeficiente de escurrimiento de 13.64% lo que representa un volumen total escurrido de 403.05 millones de m<sup>3</sup>.

#### **2.6.5 Cuenca del río Mocorito.**

Se localiza en la parte central de la entidad abarca un área de 7,171.47 km<sup>2</sup> con una ocurrencia de precipitación media anual de 626.90 mm y una pendiente general baja. El río Mocorito representa la corriente principal de esta cuenca. además, cuenta con 3 estaciones hidrométricas, la de mayor importancia es la estación Guamúchil, que se encuentra ubicada aguas abajo de la presa Eustaquio Buelna y consigna un volumen medio anual de 101.55 millones de m<sup>3</sup> durante el período 1963-1981.

Dentro de la cuenca se encuentra una parte del distrito 010 donde se siembra principalmente trigo, maíz, frijol, hortalizas, soya y frutales (Gbn. del edo de Sinaloa, 1993)

El uso primordial del agua es en la agricultura y en segundo orden están la industria, pecuario y doméstico. Para esta cuenca se obtuvo un coeficiente de escurrimiento medio de 10.57% de un volumen medio anual precipitado de 4,519.16 millones de m<sup>3</sup> que determinan un volumen drenado de 477.89 millones de m<sup>3</sup>.

### **2.6.6 Cuenca del Río Culiacán.**

Esta cuenca ocupa el segundo lugar en cuanto a tamaño del área drenada, dentro de las que constituyen la región hidrológica 10, su forma asemeja un cuadrilátero irregular que colinda al Norte con las cuencas de los ríos Sinaloa y Fuerte; por el Este con la región hidrológica número 36 (cuenca del río Nazas), por el Sur con la cuenca del río San Lorenzo al Occidente con las cuencas de varios ríos menores. Tiene un área de 19,150.49 km<sup>2</sup> de los cuales 9,143.49 km<sup>2</sup>, pertenecen al estado de Sinaloa. En esta porción se ha determinado una precipitación media de 706.65 mm, la corriente principal de esta cuenca es el río Culiacán, el cual es formado por dos ríos que son: el río Humaya y Tamazula que se unen en la ciudad de Culiacán. En la cuenca se hayan 18 estaciones hidrométricas de las cuales 16 se encuentran en el estado de Sinaloa.

El distrito de riego 010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo, se localiza en la parte baja de la cuenca cubriendo una superficie total de 272,595, abarcando parte de los municipios de Culiacán, Navolato, Angostura, Salvador Alvarado y Mocorito, los cultivos característicos de este distrito son: trigo, maíz, frijol, hortalizas, sorgo, caña y frutales. Dentro de los usos principales del agua superficial destacan el uso agrícola, industrial, doméstico y pecuario. Para esta cuenca se obtuvo un coeficiente de escurrimiento medio de 12.55% y un volumen medio anual drenado de 810.90 millones de m<sup>3</sup> de un volumen medio precipitado de 6,461.24 millones de m<sup>3</sup> (INEGI, 1995).

### **2.6.7 Cuenca del río San Lorenzo.**

Con una superficie de 12,012.84 km<sup>2</sup>, de los cuales 4,121.25 km<sup>2</sup> pertenece al estado de Sinaloa, esta parte de la cuenca posee una precipitación media anual de 636.20 mm y una pendiente general de media a baja, su forma es alargada y se encuentra limitado en la parte Norte por la cuenca del río Culiacán, al Sur por los ríos Elota y Piaxtla, en el Noreste-Este por la cuenca del río Nazas y hacia el Oeste por el Océano Pacífico, la corriente principal es el río San Lorenzo. En la cuenca existe sólo una estación de aforo denominada Santa Cruz, misma que reporta un volumen medio anual de 1,621.37 millones de m<sup>3</sup> en el período 1944-1980. La porción Suroeste del distrito de riego 010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo se incluye en esta cuenca, los cultivos principales son trigo, maíz, frijol, hortalizas, sorgo y frutales. El uso del agua superficial en la

sierra es agrícola, siguiendo en importancia el pecuario y posteriormente el doméstico; considerando las características hidrológicas de la cuenca se evaluó un coeficiente de escurrimiento de 12.59% que relacionado con los 2,621.96 millones de m<sup>3</sup> anuales precipitados determinan un escurrimiento anual de 330.25 millones de m<sup>3</sup> dentro del estado (INEGI, 1995).

#### **2.6.8 Cuenca del Río Piaxtla-Río Elota-Río Quelite.**

Se ubica en la porción Sureste de Sinaloa y al Suroeste de la región hidrológica 36, tiene una superficie total de 10,444.10 km<sup>2</sup>, de los cuales 6,707.63 km<sup>2</sup> pertenecen a la entidad de Sinaloa, la precipitación media anual de esta porción de la cuenca es de 815.93 mm la pendiente fluctúa de moderada a baja, los rasgos hidrológicos más sobresalientes son los ríos Elota, Piaxtla y Quelite. En la cuenca existen 4 estaciones hidrométricas, la estación Acatitán que se encuentra sobre la corriente del río Elota, aguas abajo de la presa El Salto reporta un volumen medio anual de 396.30 millones de m<sup>3</sup> durante el período 1955-1982, la estación Ixpalino sobre el río Piaxtla ubicada en el poblado de Ixpalino consignó de 1953-1981 un volumen medio anual de 1,428.57 millones de m<sup>3</sup>, la estación El Quelite sobre el río Quelite afora 93.70 millones de m<sup>3</sup> anuales (INEGI, 1995).

El distrito de riego 108 Elota Piaxtla se haya en la parte baja de la cuenca y pertenece a los municipios de Elota, San Ignacio y Culiacán, los principales cultivos son: maíz, frijol y sorgo, el uso más común del agua superficial es el agrícola y en menor escala se tiene el pecuario, industrial y doméstico.

La evaluación del agua superficial está en función del volumen anual precipitado que es aproximadamente de 5,492.9 millones de m<sup>3</sup>, calculándose un coeficiente de escurrimiento de 13.99% y un volumen total drenado de 765.71 millones de m<sup>3</sup>.

#### **2.7 Región hidrológica 11 (Presidio-San Pedro).**

Está caracterizada por corrientes que descienden de los flancos de la Sierra Madre Occidental y desembocan en el Océano Pacífico se encuentra ubicada en el Noroeste del país,

incluye parte de los estados de Nayarit, Durango y Sinaloa, tiene una superficie total de 52,000 km<sup>2</sup> de los cuales 8,425.26 km<sup>2</sup> pertenecen a Sinaloa, la extensión de esta región dentro de la entidad corresponde una gran parte de las cuencas de los ríos: Acaponeta, Baluarte y Presidio.

El régimen de escurrimiento de cada cuenca se caracteriza por tener mas o menos definido tanto el período de avenidas como el de secas. El período de mayores escurrimientos se inicia generalmente con la temporada de lluvias que inicia a partir de los últimos días de junio y principios de julio, terminando en el mes de octubre, siendo septiembre el de mayor precipitación y el período de estiaje comprende los meses de noviembre a mayo, en el que los escurrimientos son prácticamente nulos.

### **2.7.1 Cuenca del Río Presidio.**

Se ubica en la porción Sureste del estado en el Noroeste de la región hidrológica 11, tiene una superficie total de 7,309.47 km<sup>2</sup>, pertenecen a Sinaloa la ocurrencia de precipitación media anual de 1,006.63 mm su geometría es de forma alargada con orientación hacia el Noroeste, encontrándose limitada por el Norte con la cuenca del río Piaxtla, al Sur con la cuenca del río Baluarte, al Oriente con la parte alta del río San Pedro y al Suroeste con el Océano Pacífico.

El río Presidio es la corriente principal de mayor importancia. Dentro de la cuenca existen seis estaciones hidrométricas, pero sólo dos se encuentran dentro de la entidad. Para esta porción de la cuenca, dentro del uso del agua superficial destacan el pecuario, industrial y en menor escala el agrícola.

En esta cuenca se obtuvo un coeficiente de escurrimiento de 14.24% y un volumen medio anual precipitado de 3,947.75 millones de m<sup>3</sup> y un volumen escurrido de 562.08 millones de m<sup>3</sup>.

### **2.7.2 Cuenca del Río Baluarte.**

Se localiza en el Sureste de Sinaloa y al Oeste en la región hidrológica 11 se encuentra rodeada por la cuenca del río Presidio por la porción Norte y Noroeste, la parte Noroeste-Suroeste

por la cuenca del río Acaponeta y al Suroeste tiene conexión con el Océano Pacífico, abarca una superficie total de 5,169.13 km<sup>2</sup> y dentro del estado se hayan 2,757.63 km<sup>2</sup>, con precipitación media anual de 1,231.36 mm que escurren por una pendiente que fluctúa de alta a baja, los rasgos hidrográficos más sobresalientes son los ríos Baluarte, Pánuco y Matatán (INEGI, 1995).

En la cuenca existen un total de cuatro estaciones hidrométricas, de éstas la estación Baluarte II, al Noroeste del municipio de Rosario y sobre el río Baluarte consigna un volumen medio anual de 1,706.95 millones de m<sup>3</sup> provenientes de Durango y parte de esta entidad. Durante el período 1948-1980. De los usos dados al agua, destacan en orden de importancia, el agrícola, pecuario e industrial.

Para esta cuenca se obtuvo un coeficiente de escurrimiento de 15.48% y un volumen medio anual precipitado de 3,395.63 millones de m<sup>3</sup>, que produce un volumen medio drenado de 525.79 millones de m<sup>3</sup> anuales.

### **2.7.3 Cuenca del Río Acaponeta (B).**

Se sitúa al Sureste del estado y Centro-Suroeste de la región hidrológica 11, tiene una superficie de 10,763.88 km<sup>2</sup>, de los cuales 1,753.57 km<sup>2</sup> pertenecen a Sinaloa, la precipitación media es de 877.49 mm. La pendiente para esta porción de la cuenca es moderada a excepción de la zona cercana a la costa, donde se considera baja, en esta cuenca se hayan múltiples corrientes de carácter intermitentes y perennes, con lo que respecta al estado de Sinaloa, la corriente principal es el río Cañas que limita al Norte con el río Baluarte, al Sur y al Norte con el río Acaponeta y al poniente con las zonas de marismas como la Laguna de Teacapán en las costas del Océano Pacífico (INEGI, 1995).

En la cuenca existe un total de 3 estaciones de las cuales sobresale la estación la Bailona que se ubica sobre la corriente del río Cañas, reportó un volumen medio anual de 142.22 millones de m<sup>3</sup> durante el período comprendido de 1961-1981. El uso del agua superficial se destina al impulso del desarrollo pecuario. El volumen medio precipitado en el estado es de 1,665.06

millones de m<sup>3</sup> anuales con un coeficiente de escurrimiento de 14.4% y un volumen total escurrido de 239.90 millones de m<sup>3</sup>.

## **2.8 Agricultura.**

La actividad agrícola constituye el eje principal de la economía sinaloense, consolidándose como productora de bienes para exportación, insumos industriales y alimentos para el mercado nacional.

En este sector existen dos sistemas de producción. Por una parte existe la agricultura de riego altamente tecnificada que emplea insumos modernos y es la principal beneficiaria de la infraestructura hidráulica. En contraste, existe el sector tradicional escasamente productivo con riego de temporal, que produce para el mercado local y, en buena medida para el autoconsumo; geográficamente se ubica en las zonas altas del estado.

En el estado existen 1245 ejidos y comunidades agrarias que disponen de 1'511,733 has de superficie de labor, de ellas, el 39.2% son de riego, 46.7% de temporal y 14.1% de riego de temporal. Los municipios de Culiacán, Guasave y San Ignacio poseen el 31.67% de la superficie cultivable del estado (INEGI, 1995).

### **2.8.1 Sistemas de riego.**

A partir de la construcción de las obras de almacenamiento de agua en Sinaloa, se utilizan diversos métodos para aplicar el riego a los cultivos. La elección depende de las propiedades del suelo, topografía, condiciones de drenaje y salinidad, disponibilidad de agua, dimensiones de la parcela, necesidades de los cultivos y prácticas agrícolas de los usuarios.

En la actualidad, alrededor del 80% de los módulos de riego que existen en Sinaloa utilizan métodos de riego superficiales, el 15% utiliza riego por aspersión y el 5% riego por goteo (S.A.R.H., 1997).

En lo referente a los métodos de riego superficiales se encuentran los siguientes: riego por entarquinamiento, inundación libre, melgas, y por surcos.

### **2.8.2 Ciclos agrícolas.**

Con el propósito de aprovechar al máximo la disponibilidad de agua y el área sujeta a riego, se han establecido dos ciclos agrícolas de acuerdo a las estaciones del año y al tipo de cultivo que se pretende implantar.

El ciclo Otoño-Invierno comprende la época de siembra en los meses de octubre del año en curso a febrero del año siguiente y en la cosecha de enero a septiembre del año siguiente. Los cultivos representativos de este ciclo son: maíz, frijol, trigo, garbanzo, tomate de exportación, algodón y cártamo.

El ciclo Primavera-Verano comprende la siembra en los meses de marzo a septiembre del año en curso y en la cosecha, de julio del presente año a marzo del año siguiente. Los cultivos de éste período son: soya, maíz, sorgo grano, sorgo forrajero y tomate de exportación.

El volumen de la producción agrícola en el ciclo 1994-1995 ascendió a más de 4'055,964 ton de diversos cultivos cíclicos y alrededor de 2'866,561 ton, de los cultivos perennes (I.N.E.G.I. 1996).

No obstante lo anterior, el Plan Estatal de Desarrollo 1995-2000 propone la ampliación de la frontera agrícola en 798,810 has una vez que se concluyan los proyectos sobre el río Fuerte, canal Fuerte-Mayo, San Lorenzo-Culiacán, Elota-Piactla y Baluarte-Presidio. Además se propone rehabilitar 13,875 has dañadas por ensalitramiento, perforar pozos profundos y establecer un programa sobre el uso eficiente del agua de riego.

En cuanto a la superficie agrícola de temporal, en el estado de Sinaloa se tienen 671,871 has de las cuales, en 1996 sólo se sembraron 443,312 has debido al retraso de la época de lluvias y

al otorgamiento de créditos para dicho sector. Los cultivos predominantes en éstas áreas son: el maíz, sorgo, cártamo y mango.

## **2.9 Industria.**

La industria sinaloense está orientada a la transformación de productos agrícolas y pesqueros principalmente, para ello basta mencionar que en 1993 la industria manufacturera dedicada a los productos alimenticios, bebida y tabaco dió ocupación a 25,438 personas en promedio (I.N.E.G.I. 1996),

El 67% de las industrias manufactureras existentes en el estado se encuentran en los municipios de Culiacán (32.18%), Mazatlán (20.03%) y Ahome (14.79%).

La industria minera del estado posee 37 unidades de producción, de ellas 75.7% pertenecen a la de extracción de minerales metálicos y el 24.3% corresponden a la explotación de minerales no metálicos. en 1993 este sector dió ocupación a 1154 personas en promedio.

## **2.10 Generación de energía eléctrica.**

En el estado de Sinaloa se tienen instaladas cinco plantas hidroeléctricas que generan alrededor de 1,023.2 Gigawatts de energía por hora (43.1%), dos termoeléctricas que producen 4,852.4 Gigawatts de energía por hora (56.9%). Este sector de la economía atiende alrededor de 533, 639 usuarios (INEGI, 1996).

## **2.11 Población.**

En 1990, la población en Sinaloa fue de 2,204.054 habitantes que representa el 2.4% de la población total del país. La densidad de población en ese mismo año fue de 37.94 habitantes por km<sup>2</sup> situándose en el décimo sexto lugar entre la totalidad de las entidades federativas, los asentamientos humanos presentan dispersión en la mayor parte de la entidad a la par con una elevada concentración en sus principales centros urbanos.

De acuerdo al XI Censo General de Población y Vivienda 1990, los municipios mas poblados son: Culiacán (27.3%), Mazatlán (14.26%), Ahome (13.77%), Guasave (11.71%) y Navolato (6.0%) que en conjunto representan el 73.01%. En el extremo opuesto están: Cosalá (0.77%), San Ignacio (1.09%), Choix (1.19%) y Concordia (1.19%) que representan el 4.25% de la población.

Entre los municipios que destacan por su mayor densidad de población en el año de 1990 son: Culiacán, 126.32 hab/km<sup>2</sup>, Mazatlán 102.44 hab/km<sup>2</sup>, Ahome 69.9 hab/km<sup>2</sup>, en el extremo opuesto están Cosalá 0.06 hab/km<sup>2</sup>, San Ignacio 0.5 hab/km<sup>2</sup>, Choix 0.06 hab/km<sup>2</sup> y Concordia 0.17 hab/km<sup>2</sup>.

Con base en lo anterior y de acuerdo al criterio del Colegio de México de que la población que habita en localidades menores de 5,000 hab es rural y la que habita en localidades mayores de este rango es urbana, hecha esta consideración el 65% de la población en 1990 reside en localidades urbanas y el 35 % en rurales.

### 3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE FRECUENCIAS DE SEQUÍAS

La sequía hidrológica está definida como un déficit en el suministro de agua en el tiempo y en el espacio (Yevjevich, 1967). Asimismo el déficit en el suministro de agua está definido en relación a un nivel de agua demandado en forma específica.

La metodología aquí presentada tiene como objetivo principal identificar el modelo de serie de tiempo que describa adecuadamente el proceso anual de lluvias en el estado de Sinaloa y con él poder calcular frecuencias de sequías para una determinada región.

Las etapas que se consideraron son:

#### 3.1 Información.

La información empleada en el estudio corresponde a los registros de precipitación diaria proporcionados por la Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional.

El número de estaciones climatológicas registradas para el estado de Sinaloa son 189 unidades. Estas cubren un área de 5'809,200 has; por lo que la densidad calculada es de una estación por cada 30736.5 has, por lo que de acuerdo a los criterios establecidos por Elfatih A. B. Eltahir (1992), dicho valor se considera adecuado para realizar análisis sobre la ocurrencia de la precipitación pluvial.

En primer lugar se revisó el contenido de los datos disponibles de cada estación, donde se detectó la ausencia de registros y estaciones con menos de dos años de registros, esta situación permitió depurar el número de estaciones reduciéndolas hasta 160 unidades.

Para suministrar los datos a los programas planteados en esta metodología, se obtuvieron archivos de datos secuenciales y de acceso directo. Para ello, se realizó un programa de cómputo para transformar datos de archivos secuenciales de precipitación a aleatorios.

Para adoptar una metodología adecuada los registros de cada estación se trataron de manera separada, para así generalizar las conclusiones de los resultados obtenidos.

### 3.2 Estadísticos muestrales.

#### a) Coeficiente de Variación (CV)

Es una medida adimensional expresada como un porcentaje de la media que se utiliza para comparar la variabilidad en un conjunto de datos con la de otro, en situaciones en las que una comparación directa de desviaciones estándar no es conveniente o suficientemente realista.

Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

CV Coeficiente de Variación

s Desviación estándar

$\bar{x}$  Media de la serie.

Un inconveniente del Coeficiente de Variación es que deja de ser útil cuando la media es aproximadamente igual a cero. Este coeficiente se calculó mediante la aplicación de Excel.

#### b) Determinación del coeficiente de autocorrelación ( $r_k$ ).

Este parámetro es una medida adimensional de la dependencia lineal de la serie, se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X}_i)(X_{i+k} - \bar{X}_{i+k})}{\left[ \sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-k} (X_{i+k} - \bar{X}_{i+k})^2 \right]^{1/2}} \dots\dots\dots (2)$$

Donde

$r_k$  Es el coeficiente de autocorrelación de retraso  $k$  o coeficiente de correlación serial o función de autocorrelación.

$\bar{X}_t$  Es la media de los primeros  $N-k$  valores.

$\bar{X}_{t+k}$  Es la media de los últimos  $N - k$  valores

$X_t$  Datos de la serie.

$k$  Retraso

La gráfica de  $r_k$  contra  $k$  generalmente es llamado correlograma. Éste siempre inicia con la unidad en el origen. Debido a que en la ec. (2) para  $k = 0$ ,  $r_k = 1$ , en general  $-1 \leq r_k \leq +1$ . Para el caso de este estudio se utilizará el  $r_1$  (primer coeficiente de autocorrelación de retraso uno) como una medida simple de dependencia del tiempo de una serie.

El estimador  $r_k$  de la muestra plasmado en la ec. (2) es un buen estimador del coeficiente de autocorrelación de la población  $\rho_k$ . Sin embargo, tiene tendencia hacia abajo de manera que esto constituye una desventaja práctica y en muchas ocasiones induce a establecer inferencias incorrectas acerca de las características de una serie de tiempo. Para evitar este problema se utilizará la corrección de Quenoville's (J.D. Salas 1980) expresada mediante la siguiente ecuación:

$$r'_k = 2r_k - 0.5[r_k(1) + r_k(2)] \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$r'_k$  Estimador de correlación serial con tendencia corregida.

$r_{k(1)}$  y  $r_{k(2)}$  Son los estimadores de correlación serial de la primera y segunda mitad de la serie de tiempo.

Una desventaja al utilizar esta ecuación es que algunas veces  $r'_k$  toma valores mas allá de los límites (+1 y -1) (J.D. Salas, 1980).

Por otro lado, el uso del análisis de autocorrelación puede utilizarse como técnica de investigación de series de tiempo hidrológicas basándose en conceptos de analogía. Es decir, una

vez conocido el correlograma de un proceso hidrológico, se puede inferir estadísticamente si se aproxima a un correlograma de un proceso conocido (Saldarriaga y Yevjevich, 1970). Para calcular este estadístico muestral y su corrección, se desarrolló un programa de cómputo.

### c) Media muestral.

Es la medida más común de situar el centro de un conjunto de datos. El estadístico muestral utilizado para este concepto es:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t \quad \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

- $X_t$  Son los datos de la serie.
- $N$  Es el tamaño de la muestra
- $\bar{x}$  Es la media muestral.

### d) Varianza muestral.

Es una medida de la variabilidad de la media. El estadístico muestral está representado por:

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

- $x_t$  Son los datos de la serie.
- $\bar{x}$  Es la media de la serie.
- $N$  Es el tamaño de la muestra.
- $s^2$  Es la varianza muestral

Para calcular la media y la varianza muestral se realizó un programa de cómputo.

### e) Función autocorrelación parcial.

La función de autocorrelación parcial o correlograma parcial es otra forma de representar la estructura de la dependencia del tiempo de una serie o un modelo dado. Es útil porque ayuda a identificar el tipo y el orden del modelo cuando se investiga una muestra de una serie de tiempo.

El coeficiente de autocorrelación parcial  $\phi_k(k)$  en un modelo autorregresivo de orden  $k$  es una medida de la asociación lineal entre  $\rho_j$  y  $\rho_{j-k}$  para  $j \leq k$ .

La función de autocorrelación parcial  $\phi_k(k)$  puede ser obtenida recursivamente mediante la relación de Durbin's (1960), (J. D. Salas, 1980). La cual consiste en:

$$\phi_k(k) = \frac{\rho_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_j(k-1)\rho_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_j(k-1)\rho_j} \dots\dots\dots (6)$$

Para determinar la función de autocorrelación parcial  $\phi_k(k)$  de las series muestrales  $z_1, z_2, \dots, z_N$ , primero se debe calcular el correlograma muestral  $r_k$  de la ec (2) y posteriormente reemplazar los  $\rho$ 's por los  $r$ 's en la ec. (6).

Una de las hipótesis para verificar que el proceso es un AR(p), es de que el estimador  $\phi_k(k)$  para  $k > p$  es asintóticamente normal con media cero y varianza  $1/N$ . En consecuencia el límite de probabilidad  $1-\alpha$  para la autocorrelación parcial cero puede ser determinada por la siguiente condición:

$$-u_{1-\alpha/2}/\sqrt{N}; +u_{1-\alpha/2}/\sqrt{N} \dots\dots\dots (7)$$

Donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el cuantil  $1-\alpha/2$  de la distribución normal estándar,  $N$  es el tamaño muestral y  $\alpha$  es el nivel de probabilidad. Los límites de la expresión (7) pueden ser usados para dar alguna guía para cualquier autocorrelación parcial teórica son prácticamente cero mas allá de

un retraso particular. Se desarrolló un programa para confirmar la elección de un proceso autorregresivo mediante la función de autocorrelación parcial.

### 3.3 Pruebas estadísticas.

A continuación se describen las pruebas utilizadas para determinar la normalidad, independencia y estacionariedad de las series de datos de lluvia que se utilizaron en el modelo autorregresivo AR(1).

#### 3.3.1 Prueba de normalidad para variables de series de tiempo

La mayoría de las teorías de probabilidad y técnicas estadísticas aplicadas en hidrología y en análisis de series de tiempo se desarrollan asumiendo que las variables están normalmente distribuidas. Debido a que la mayoría de las curvas de frecuencias de variables hidrológicas están asimétricamente distribuidas o están limitadas por cero (son variables positivamente valuadas). Frecuentemente es necesario transformar estas variables anormales antes de realizar cualquier análisis estadístico. A continuación se describen las pruebas estadísticas para verificar la normalidad de las series de lluvia.

##### 3.3.1.1 Test de normalidad utilizando el coeficiente de sesgo.

Diversas pruebas se utilizan para probar la hipótesis de que una serie de tiempo dada es normal. Una prueba común es dibujar la distribución empírica de las series en papel de probabilidad normal y verificar si los puntos graficados siguen una forma aproximada a una línea recta. El test estadístico de sesgo usado para verificar la normalidad se describe a continuación.

Considerar las series de tiempo  $X_t$ ,  $t = 1, 2, 3, \dots, N$  con media  $\bar{x}$  y desviación estándar  $\hat{\sigma}$  donde  $N$  es el tamaño de la muestra. Asumir que la distribución de frecuencia de  $X_t$  es fijada por la distribución de probabilidad normal con parámetros  $\bar{x}$  y  $\hat{\sigma}$

La prueba de sesgo de normalidad está basada en el hecho de que el coeficiente de sesgo para una variable normal es cero. Un estimador del coeficiente de sesgo de una serie de tiempo  $X_t, t = 1, 2, 3, \dots, N$  es:

$$\hat{\gamma} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^3}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2 \right]^{3/2}} \quad \dots \quad (8)$$

Donde  $\bar{x}$  es la media muestral. Si la serie viene desde una distribución normal.  $\hat{\gamma}$  está asintóticamente distribuido normalmente con media cero y varianza  $6/N$  (Snedecor and Cochran, 1967, p 86). Entonces los límites de probabilidad  $(1 - \alpha)$  sobre  $\hat{\gamma}$  pueden definirse como:

$$\left[ -u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}}; u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}} \right] \quad \dots \quad (9)$$

Donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el cuantil  $1 - \alpha/2$  de la distribución normal estándar. Por tanto, si  $\hat{\gamma}$  de la ec (8) cae dentro de los límites de la expresión (9). La hipótesis de normalidad es aceptada. En caso contrario será rechazada.

En la actualidad esta prueba es exacta para  $N > 150$ . Para muestras de tamaño pequeño, Snedecor y Cochran sugieren que en lugar de comparar el coeficiente de sesgo  $\hat{\gamma}$  de la ec (8) con un valor tabulado  $\gamma_\alpha(N)$  que depende del nivel de probabilidad  $\alpha$  y del tamaño de la muestra  $N$ . La tabla 4 da los valores de  $\gamma_\alpha(N)$  para  $\alpha = 0.02$  y  $0.01$  y para varios valores de  $N$ . Por tanto, si  $\hat{\gamma} < \gamma_\alpha(N)$  la hipótesis de normalidad es aceptada.

Tabla 4. Valores del test de normalidad para sesgo para tamaños de muestra menores que 150 (por Snedecor y Cochran, 1967. p.552).

N	$\alpha$		N	$\alpha$	
	0.02	0.10		0.02	0.10
25	1.061	0.711	70	0.673	0.459
30	0.986	0.662	80	0.631	0.432
35	0.923	0.621	90	0.596	0.409
40	0.87	0.587	100	0.567	0.389
45	0.825	0.558	125	0.508	0.350
50	0.787	0.534	150	0.464	0.321
60	0.492	0.492	175	0.430	0.298

Fuente:

Salas, Delleurr, Yevjevich y Lane.

Applied Modeling of Hydrologic time series

Water Resources Publications

Se desarrolló un programa de cómputo para aplicar el test de normalidad mediante el coeficiente de sesgo.

### 3.3.1.2. Test de Kolmogorov-Smirnov.

Un problema frecuente en análisis de datos es verificar que la población pueda ser representada por alguna función de densidad de probabilidad especificada. Este test fue desarrollado para verificar una distribución poblacional.

El objetivo del test de Kolmogorov-Smirnov es probar la hipótesis nula de que la distribución acumulativa de una variable concuerda con la distribución acumulativa de alguna función de probabilidad especificada. La hipótesis nula debe especificar la función de distribución y sus parámetros. La hipótesis alternativa es aceptada si la función de distribución es poco probable que sea una función subyacente. Esto puede ser indicado si cualquier función de densidad o los parámetros especificados están incorrectos.

El test estadístico que es denotado como  $D$  es la máxima diferencia absoluta entre los valores de las distribuciones acumulativas de una muestra aleatoria y una función de distribución de probabilidad especificada. El valor crítico del test estadístico que se usó fue del 5%.

El test de Kolmogorov-Smirnov puede ser usado para pequeñas muestras, generalmente es más eficiente que la prueba chi-cuadrado cuando la muestra es pequeña. El test requiere datos de al menos una escala ordinal. Pero es aplicable para comparaciones con distribuciones continuas.

#### Procedimiento:

El test de Kolmogorov-Smirnov puede realizarse mediante un procedimiento que involucra los siguientes pasos:

1. Establecer las hipótesis nula y alternativas en términos de la función de densidad de probabilidad propuesta y sus parámetros.
2. El test estadístico  $D$  es la diferencia máxima absoluta entre la función acumulativa de la muestra y la función acumulativa de la función de probabilidad especificada en la hipótesis nula.
3. El nivel de significancia es el valor de 0.05.

4. Una muestra aleatoria deberá ser obtenida y la función de probabilidad acumulativa muestral calculada. Después de calcular la función de probabilidad acumulativa, el valor del test estadístico deberá ser obtenido.
5. El valor crítico,  $D\alpha$ , del test estadístico es una función de  $\alpha$  y el tamaño de la muestra,  $n$
6. Si los valores computados de  $D$  es más grande que  $D\alpha$  la hipótesis nula deberá ser rechazada.

Muchos hidrólogos no utilizan este test cuando prueban distribuciones de frecuencia hidrológica. La razón de ello es la importancia que tienen las colas de las distribuciones de frecuencia hidrológica y la insensibilidad de este test en las colas de la distribución. Se desarrolló un programa de cómputo para aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov.

### 3.3.1.3. Normalización de series de tiempo de precipitación anual.

La mayoría de las teorías de probabilidad y técnicas estadísticas aplicadas en hidrología y en análisis de series de tiempo se desarrollan asumiendo que las variables están normalmente distribuidas. Debido a que la mayoría de las curvas de frecuencias de variables hidrológicas están asimétricamente distribuidas o están limitadas por cero (son variables positivamente valuadas). Frecuentemente es necesario transformar estas variables anormales antes de realizar cualquier análisis estadístico.

Para un gran número de series de precipitación y escurrimiento anual diversos autores han encontrado que las funciones de distribución log-normal-2 fijan su distribución de frecuencia. Es decir, si las series de precipitación anual  $X_t$  están representadas por una distribución log-normal-2, su densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_y}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\log(x) - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2\right\} \dots\dots\dots (10)$$

Donde  $\mu_y$  y  $\sigma_y$  son los parámetros de la función.

Ellos presentan el subíndice  $y$  debido a que representan la media y la desviación estándar de  $y = \log(x)$  respectivamente, por tanto,  $x$  por  $y = \log(x)$  produce una serie normal  $Y_t$  con media  $\mu_y$  y desviación estándar  $\sigma_y$ . Esto supone que:

$$y = \frac{\log(x) - \mu_y}{\sigma_y} \dots\dots\dots (11)$$

Es una serie normal estándar con media cero y desviación estándar uno.

### 3.3.2 Verificación de la independencia de las series.

En la actualidad un proceso estocástico requiere del conocimiento de asociación de las distribuciones de probabilidad  $f(X_1, X_2, X_3, \dots)$  con las variables aleatorias  $X_1, X_2, X_3, \dots$ . Si dicha distribución conjunta puede ser factorizada en productos de distribución marginales como  $f(X_1) \cdot f(X_2) \cdot f(X_3) \cdot \dots$  el proceso se convierte en un proceso estocástico independiente por lo que la serie es independiente (J. D. Salas, 1980). De no cumplirse lo anterior, la serie tendrá algún tipo de dependencia y deberá tratarse como proceso estocástico serialmente dependiente. Bajo estas consideraciones, la serie independiente se define como la serie que no presenta ningún tipo de dependencia en el tiempo o en el espacio.

En el presente trabajo se utilizaron dos pruebas estadísticas para verificar la independencia de las series: El test de Anderson (1941) y el run-test propuesto por Saldarriaga y Yevjevich (1970). En ambos casos se aplicó el test para dos colas, probando la hipótesis nula de que las series son una muestra que proceden de una población estacionaria e independiente. La descripción de estas dos pruebas se da a continuación.

### 3.3.2.1 Test de Anderson (1941) para independencia de las series.

La independencia supone que el resultado de la precipitación en un año no depende de los valores de la precipitación de los años previos. En cambio la estacionariedad supone que las propiedades básicas de un proceso no cambian con el tiempo absoluto. Para medir la dependencia con el tiempo se utiliza el primer coeficiente de correlación serial obtenido con la ec. (2).

Las características de dependencia de las series de tiempo anual se realizan mediante dos cálculos estadísticos clásicos: (1) el correlograma, el cual es una representación en el dominio del tiempo y (2) el espectro que es una representación en el dominio de la frecuencia.

Para una serie independiente el correlograma poblacional es igual a cero para  $k \neq 0$ . Sin embargo algunas muestras de series independientes tienen variabilidad muestral y presentan un  $r_k$  fluctuando alrededor de cero. En tal caso es útil determinar los límites de probabilidad para el correlograma de una serie independiente. Anderson en 1941 propuso el siguiente límite:

$$r_k(99\%) = \frac{-1 \pm 2.326 \sqrt{N - k - 1}}{N - k} \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

- $r_k$  Es el coeficiente de autocorrelación.
- $N$  Tamaño de la muestra.
- $k$  Es la cantidad de retrasos considerados.

Se realizó un programa para aplicar el test de normalidad de Anderson.

### 3.3.2.2 Run-test (Saldarriaga y Yevjevich 1970).

Este método se diseñó para analizar la variación de la precipitación anual ocasionada por la secuencia de años húmedos y secos; ya que el comportamiento de dicho fenómeno no puede ser conocido con suficiente exactitud para permitir la predicción probabilística de su ocurrencia, duración y cobertura.

El método se basa en la definición de racha (corrida) como una sucesión de eventos similares precedidos por diferentes eventos sucesivos. El número de elementos de una racha es usualmente referido a su longitud. De ahí que dichas sucesiones sean llamadas *run-lengths*. Algunos parámetros de *run-length* son usados para definir si una serie de tiempo hidrológica es serialmente independiente o dependiente. Si se determina que son dependientes, el interés se centra en encontrar cual es el mejor modelo matemático que describe esta dependencia.

Para los propósitos de este método la racha es idéntica al concepto de *run-length*, ya que en ambos casos son el número consecutivo positivo o negativo a partir de un valor constante específico llamado nivel de truncamiento.

Una serie de la variable  $x$  se corta en muchos lugares por un nivel de truncamiento horizontal arbitrario,  $x_0$  y la relación de esta constante  $x_0$  para los otros valores de  $x$  del proceso sirve como una base para la definición de corrida en este estudio. Básicamente, deben ser dos procesos cruzando uno a otro para definir corrida.

Debido a que estos dos procesos cruzan uno a otro, la teoría de rachas (corrida) es a menudo llamada la teoría cruzada. El término teoría de rachas es usado en el caso de series discretas y el término teoría cruzada en el caso de series continuas.

En el caso de rachas para ser usado en este estudio, las principales suposiciones son:

1. Únicamente las series discretas son investigadas de manera que la expresión "rachas" se usará.
2. La variable  $x$  puede tener distribución de probabilidad discreta, continua o fija.
3. La probabilidad  $P(x \leq x_0) = q$  puede reemplazar la constante  $x_0$  para hacer algunas propiedades de rachas independientes del tipo de distribución de  $x$ .

El número de valores de una secuencia discreta entre un cruce superior del nivel de truncamiento y el cruce inferior siguiente está definido como un *run-length* positivo o corrida positiva. similarmente una *run-length* negativo o corrida negativa, está definida como el número

de valores de una serie discreta entre cruce inferior y el siguiente cruce superior. Ellos están mostrados en la fig. 9, y están designados por:

$N_j^+$  para la longitud de la j-ésima corrida positiva,

$N_j^-$  para la longitud de la j-ésima corrida negativa.

La j-ésima racha total está definida como:

$N_j = N_j^+ + N_j^-$  con  $j = 1, 2, \dots$ , donde  $j$  es contada desde el origen de una serie de tiempo.

Lo anterior puede ser extendido para definir  $T_j^+$ ,  $T_j^-$  y  $T_j$  como las rachas positiva, negativo y total de un proceso continuo respectivamente. Esto es análogo a las definiciones de corridas de series de tiempo discretas como se muestran en la gráfica de la fig. 9

Otros parámetros usados en la literatura, como definiciones de rachas de series de tiempo discretas, además de  $N_j^+$ ,  $N_j^-$  y  $N_j$  son:

1. Suma de desviaciones asociadas con corridas positivas, como la positiva *rum-sum* o la *run-surplus*.
2. Suma de desviaciones asociadas con corridas negativas, como la *rum-sum* negativa o la *run-déficit*.
3. Número de corridas positivas para series dadas de tamaño  $N$ .
4. Número de corridas negativas para series dadas de tamaño  $N$ .
5. Numero total de corridas para series dadas de tamaño  $N$ .

Estas corridas son variables aleatorias y son funciones de los procesos  $\{X_i\}$  y el nivel de truncamiento  $x_0$ .

$x_0$  determina el nivel de demanda en una región, si no se alcanza este nivel una sequía ocurrirá. Por otro lado, si la inundación de un área inicia para  $x > x_0$  y el daño de la avenida es función del tiempo de duración con  $x > x_0$  entonces la distribución de la *run-length* positiva y/o *run-sum* determinará las características de la avenida. Si un tipo de corrida está regionalizada o se

muestra sobre un área con sus isolíneas, los fenómenos regionales de sequía, avenidas y fenómenos similares pueden ser estudiados por sus probabilidades de recurrencia

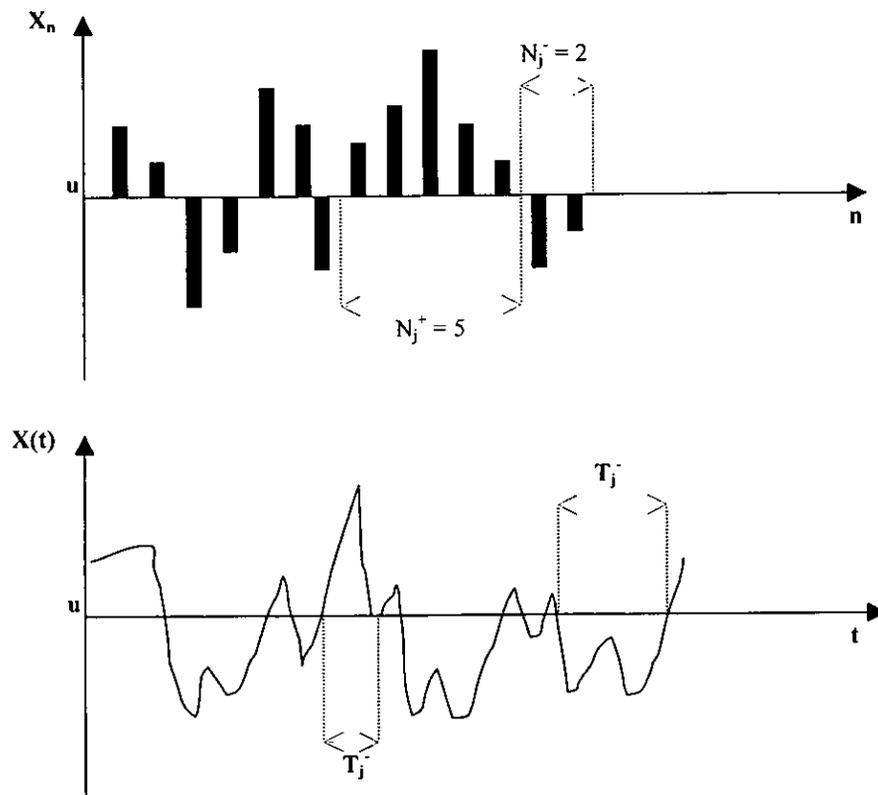


Fig. 9. Definición de corrida positiva y negativa para un nivel de truncamiento dado.

La gráfica superior se refiere a una serie discreta y la gráfica inferior a una serie continua.

Para investigar las series usando las rachas, el parámetro básico seleccionado es el *run-length* cuya justificación es la siguiente:

- Si una serie es cortada por cualquier nivel de truncamiento y calculadas las *run-length* negativas o positiva; es posible teóricamente reproducir la serie de tiempo original en cierto número de puntos finitos.
- Las propiedades de *run-length* basadas en probabilidades del nivel de truncamiento, son distribuciones libres, tanto para variables independientes y procesos linealmente

dependientes. Esta es una propiedad importante, ya que los resultados obtenidos por procesos Gaussianos pueden ser aplicados también a otros tipos de procesos estacionarios.

- Las *run-lengths* positivas y negativas pueden ser asociadas inmediatamente con períodos de déficit o superávit o con duraciones de sequías o avenidas.
- Una técnica paralela al análisis de autocorrelación y al análisis del espectro de la densidad de la varianza puede ser desarrollado por *run-lengths* para investigar series hidrológicas.
- Una comparación de las propiedades observadas en las *run-lengths* con las propiedades de las *run-lengths* de modelos teóricos poblacionales son similares a otras técnicas de investigación. Por lo que la media *run-length* positiva  $\bar{N}^+$ , la media *run-length* negativa  $\bar{N}^-$  y la media *run-length* total  $\bar{N}$  son parámetros para esta comparación. Debido a que  $\bar{N}$  contiene información de  $\bar{N}^-$  y  $\bar{N}^+$ . La media  $\bar{N}$  *run-length* total es un parámetro básico para investigar series de tiempo hidrológicas por la teoría de rachas.

La técnica mediante la teoría de rachas desarrollada en este estudio, compara el estadístico  $\bar{N}_q$  como una función de  $q$  observaciones de serie de tiempo con el valor esperado  $E(N_q)$  de la *run-length* total del modelo teórico, o de la comparación del estadístico  $\bar{N}_q^+$  comparado con su valor esperado  $E(N_q^+)$ .

Algunas propiedades para las variables aleatorias independientes son:

Si se acepta que  $X_n$  es una secuencia de la variable aleatoria independiente con una distribución común y que  $N_j$  sea un proceso asociado al total de rachas; entonces,  $N_j$  es un proceso renovable y como tal, es también una secuencia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas.

Por lo tanto, para un  $q$  dado:

$$N_k = \sum_{i=1}^k N_i + \dots + N_k \dots\dots\dots (13)$$

Entonces por el teorema del límite central, para  $k$  grandes, es  $\bar{N}_q$  asintóticamente normal distribuida con

$$E N_k = EN \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{var } N_k = \frac{\text{var } N}{k} \dots\dots\dots (15)$$

Estas propiedades de  $\bar{N}_k$  permiten la construcción de un test para investigar si una serie es independiente.

La hipótesis nula es considerar que  $\{ X_n \}$ , es una serie independiente e idénticamente distribuida. Por lo que  $\bar{N}_k$  estará aproximadamente normal distribuida para  $k$  grandes. El nivel de tolerancia  $1 - \alpha$  para la región de aceptación de la hipótesis se encuentra en el siguiente intervalo para dos colas:

$$EN - t_{\alpha/2}(\text{var } N_k^{1/2}) \leq N_k \leq EN + t_{\alpha/2}(\text{var } N_k^{1/2}) \dots\dots\dots (16)$$

O lo que es lo mismo:

$$\frac{1}{pq} - t_{\alpha/2} \left( \frac{p^3 + q^3}{k} \right)^{1/2} \leq N_k \leq \frac{1}{pq} + t_{\alpha/2} \left( \frac{p^3 + q^3}{k} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (17)$$

Ahora, considerando la mediana como el nivel de truncamiento ( $p = q = 0.50$ ), los valores de la media y la varianza serán:

$$EN = 4 \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{var } N = 4, \quad \text{y} \quad \text{var } \bar{N}_k = \frac{4}{k} \dots\dots\dots (19)$$

Por lo que los límites de confianza para el 95% (considerando  $\alpha = 0.05$  y  $t_{\alpha/2} = 1.96$ ) son:

$$4 - \frac{3.92}{\sqrt{k}} \leq \bar{N}_k \leq 4 + \frac{3.92}{\sqrt{k}} \dots\dots\dots (20)$$

Si el valor de  $\bar{N}_k$  cae fuera de los límites de la ecuación (20) la hipótesis nula será rechazada. Ésta prueba se ilustra en la fig 10 para el caso del nivel de tolerancia de  $1 - \alpha = 1.96$  y

que el nivel de truncamiento haya sido la mediana. Para aplicar esta prueba se realizó un programa de cómputo tomando como nivel de truncamiento a la mediana de una variable independiente.

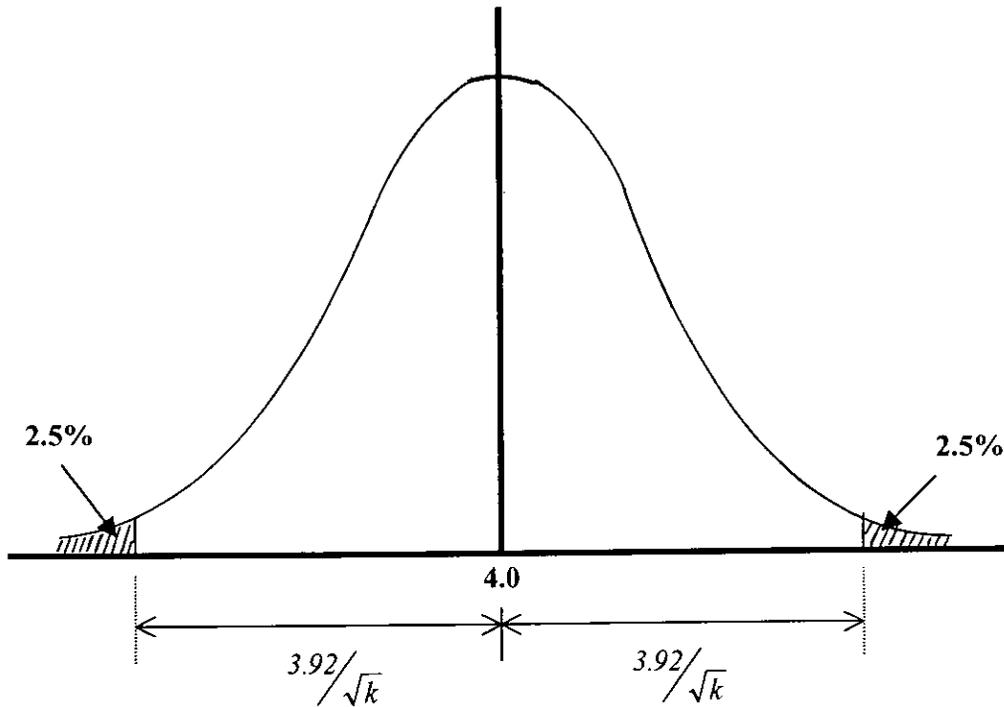


Fig.10. Región de aceptación de la hipótesis nula con dos colas,

### 3.3.3 Estacionariedad de las series de tiempo.

Una serie de tiempo hidrológica es estacionaria si está libre de tendencia, cambios o periodicidad (cíclica). Esto implica que los parámetros estadísticos de las series, tales como la media y la varianza permanecen constantes a través del tiempo, generalmente las series de tiempo hidrológicas, definidas en una escala de tiempo anual son estacionarias, aunque esta suposición puede ser incorrecta debido a la presencia de variabilidad climática ocasionada por efectos naturales o cambios inducidos por el hombre. Las series de tiempo hidrológicas definidas en escalas menores que un año, tales como las series mensuales son típicamente no estacionarias.

Para el caso de este estudio se utilizó un test para probar la estacionariedad de la serie.

### 3.3.3.1 Test de estacionariedad utilizando el coeficiente de autocorrelación de retraso

uno.

Para que el conjunto de parámetros  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_p$  satisfagan la condición de estacionariedad del modelo AR(p) con parámetros constantes, deberá cumplirse que las raíces de la ecuación de las características

$$u^p - \phi_1 u^{p-1} - \phi_2 u^{p-2} - \dots - \phi_p = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

caigan dentro del círculo unitario (Yevjevich, 1972). Es decir, debe satisfacerse que  $|u_i| < 1$ , donde  $i = 1, 2, 3, \dots, p$ , y  $u_i$  son las raíces de la solución de la ec. (21). Para el modelo AR(1) la ec. (21) se vuelve  $u - \phi_1 = 0$ , lo cual implica que  $u = \phi_1$ . Es decir  $\phi_1 < 1$ . Esto constituye la condición de estacionariedad para los modelos AR(1). Lo equivalente a lo anterior queda resumido en la siguiente condición.

$$-1 < \phi_1 < 1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

Se realizó un programa para aplicar la prueba de estacionariedad utilizando el coeficiente de autocorrelación de retraso uno.

### 3.3.3.2 Test de Kendall para la estacionariedad en la media.

Hirsch y Taylor (1970) proveen una valoración del test no paramétrico de Kendall. El test está proyectado para evaluar la aleatoriedad de una secuencia de datos  $X_i$ , específicamente las hipótesis son :

Ho: Los datos pertenecen a una muestra de n variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas.

Ha: La distribución de  $X_j$  y  $X_k$  no son idénticas para todo  $k, j \leq n$  con  $k \neq j$ .

El test está diseñado para detectar incrementos o decrementos de tendencia en los datos más bien que la ocurrencia de un evento episódico.

El teorema define el test estadístico como sigue : si  $X_j$  y  $X_k$  son independientes y poseen valores aleatorios idénticamente distribuidos, el estadístico  $S$  será:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad \dots\dots\dots (23)$$

Donde :

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$E(S) = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\text{VAR}(S) = (n-1)(2n+5)/18 \quad \dots\dots\dots (26)$$

Tiene una distribución aproximadamente normal, entonces el test estadístico  $Z$  es :

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / ((\text{VAR}(S))^{0.5}) & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ (S + 1) / ((\text{VAR}(S))^{0.5}) & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (27)$$

Donde  $Z$  es el valor de la desviación normal estándar (media cero y varianza unitaria),  $E(S)$  es la media y  $\text{VAR}(S)$  es la varianza de  $S$ .

Después de que el valor muestral del test estadísticos  $Z$  es calculado y un nivel de significancia  $\alpha$  seleccionado, la hipótesis nula puede ser probada para un test con dos colas. La hipótesis nula  $H_0$  será rechazada si el valor absoluto de  $Z$  es más grande que  $Z_{\alpha/2}$ . Se realizó un programa para aplicar el test de Kendall.

### 3.4 Selección de modelos

En la actualidad se han desarrollado modelos que reproducen el sistema atmósfera-océano-continente que se han aplicado en latitudes medias septentrionales durante un año. Las conclusiones que se han obtenido es de que en la atmósfera se desarrolla una alternancia de centros de baja y alta presión atmosférica que mantiene en balance la convergencia y la divergencia de humedad atmosférica en la superficie de la tierra, cuando dicho balance se desequilibra por la prolongada duración de un centro de alta presión, se dan las condiciones para que se presenten las etapas iniciales de una sequía (Baravar y Kavvas, 1991).

Otra teoría para estudiar el fenómeno de las sequías es mediante el análisis de las ondas de perturbación atmosférica denominadas Rossby. En ellas se ha determinado que dichas ondas presentan una velocidad longitudinal asociada con el movimiento atmosférico de 10 a 15 m/s y longitudes de onda de 3,000 a 4,000 km extendiéndose de las latitudes bajas hasta la región polar. Al respecto existe la hipótesis de que sean la causa por la cual el balance de la alternancia de centros de alta y baja presión es anulado y por lo tanto se da origen al fenómeno de la sequía. Otros investigadores aseguran que las ondas Rossby están ligadas al fenómeno de "El Niño" (Bravar y Kavvas, 1991). Lo anterior explica el origen de las sequías pero no la duración prolongada que se verifica mucho tiempo después de la presencia de alta presión. Esto se manifiesta en el subsistema terreno-vegetación; ya que después que se ha presentado un centro de alta presión por un período de tiempo largo. La capacidad de la superficie del terreno y de la vegetación para abastecer de vapor de agua a la atmósfera, se ve reducida, aún cuando se presente un centro de baja presión, el suministro de vapor de agua a través de las corrientes de aire ascendentes será insuficiente para que se forme la precipitación.

En algunos lugares se analizan sequías utilizando parámetros relacionados con las precipitaciones, algunos de ellos son: el Porcentaje de Precipitación Normal, Precipitación Mensual en Deciles, Índice Palmer de Severidad de Sequías, Índice de Precipitación Estandarizada, Índice de Lluvia Nacional y el de Lluvia Segura. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos:

El Porcentaje de Precipitación Normal. Es una de las más simples medidas de lluvia para un lugar. Los análisis que usan este porcentaje son muy efectivos cuando se aplican para una región singular o una estación determinada. Sin embargo, puede ser fácilmente mal interpretado y dar diferentes indicaciones de condiciones climáticas dependiendo de la ubicación de la estación. Éste se calcula dividiendo la precipitación actual por la precipitación normal, típicamente considerada como la media de los 30 años multiplicada por 100%, esto puede ser calculado para una variedad de escalas de tiempo. Usualmente estas escalas de tiempo varían de un mes singular a un grupo de meses. La precipitación normal para un lugar específico es considerado que sea el 100%.

Una de las desventajas de usar el porcentaje de la precipitación normal es que la precipitación media o promedio frecuentemente no es la misma que la precipitación mediana, la cual es el valor excedido del 50% de la ocurrencia de la precipitación en un registro climático largo. La razón para esto es que la precipitación en una escala mensual o estacional no tiene una distribución normal donde la media y la mediana se consideran ser iguales.

Debido a la variedad de los registros de precipitación en el tiempo y de lugares, no hay forma de determinar la frecuencia de la desviación de la normal. Por consiguiente la rareza de la ocurrencia de una sequía no es conocida y no puede ser comparada con diferentes lugares.

Precipitación mensual en déciles. es otra técnica de monitoreo de sequías. Esta fue desarrollada por Gibbs and Maher (1967) para evitar alguna de las debilidades dentro de la aproximación del "porcentaje dentro de la normal". Ellos desarrollaron la técnica dividiendo la distribución de ocurrencias sobre un gran registro de precipitación en secciones para cada 10% de la distribución. Ellos llamaron a cada una de esas categorías un "decil". el primer decil es la cantidad de lluvia que no exceda al 10% más bajo de la ocurrencia de precipitación. el segundo decil es la cantidad de precipitación que no exceda al 20% mas bajo de las ocurrencias. Estos deciles continúan hasta que la cantidad de lluvia identificada por el décimo decil es la cantidad de precipitación mas grande de todo el registro. Por definición el quinto decil es la mediana y esta es la cantidad de precipitación que no excederá del 50% de ocurrencias sobre el período de registro. Los deciles son agrupados en cinco clasificaciones como lo muestra la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de deciles para períodos secos y húmedos

Deciles 1 - 2	Más bajo que el 20%	Bastante mas bajo del normal
Deciles 3 - 4	El sig. mas bajo que el 20%	Bajo de la normal
Deciles 5 - 6	Mitad del 20%	Cerca de la normal
Deciles 7 - 8	El Sig. mas alto del 20%	Arriba de la normal
Deciles 9 - 10	El más alto del 20%	Mucho más arriba que la normal.

El método de deciles fue seleccionado como medida meteorológica de sequías dentro del sistema Australiano de Vigilancia de Sequías debido a que es relativamente simple para calcular y requiere menor número de datos y unas cuantas suposiciones. En este sistema los agricultores pueden pedir asistencia al gobierno si la sequía es un evento que ocurrirá al menos una vez en 20 y 25 años (déciles 1 - 2 del registro de 100 años) y cuya permanencia sea más de 12 meses (White and O'Meagher 1995). Esta uniformidad en la clasificación de sequías que es diferente al sistema basado en el porcentaje de la precipitación normal ha servido a las autoridades australianas para determinar las respuestas apropiadas a las sequías.

Una de las desventajas del sistema de deciles es que los registros climatológicos largos es necesario calcular los deciles exactamente.

Índice Palmer de Severidad de Sequías (PDSI). En 1965, Palmer desarrolló un índice sobre el concepto suministro-y-demanda de la ecuación de balance de agua, tomando en cuenta el déficit de precipitación para un lugar específico. el objetivo del índice Palmer de Severidad es suministrar una medida de las condiciones de humedad que fueron "estandarizadas" de manera que las comparaciones usando el índice pueden ser hechas entre lugares y entre los meses (Palmer, 1965)

El PDSI es un índice de sequía "meteorológica" y responde a las condiciones climáticas que han sido anormalmente secas o anormalmente húmedas. Cuando las condiciones cambian de secas a normales o húmedas, por ejemplo, la sequía medida por el PDSI no tomar en cuenta escurrimientos, lagos, y niveles de almacenamiento y otros impactos hidrológicos de gran duración (Karl and Knight 1985).

El cálculo del PDSI está basado en los datos de temperatura y precipitación así como en el contenido de agua disponible (AWC) del suelo. En el cálculo, todos los términos básicos de la ecuación de balance de agua se determinan, incluyendo la evapotranspiración, recarga del suelo, escurrimiento y pérdida de humedad de la capa superficial. En cambio, los impactos humanos en el balance de agua tales como irrigación, no son considerados. Una descripción completa de las ecuaciones puede ser encontrado en el estudio original de Palmer (1965) y en los más recientes análisis de Alley (1984).

Palmer desarrolló el PDSI para incluir la duración de una sequía (o temporada húmeda) su hipótesis fue como sigue: Un mes con humedad anormal en la mitad de un período largo de sequía no deberá tener un impacto mayor sobre el índice de una serie de meses cercano a la precipitación normal después de una sequía. Por lo tanto, Palmer desarrolló el criterio para determinar cuando una sequía o temporada húmeda inicia y termina, a la cual se ajusta el PDSI.

El índice de Palmer varía gruesamente entre -6.0 y +6.0 . Palmer seleccionó arbitrariamente la escala de clasificación de las condiciones de humedad (tabla 6) basado en su estudio original de áreas en Iowa y Kansas. Idealmente el índice de Palmer esta diseñado de manera que las desviaciones de humedad de una región a otra sean similares.

Tabla 6. Clasificación de PDSI para períodos seco y húmedo.

4.0 o más	Extremadamente húmedo
3.0 a 3.99	Muy húmedo.
2.0 a 2.99	humedad moderada.
1.0 a 1.99	Humedad leve
0.50 a 0.99	Temporada de humedad incipiente.
0.49 a -0.49	Cerca del normal.
-.50 a -0.99	Temporada de resequedad incipiente.
-1.0 a -1.99	Sequía media.
-2.0 a -2.99	Sequía moderada
-3.0 a -3.99	Sequía severa.
-4.0 o menor	Sequía extrema.

El índice de Palmer es la medida más sensitiva efectiva de impactos a las condiciones de humedad del suelo, tal como la agricultura (Willeke et al. 1994). También ha sido útil como una herramienta para monitorear sequías y ha sido usada para el inicio y término de planes de contingencia de sequías.

Alley (1984) identifica tres características positivas del índice de Palmer que contribuyen a su popularidad: (1) suministra una decisión con una medida de la anormalidad de climas recientes para una región. (2) suministra una oportunidad para colocar condiciones corrientes en una perspectiva histórica y (3) suministra una espacial y temporal representación de sequías históricas.

Índice de Precipitación Estandarizado. El entender que un déficit de precipitación tiene diferentes impactos en los acuíferos, almacenamientos de agua, humedad del suelo, escurrimientos; llevó a McKee et al. 1933 a desarrollar el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). el SPI fue diseñado para cuantificar el déficit de precipitación para escalas de tiempo múltiples. Dichas escalas reflejan el impacto de las sequías sobre la disponibilidad de los diferentes almacenamientos de agua, de las condiciones de humedad del suelo y responde a las precipitaciones anormales en una escala de tiempo corta; mientras que el acuífero, escurrimientos y almacenamientos reflejan las anomalías de las precipitaciones durante períodos largos. Por estas razones McKee et al. (1993) originalmente calculó los SPI para escalas de tiempo de 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

El SPI es calculado tomando las diferencias de las precipitaciones de la media para un escala de tiempo particular y las divide entre la desviación estándar. Debido a que la precipitación no es normalmente distribuida. entonces la media SPI para una escala de tiempo y un lugar es cero y la desviación estándar es uno. Esta es una desventaja debido a que el SPI está normalizado de manera que la humedad y la resequedad de los climas pueden ser representados en la misma forma. En adición, los períodos húmedos pueden también ser monitoreados usando el SPI.

La tabla 7 muestra el sistema de clasificación para definir las intensidades de las sequías que resultan del SPI. Además definió los criterios para un "evento de sequía" para cualquier tiempo de escala. Un evento de sequía ocurre en cualquier tiempo si el SPI es negativo

continuamente y alcanza intensidades donde el SPI es -1.0 o menor. el evento se termina cuando el SPI se vuelve positivo.

Cada evento de sequía, por lo tanto, tiene una duración definida para su inicio y término y una intensidad para cada mes que los eventos continuos. La magnitud acumulada de sequías puede también ser medida, McKee et al. (1993) llamaron a esta magnitud de sequía (DM) y la sumaba para todos los meses dentro de un evento de sequía.

Tabla 7. valores de SPI

VALORES SPI	CATEGORÍA DE SEQUÍA	TIEMPO EN CATEGORÍA
0.00 - -0.99	Sequía suave	24%
-1.00 - -1.49	Sequía moderada	9.2%
-1.50 - -1.99	Sequía severa	4.4%
-2.00 o menos	Sequía extrema	2.3%

La tabla 7 también muestra el porcentaje de tiempo que el SPI esta en cada una de las categorías de las sequías basado en un análisis de estaciones.

Debido a que el SPI es estandarizado, estos porcentajes se suponen que son de una distribución normal. El 2.3% de los valores de SPI caen dentro de las "sequías extremas". En contraste el Índice Palmer alcanza su categoría de "extremo" en un 10% más del tiempo a través de las regiones.

Índice de Lluvia Nacional (RI). El Índice de LLuvia Nacional fue desarrollado para comparar patrones de precipitación y sus anomalías en una escala continental y fue utilizado por Gomme y Petrassi (1994) para caracterizar recientes patrones de precipitación en Africa. Éste es calculado para cada país tomando la precipitación promedio anual de acuerdo a los promedios de precipitación de grandes períodos de todas las estaciones individuales. La escala para el tamaño del país es diseñada para correlacionar con otras estadísticas mundiales, especialmente de la producción agrícola. El RI permite hacer comparaciones para hacerse entre años y entre países.

La intensidad del RI también revela sus limitaciones. Gomme y Petrassi (1994) demostraron que el RI está bien correlacionado con la producción nacional de cosechas en Africa. Esto es debido a que el RI tiene una tendencia natural hacia la agricultura. Debido a que está cargado por la precipitación anual. Por lo que el propósito del RI es correlacionar lluvias con producciones en una escala-país, entonces, el RI es útil. Por lo que tiene menor utilidad cuando se trata de condiciones de sequía y de impactos hidrológicos, ambientales y sociales que resultan de la sequía.

Lluvia Segura (DR). Otra aproximación del monitoreo de lluvia que ha sido aplicado al continente Africano por Le Houérou et al. (1993) es el concepto de lluvia segura (DR). Los investigadores definen la lluvia segura como la cantidad de lluvia que ocurre en cuatro de los cinco años (estadísticamente, no consecutivamente), ellos recomiendan que los planes para la producción agrícola deberán estar basados en lluvias seguras. En Africa la relación del DR con la media no es una recta y refleja las características de la precipitación anual a través del continente. Cerca del Sahara, el DR es aproximadamente 40% - 50% de la media anual, mientras que la precipitación en la zona es de 700 - 800 mm, el DR es aproximadamente 80% de la media. estas características de la precipitación ilustran porqué el porcentaje de la normal puede ser engañoso en esos lugares y puede no ser útil. El DR podría tener un impacto al planear cuestiones agrícolas fuera de Africa, especialmente en otras regiones áridas.

El análisis de sequías en el estado de Sinaloa se estudió mediante técnicas hidrológicas aplicadas a los procesos de precipitación anual. El modelo que se utilizó fue el autorregresivo de primer orden AR(1). Este planteamiento se basa en que las cantidades de precipitación anual en el estado fluctúan aleatoriamente alrededor de una media bien definida y también al hecho de que la cantidad de precipitación anual en cualquier año no depende de cantidades de precipitación anual de los años previos (Yevjevich, 1964).

### **3.5 Análisis de los procesos de precipitación anual.**

Los procedimientos para aceptar el modelo autorregresivo que describiera las series de precipitación anual en Sinaloa, consistió en aplicar cinco grupos de pruebas. Los test de

normalidad, independencia y estacionariedad fueron aplicados antes de asumir la forma del modelo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, se verificó que la serie de tiempo se adecuara al modelo autorregresivo AR(1).

Los parámetros del modelo autorregresivo de primer orden fueron estimados por el método de momentos. El coeficiente de autocorrelación de retraso uno de la población fue estimado desde la muestra observada y fue corregido por tendencia usando la corrección de Quenouille (J. D. Salas, 1980).

La prueba de normalidad aplicada para checar la suposición del modelo AR(1) fue realizada sobre los residuales derivados de las series de acuerdo a la estructura del modelo. Lo anterior se realizó con base en la teoría de que al probar las series residuales y comprobar la existencia de una muestra aleatoria que corresponde a una distribución de población normalmente independiente es equivalente a probar las series originales para demostrar que la serie es descrita mediante un proceso AR(1) (Elfhatih A. B. Eltahir, 1992).

Las conclusiones del análisis están basadas en los resultados de pruebas estadísticas a un 5% de nivel de significancia, ya que este se considera un nivel aceptable para la mayoría de las pruebas que se utilizan para revisar cambios climáticos.

### **3.6 Modelos autorregresivos.**

Los modelos autorregresivos (AR) han sido usados ampliamente en Hidrología y recursos hidráulicos desde 1960 para modelar series de tiempo hidrológicas periódicas y anuales. La aplicación de estos modelos ha sido eficiente en Hidrología debido a:

- La forma autorregresiva tiene un tipo intuitivo de dependencia del tiempo (El valor de una variable en el tiempo presente depende de los valores de tiempo previos).
- Son los modelos más simples para usar.

El desarrollo histórico de los modelos AR en Hidrología, pueden ser divididos en dos períodos: la década de los 60's iniciada por los trabajos de Thomas y Fiering (1962) y Yevjevich (1963) y la década de los 70's motivadas por la publicación del libro de Box y Jenkins (1970). Durante el primer período, el procedimiento usual para estimar los parámetros del modelo se ha realizado por el método de momentos y los test de bondad del modelo se basan en análisis de correlogramas.

### 3.6.1 Descripción de los modelos AR

Los modelos autorregresivos pueden tener parámetros constantes o con variaciones en el tiempo o una combinación de ambos. La primera es generalmente usada para modelar series de tiempo de valores anuales, mientras que las dos últimas pueden ser aplicadas a series de tiempo a intervalos que son una fracción del año. La formulación matemática de los modelos AR se presenta a continuación:

-Formulación matemática del modelo con parámetros constantes.

Consideremos una serie de tiempo estacionaria  $Y_t$  normalmente distribuida con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , la cual tiene una correlación autorregresiva (Marcoviana) o estructura con dependencia del tiempo con parámetros constantes. El modelo autorregresivo de orden  $p$ , denotado por  $AR(p)$ , representando la variable  $Y_t$ , puede escribirse en forma general como:

$$y_t = \mu + \phi_1(y_{t-1} - \mu) + \dots + \phi_p(y_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t \quad \dots \dots \dots (28)$$

Donde:

$Y_t$  es la serie dependiente del tiempo (variable) y  $\varepsilon_t$  es la serie independiente del tiempo (no correlacionada) que es independiente de  $Y_t$  y está también normalmente distribuida con media cero y varianza  $\sigma^2_\varepsilon$ .

Los coeficientes  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_p$  son llamados los coeficiente de autorregresión.

El conjunto de parámetros del modelo de la ec (28) son  $\{ \mu, \sigma^2, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_p, \sigma^2_{\epsilon} \}$ , deben ser especificados o estimados desde los datos. Estrictamente hablando, cualquier  $\sigma^2$  o  $\sigma^2_{\epsilon}$  deberán ser considerados dentro del conjunto de parámetros, debido a que se relacionan con los otros, sin embargo dichas varianzas están incluidas por conveniencia práctica.

El modelo AR(1) resulta al considerar solamente un término autorregresivo en la ec (24). Esto es para  $p = 1$ , la ec (28) se convierte en:

$$Y_t = \mu + \phi_1(Y_{t-1} - \mu) + \epsilon_t \dots\dots\dots (29)$$

Este modelo es llamado autorregresivo de primer orden o Markov de primer orden puesto que la variable Y en el tiempo t puede expresarse como una función única de Y en el tiempo t-1 más una parte aleatoria. Esto también es llamado autorregresivo de retraso uno o modelo de Markov de retraso uno. Los parámetros del modelo son  $\mu, \sigma^2, \phi_1, \sigma^2_{\epsilon}$ .

- Propiedades de los modelos AR.

Las principales propiedades de los modelos autorregresivos están relacionadas con el valor esperado, varianza, autocorrelación , autocorrelación parcial y las condiciones por conocer mediante los parámetros del modelo. Estas propiedades son importantes puesto que constituyen las bases para los procedimientos y están definidas por:

$$E( Y_t ) = \mu \dots\dots\dots (30)$$

$$E( \epsilon_t ) = 0 \dots\dots\dots (31)$$

$$\text{Var}( Y_t ) = \sigma^2 \dots\dots\dots (32)$$

$$\text{Var}(\epsilon_t) = \sigma^2_{\epsilon} \dots\dots\dots (33)$$

Los parámetros  $\mu, \sigma^2$  y  $\sigma^2_{\epsilon}$ . serán estimados desde datos históricos .

Las varianzas  $\sigma^2$  y  $\sigma^2_{\epsilon}$  están relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\epsilon}^2 = \sigma^2 \left( 1 - \sum_{j=1}^p \phi_j \rho_j \right) \dots\dots\dots (34)$$

Donde:

$\phi_j$  es el jésimo coeficiente de autorregresión y  $\rho_j$  es el coeficiente de autocorrelación de retraso  $j$  de la variable  $Y_t$ .

Para el modelo AR(1), la ec (34) puede ser simplificada a:

$$\sigma_{\epsilon}^2 = \sigma^2 (1 - \phi_1^2) \dots\dots\dots (35)$$

Función de autocorrelación. La función de autocorrelación  $\rho_k$  de la variable  $Y_t$ , de la ec (21) se obtiene multiplicando ambos lados de la ec (21) por  $Y_{t-k}$  y tomando los valores esperados término a término. Esto satisface la ecuación diferencial (conocida como ecuación de Yule-Walker).

$$\rho_k = \phi_1 \rho_{k-1} + \phi_2 \rho_{k-2} + \dots + \phi_p \rho_{k-p} \quad \text{Para } k > 0 \dots\dots\dots (36)$$

La cual es debida a Yule (1927) y Walker (1931). Esta ecuación es comúnmente usada para estimar los parámetros de los modelos AR(p) por el método de momentos, como también para determinar el correlograma  $\rho_k$  para un conjunto de parámetros dados  $\phi_j, j = 1, 2, 3, \dots, p$ . Es importante conocer la forma del  $\rho_k$  para un modelo AR(p), porque esto puede servir para identificar el orden del modelo de una serie de tiempo dada. También para comparar el correlograma de la muestra con el correlograma del modelo.

Para el modelo AR(1) o  $p= 1$ , la ec (36) da la función de autocorrelación explícita:

$$\rho_k = \phi_1^k \quad k > 0 \dots\dots\dots (37)$$

Para  $\phi_1$  positivo,  $\rho_k$  de la ec (37) decae exponencialmente a cero mientras que para  $\phi_1$  negativo oscila en el signo. La fig 11 muestra dos ejemplos de series de tiempo generadas usando

el modelo AR(1) de la ec (29) y su correspondiente autocorrelación  $\rho_k$  de la ec (37). Observe las diferentes formas del correlograma en cada caso.

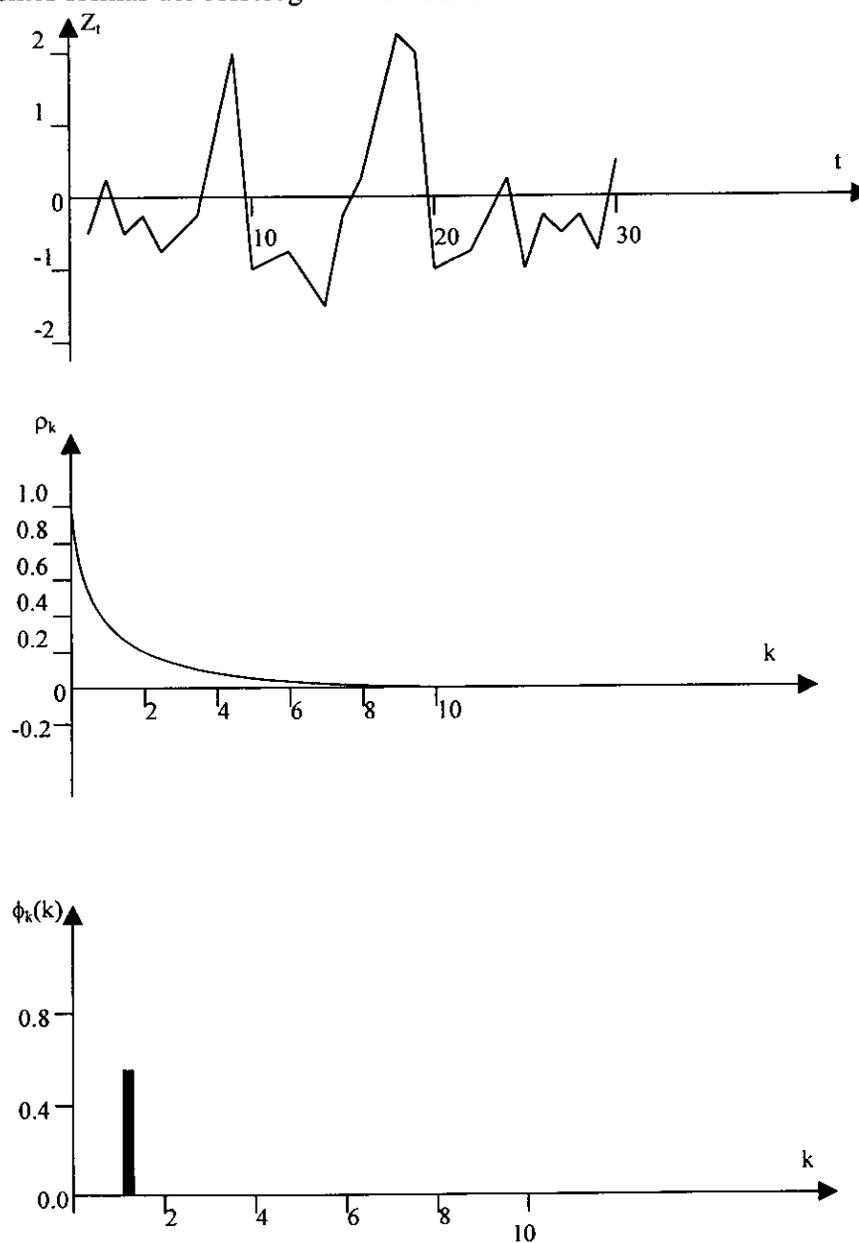


Fig. 11. Series de tiempo de la ecuación (29), función de autocorrelación de la ecuación(37) y la función de autocorrelación parcial, ec. (6)

Para determinar el correlograma  $\rho_k$  de un modelo AR de orden  $p$  con cualquier conjunto de parámetros conocidos o estimados  $\phi = \{ \phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_p \}$  la ec (36) debe ser resuelta simultáneamente para obtener primeramente  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{p-1}$ . Entonces para  $k \geq p$ , la ec (36) es usada recursivamente para encontrar  $\rho_k$ ,

### Modelación AR de series anuales de tiempo

Considere la variable hidrológica anual  $X_t$  que en general puede ser normal o no normal. Considere además que si  $X_t$  es no normal, una transformación apropiada puede ser usada para hacerla normal.

$$Y_t = g(X_t) \dots\dots\dots(38)$$

Donde  $g$  es la función de transformación y  $Y_t$  es la variable normal. Por consiguiente los modelos descritos en este trabajo se referirán a la variable normal  $Y_t$ .

Los modelos AR considerados para  $Y_t$  son:

$$Y_t = \mu + Z_t \dots\dots\dots(39)$$

Donde  $Y_t$  tiene  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$  y  $Z_t$  es cualquier modelo AR(0)

$$Z_t = \varepsilon_t \dots\dots\dots(40)$$

o el modelo AR(1)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t \dots\dots\dots(41)$$

O en general el modelo AR(p)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \phi_3 Z_{t-3} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots(42)$$

Los parámetros de los modelos deben ser estimados de datos históricos y usar criterios apropiados para seleccionar el orden de los modelos AR.

Estimación de parámetros para modelos AR anuales.

Considerar una muestra disponible de datos hidrológicos anuales denotados por  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  donde N es el número de años con datos. Estos datos pueden ser normales o transformarse a normales como se indicó anteriormente. En general la secuencia normal será representada por  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$ . Con esta secuencia de datos podemos estimar los parámetros  $\{\mu, \sigma^2, \phi_1, \dots, \phi_p; \sigma_\varepsilon^2\}$  del modelo AR(p).

Una vez que  $\mu$  y  $\sigma^2$  son estimados por las ec (4) y (5), los parámetros restantes  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_p, \sigma_\varepsilon^2$  del modelo AR son estimados usando la secuencias

$$Z_t = Y_t - \bar{Y} \quad \text{para } t = 1, 2, 3 \dots N \quad \dots\dots\dots(43)$$

Los parámetros  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$  son estimadores de la solución del sistema de ecuaciones lineales p en la ec (32). Donde los coeficientes de correlación poblacional  $\rho_j$  son reemplazados por el coeficiente de correlación de la muestra  $r_j$  y los parámetros  $\Phi_j$  son reemplazados por el estimador  $\hat{\phi}_j$

esto es:

$$r_k = \hat{\phi}_1 r_{k-1} + \hat{\phi}_2 r_{k-2} + \dots + \hat{\phi}_p r_{k-p} \quad \text{para } k > 0 \quad \dots\dots\dots(44)$$

Donde  $r_1$  y  $r_2$  son calculados desde la ecuación de autocorrelación parcial.

En particular para un modelo AR(1) o  $p = 1$  la ec (40) da:

$$\hat{\phi}_1 = r_1 \quad \dots\dots\dots(45)$$

Finalmente el parámetro  $\sigma_e^2$  es estimado desde la ec. (30) mediante el uso del estimador  $\hat{\sigma}^2, \hat{\phi}_j$  y  $r_j$ , en lugar de  $\sigma^2, \phi_j$  y  $\rho_j$  respectivamente y multiplicándola por el factor  $N/(N - P)$  para obtener un estimador sin tendencia de  $\sigma_e$ , entonces

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{N\hat{\sigma}^2}{N-p} \left( 1 - \sum_{j=1}^p \hat{\phi}_j r_j \right) \quad \dots\dots\dots (46)$$

Por lo que para el modelo AR(1) la varianza residual es igual a:

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{N\hat{\sigma}^2}{(N-1)} (1 - \phi_1^2) \quad \dots\dots\dots (47)$$

Se realizó un programa de cómputo para aplicar el modelo autorregresivo AR(1).

### 3.6.2 Prueba sobre la suposición del modelo AR(1).

La verificación del modelo AR(1) puede realizarse mediante dos formas: (1) probar las hipótesis hechas para el modelo AR(1) y (2) comparando los correlogramas históricos (muestra) con algún modelo de correlograma ya preestablecido. Sin embargo, existen algunas situaciones en que el analista puede apartarse de alguno de esos test y puede decidir sobre el orden del modelo y los parámetros correspondientes basarlos en terreno no estadístico (J.D.Salas 1980).

Dos suposiciones del modelo necesitan ser revisadas, la independencia y la normalidad de los residuales del modelo.

Los residuales  $\varepsilon_t$  del modelo AR pueden ser determinados desde la ec (42) con los parámetros  $\phi_j$ 's reemplazados por su valor estimado  $\hat{\phi}_j$ 's, por lo tanto,  $\varepsilon_t$  puede ser escrito como:

$$\hat{\varepsilon}_t = Z_t - \hat{\phi}_1 Z_{t-1} - \hat{\phi}_2 Z_{t-2} - \dots\dots\dots - \hat{\phi}_p Z_{t-p} \quad \dots\dots\dots (48)$$

Donde la notación  $\hat{\varepsilon}_t$  es usada en lugar de  $\varepsilon_t$  para indicar los estimadores de los residuales de la muestra.

Para obtener el valor inicial  $\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2, \dots, \hat{\varepsilon}_p$  en la ec. (48) es necesario conocer los valores de  $z_0, z_1, \dots, z_{p+1}$  pero ellos no son conocidos. Una aproximación para determinar estos valores de  $z$  es a través de predicciones hacia atrás como sugirieron Box y Jenkins (1970), en cuyo caso la ec. (48) podría ser rápidamente resuelta. Pero para series hidrológicas anuales  $p$  es usualmente pequeña, es decir es del orden 1 o 2. Por lo que muy poco se perdería si los primeros valores de  $p$  de  $\hat{\varepsilon}_t$  se desprecian. Por lo que para el modelo AR(1) de la ec. (48) se producen los residuales  $\hat{\varepsilon}_2, \hat{\varepsilon}_3, \dots, \hat{\varepsilon}_N$  que son usados para los test de independencia y normalidad.

Para este trabajo se empleó el test de normalidad a través del coeficiente de sesgo y el de independencia con el test de Anderson, cuyas desarrollos se encuentran en los puntos 3.3.1.1. y 3.3.2.1. La fig. 13, presenta el diagrama de flujo de la metodología usada para estudiar las series de precipitación anual en Sinaloa.

### 3.6.3 Generación de muestras sintéticas.

Una vez que los parámetros del modelo AR son determinados y la bondad de sus test indican que el modelo es apropiado, entonces el modelo puede ser usado para generación anual de series sintéticas o para predecir valores anuales futuros.

El modelo para generación de series anuales sintéticas puede determinarse sustituyendo los parámetros estimados  $\bar{y}$  y  $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_p$  de las ecs. (39) y (42) y mediante la transformación inversa de las ec. (34), entonces el modelo generador es

$$\hat{X}_t = \hat{g}^{-1}(\hat{Y}_t) \dots\dots\dots (49)$$

Donde  $\hat{g}^{-1}$  denota el inverso de la función de transformación estimada  $\hat{g}$ . Por ejemplo si  $Y_t = \log(X_t)$ , entonces  $X_t = \text{antilog}(Y_t)$ , de las ecs. (39) y (42), la variable  $\hat{Y}_t$  es:

$$\hat{Y}_t = \bar{y} + \hat{Z}_t \quad \dots\dots\dots(50)$$

y

$$\hat{Z}_t = \hat{\phi}_1 \hat{Z}_{t-1} + \hat{\phi}_2 \hat{Z}_{t-2} + \dots + \hat{\phi}_p \hat{Z}_{t-p} + \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots(51)$$

Puesto que  $\varepsilon_t$  es normal con media cero y varianza  $\hat{\sigma}_\varepsilon^2$  podemos usar la variable normal estandarizada  $\xi_t$  de manera que  $\varepsilon_t = \hat{\sigma}_\varepsilon \xi_t$  entonces la última ecuación para  $\hat{Z}_t$  se convierte en:

$$\hat{Z}_t = \hat{\phi}_1 \hat{Z}_{t-1} + \hat{\phi}_2 \hat{Z}_{t-2} + \dots + \hat{\phi}_p \hat{Z}_{t-p} + \hat{\sigma}_\varepsilon \xi_t \quad \dots\dots\dots(52)$$

Por consiguiente las ecs. (49), (50) y (51), pueden ser usadas para generar series anuales sintéticas  $\hat{X}_t$ .

La modelación de series de tiempo hidrológicas siempre trae consigo una componente estocástica independiente, tal como  $\varepsilon$  en la ec (51) este planteamiento es a menudo llamado, proceso "blanqueo". Esto es ideal para que  $\varepsilon$  sea un ruido blanco o una variable normal, estacionaria e independiente.

En tal caso, la generación de series de tiempo sintéticas iniciará con la generación de variables normales independientes con media cero y varianza uno, entonces adicionando el tiempo y la estructura de dependencia espacial, también como componentes periódicas, cualquiera que sea necesario.

Varias técnicas de generación de números aleatorios normales independientes son presentadas en muchos libros, que tratan la técnica Monte Carlo (generación de muestras). similarmente varios programas de computadoras son realmente adecuados para generar dichos números.

Como una ilustración de generación de números aleatorios normales, Box and Müller (1958), proponen las siguientes ecuaciones:

$$\zeta_1 = \left[ \ln \left( \frac{1}{u_1} \right) \right]^2 \cdot \cos(2\pi u_2) \quad \dots\dots\dots (53)$$

$$\zeta_2 = \left[ \ln \left( \frac{1}{u_1} \right) \right]^2 \cdot \text{sen}(2\pi u_2) \quad \dots\dots\dots (54)$$

Donde  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  son números aleatorios normales estándar y  $u_1$  y  $u_2$  son números aleatorios de la distribución uniforme (0, 1).

En la generación de números aleatorios normales, las pruebas de normalidad e independencia son importantes. A menudo estos números son llamados pseudonormales o números aleatorios pseudoindpendientes, debido a la tendencia que pueda ocurrir en el procedimiento de generación y pueda causar dificultades en pasar las dos pruebas anteriores.

El chequeo de la normalidad e independencia deberá hacerse antes de usar cualquier esquema de generación de números aleatorios normales que no ha sido previamente verificado.

Para una serie de tiempo singular, una vez que los números aleatorios normales independientes son generados, la serie de tiempo puede ser rápidamente generada adicionando otros componentes del modelo. Con sus correspondientes parámetros estimados.

### 3.6.4 Selección del número de muestras a ser generadas.

El teorema del límite central conduce a la conclusión de que la distribución de la media muestral de una racha  $m_r$  cualquiera, es asintóticamente normal  $N(\mu_r, \sigma_r/n)$ , en la cual  $\mu_r = E(m_r)$ ,  $\sigma_r$  es la varianza muestral de la racha y  $n$  es el número de muestras generadas sintéticamente correspondientes a un tamaño  $N$ , de tal manera que al menos 0.95 del estimador de  $m_r$  esté dentro de los límites de tolerancia  $\mu_r \pm \sigma_r/10$ , entonces:

$$P\left[\left(\mu_r - \frac{\sigma_r}{10}\right) \leq m_r \leq \left(\mu_r + \frac{\sigma_r}{10}\right)\right] \geq 0.95 \dots\dots\dots (55)$$

Se convierte en :

$$P\left[-\frac{\sqrt{n}}{10} \leq \frac{(m_r - \mu_r)\sqrt{n}}{\sigma_r} \leq \frac{\sqrt{n}}{10}\right] \geq 0.95 \dots\dots\dots (56)$$

Haciendo  $z = (m_r - \mu_r) \frac{\sqrt{n}}{\sigma_r}$  , se dice que z está normalmente distribuida con N(0,1) de manera que al menos.

$$P\left(z \leq -\frac{\sqrt{n}}{10}\right) = 0.025 \dots\dots\dots (57)$$

Es correcto para  $-\frac{\sqrt{n}}{10} = -1.96$  , o  $n = 400$ .

Puesto que un valor de una corrida (racha) dada es obtenida de una muestra de tamaño N la exactitud en la determinación de la media incrementa con el incremento del número n de muestras a generar. En esta forma la generación de n N observaciones es necesaria. Este número es seleccionado como una constante  $m = n N$ . Algunos autores otorgan a m el valor de 95,000 para los tamaños seleccionados de N de las muestras. por ejemplo para N = 25, 50, 100, 200 y 500, el número de muestras, n se vuelve m/ N o

N	25	50	100	200	500
n	3800	1900	950	475	192

### 3.6.5 Determinación de las características de las sequías.

Considérese la serie anual generada sintéticamente  $X_1, X_2, \dots, X_N$  y un nivel de demanda constante  $Y$  (nivel de truncamiento) como se muestra en la figura 13. Un déficit o sequía ocurre cuando una corrida (racha) negativa cumple con la condición de que  $X_t < Y$  consecutivamente durante uno o más intervalos de tiempo. En este estudio se considerarán únicamente las corridas negativas, ya que ellas son las que están relacionadas con las características de las sequías.

Una sequía puede ser determinada por su duración (longitud), suma e intensidad. La que se relaciona con duración, se denomina run-length, con su magnitud o suma run-sum y con su severidad o intensidad run- intensity. Los conceptos de cada una de ellas son:

Run-length. Son corridas negativas que se determinan en función del número de años consecutivos en que la precipitación es menor que la demanda. Por ejemplo un run-length de 4 indica que en cuatro años consecutivos la demanda fue mayor que la precipitación.

Run-sum. Es la diferencia en valor que existe entre el nivel de truncamiento constante y la precipitación sintética durante cada corrida o racha.

Run- intensity. Este parámetro mide la intensidad de la sequía por corridas o rachas y se calcula dividiendo la run-sum obtenida en una racha entre la longitud (run-length) de dicha racha.

La Figura 12. muestra como se definen las características de las sequías relacionadas con las series de tiempo anuales sintéticas. Se realizaron programas para aplicar los métodos no paramétricos run-length, run- intensity y run-sum a series de lluvias generadas

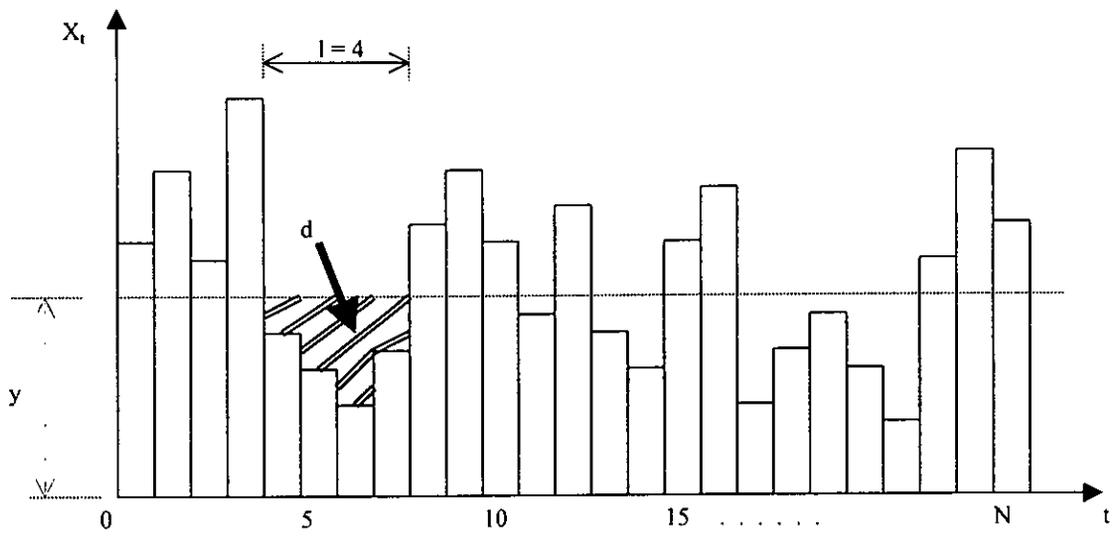


Fig. 12. Definición de las características de las sequías.

**4. APLICACIONES.**

**4.1 Descripción de las estaciones meteorológicas con base en su ubicación.**

De acuerdo a los datos de precipitación obtenidos en la Dirección General del Servicio Meteorológico nacional, en Sinaloa se tienen en operación 160 estaciones climatológicas distribuidas de forma irregular, por ejemplo los municipios de Culiacán, el Fuerte y Guasave concentran el 36.25% de las estaciones (58 estaciones). La tabla 8 muestra la distribución de las estaciones de acuerdo a su ubicación por municipio.

Tabla 8. Distribución de estaciones climatológicas por municipio en Sinaloa.

<b>MUNICIPIO</b>	<b>CANTIDAD DE ESTACIONES</b>	<b>PORCENTAJE %</b>	<b>SUPERFICIE has</b>
Ahome	11	6.875	439,289
Angostura	1	0.625	144,763
Badiraguato	11	6.875	586,475
Concordia	6	3.75	451,240
Cosalá	3	1.875	152,434
Culiacán	23	14.375	266,512
Choix	9	5.625	475,890
Elota	7	4.375	151,815
Escuinapa	6	3.75	163,322
El Fuerte	19	11.875	384,302
Guasave	16	10.0	346,441

Mazatlán	6	3.75	306,848
Mocorito	7	4.375	240,549
Rosario	6	3.75	272,328
Salvador Alvarado	2	1.25	119,750
Navolato	6	3.75	228,500
San Ignacio	10	6.25	465,097
Sinaloa	11	6.875	618,645
Estado	160	100.00	5'809,200

Otra descripción relacionada con la ubicación de las estaciones consiste en que el 75% de ellas se localizan en las zonas altas del estado junto a presas, ríos y arroyos importantes. En cambio, el 14.375% se encuentra en las zonas de los valles y el 10.65% en las zonas costeras. No obstante lo anterior, los municipios de Navolato, Angostura, Salvador Alvarado y Rosario carecen de estaciones sobre sus franjas costeras. La fig. 14 presenta la ubicación de las estaciones climatológicas en el estado de Sinaloa.

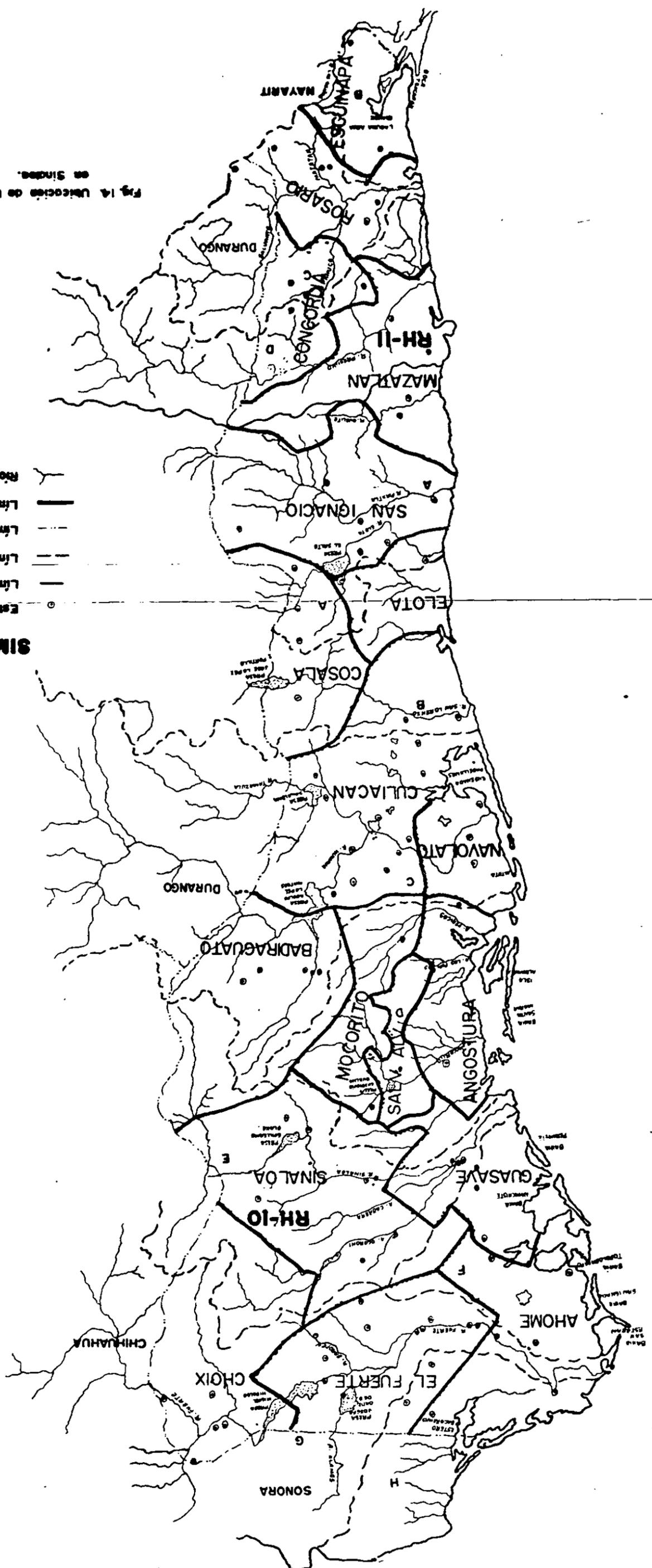
#### **4.2 Precipitación promedio mensual y anual.**

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis estadístico de las precipitaciones medias mensuales, se observó una gran diversidad en las alturas de precipitación, duración e intensidad de las mismas. También se detectó la existencia de años muy secos y años lluviosos.

Debido a lo anterior, se tiene que los meses con mayor precipitación pluvial son junio, julio, agosto y septiembre; donde se tienen rangos con valores desde 585.2 mm en el mes más lluvioso hasta 53.8 mm en el mes más seco.

Fig. 14. Ubicación de las estaciones climatológicas en Sinaloa.

- SIMBOLOGIA:**
- Estación Climatológica
  - Límite de cuenca hidrográfica
  - - - Límite de región hidrográfica
  - - - Límite estatal
  - Límite municipal
  - ~ Ríos y arroyos



En lo que respecta a la duración de la lluvia se encontró que un grupo de 49 estaciones registran en promedio una duración de 5 meses y 5 estaciones muestran 4 meses de duración de lluvia en promedio. La tabla 9 describe el número de estaciones con sus respectivas duraciones y el porcentaje de las mismas.

Tabla 9. Cantidad de estaciones climatológicas de acuerdo a la duración mensual de la lluvia.

CANTIDAD DE ESTACIONES	DURACIÓN DE LA LLUVIA	%
5	11	3.125
17	10	10.625
14	9	8.75
11	8	6.875
20	7	12.5
39	6	24.375
49	5	30.625
5	4	3.125

En cuanto a la precipitación anual se observó que los valores aumentan del Norte hacia al Sur y conforme se asciende de la costa a la sierra, siendo la precipitación media máxima anual de 1524.6 mm y la media mínima de 197.333mm.

Lo anterior se describe en la figura 15 que presenta el plano de isoyetas para el estado de Sinaloa, el cual indica que en la porción de la Llanura Costera del Pacífico, las isoyetas se presentan en forma paralela a la costa y se incrementan de Oeste a Este. En la porción Noroeste y Centro de esta provincia las precipitaciones varían de 200 a 700 mm, mientras que en la franja de la porción Sureste los valores sobrepasan a los 1000 mm.

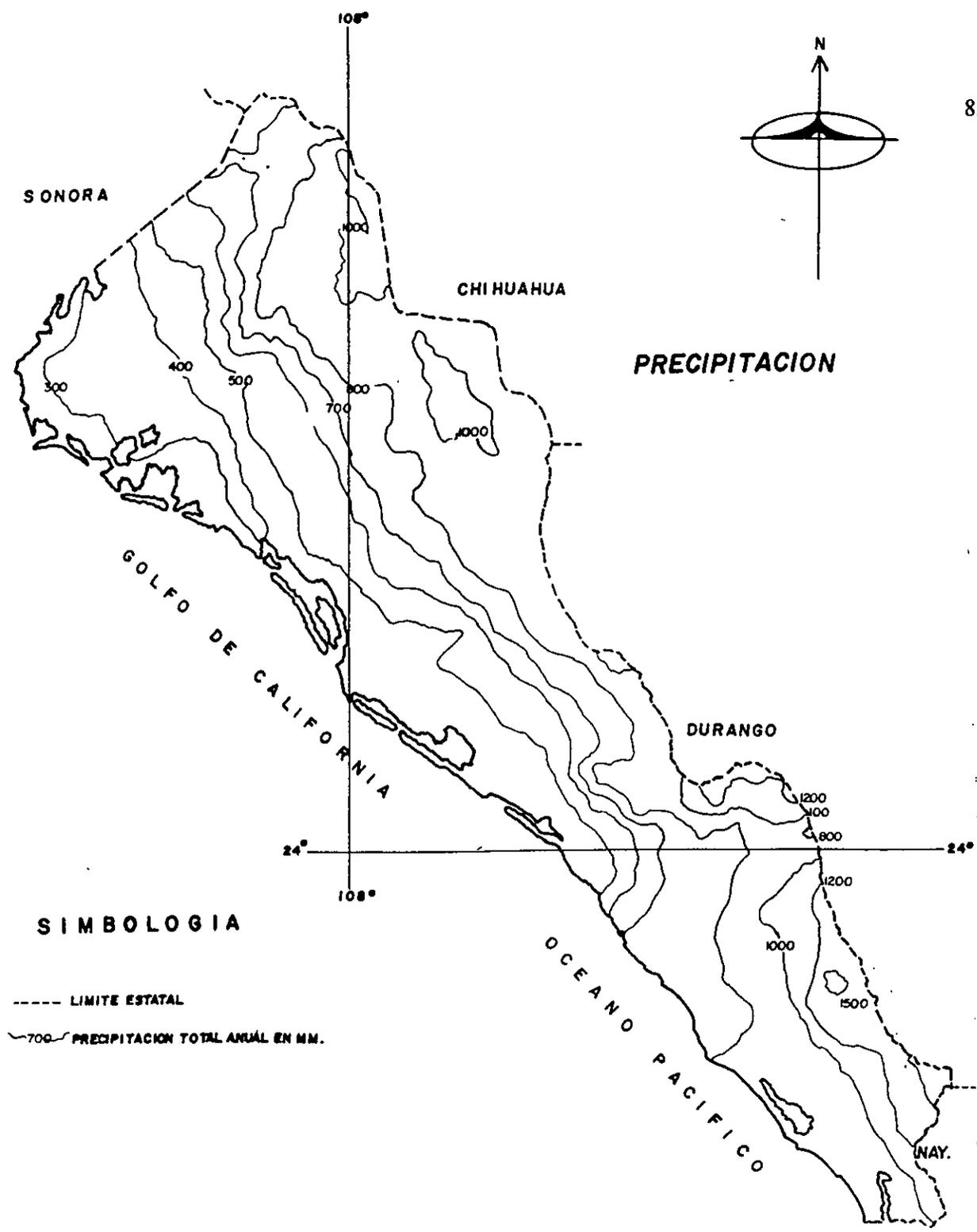


Fig. 15. Plano de isoyetas para el estado de Sinaloa.

En la Sierra Madre Occidental las variaciones de isoyetas siguen la misma tendencia que en la provincia Llanura Costera del Pacífico salvo en algunas áreas de mayor elevación. En la porción Noroeste de esta provincia el rango de precipitación es de 600 mm hasta 1000 mm mientras que en la parte sureste el rango varía de 800 mm hasta más de 1500 mm.

#### **4.3 Agrupamiento de las estaciones climatológicas.**

Para realizar una generalización de los resultados de precipitación en Sinaloa, se requirió agrupar las estaciones en torno a la estructura que presentan las series de tiempo. Para llevar a cabo esta acción se consideraron cuatro parámetros: la media de las series, los coeficientes de variación, duración de la estación de Lluvia y el coeficiente de autocorrelación de retraso uno.

Tomando como referencia los valores del coeficiente de variación, el estado de Sinaloa se dividió en ocho subregiones con diferencias de intervalos de 0.09.

La tabla 10 muestra el agrupamiento de las estaciones con base en el coeficiente de variación y presenta los datos de precipitación promedio, duración promedio de la lluvia y desviación estándar de las series y la fig 16 presenta las ocho regiones de precipitación homogénea encontradas.

De acuerdo a agrupación hecha se encontró que en el 95 % de las estaciones, el coeficiente de variación se encuentra en el intervalo de 0.71-0.14, situación que refleja una homogeneidad general de los datos de precipitación. Más aún, el 56% de las estaciones presentan un coeficiente de variación entre 0.344 a 0.254.

#### **4.4 Resultados de las pruebas de normalidad.**

Como se muestra en la figura 13, el chequeo de la normalidad de las series de precipitación fue el primer paso para estudiar el procesos de precipitación anual. La prueba de sesgo de normalidad se aplicó sobre la base de que el coeficiente de sesgo para una variable normal es cero.

Fig. 10. Estaciones ordenadas mediante el valor descendente del coeficiente de variación

Número	Municipio	No. de estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Media de la serie	Desviación Estándar	Coeficiente de variación	Duración de la lluvia en meses
1	Ahome	25060	25° 48'	109°	8	603.9875	782.108862	1.29490902	5
2	Culliacán	25159	24° 28' 12"	107° 19' 12"	4	369.375	384.334241	1.040498791	5
3	Guasave	25013	25° 36'	108° 34' 48"	18	369.13333	264.021357	0.715246594	5
4	Guasave	25148	25° 34' 48"	108° 27'	7	807.985714	542.493058	0.671414171	10
5	Culliacán	25164	24° 48'	107° 31' 48"	3	346.03333	222.803419	0.643878493	6
6	Culliacán	25161	24° 18'	107° 22' 12"	5	361.58	223.976555	0.619438451	5
7	Culliacán	25179	24° 40' 12"	107° 28' 48"	3	473.8	291.936243	0.61615923	5
8	Guasave	25144	25° 40' 12"	105° 19' 12"	5	227.62	139.192212	0.611511343	5
9	Rosario	25134	23° 12'	105° 24'	5	708.56	429.503019	0.606163231	8
10	Escuinapa	25149	22° 4' 12"	105° 43' 48"	15	778.925	468.579786	0.601572406	7
11	Ahome	25098	25° 37' 12"	109° 3'	23	300.578261	178.545517	0.594006754	5
12	Sinaloa	25089	25° 48'	108° 13' 12"	5	421.6	249.19995	0.591081475	5
13	Mazatlán	25052	23° 30'	106° 19' 12"	28	917.421429	538.990086	0.587505446	9
14	Mazatlán	25135	23° 10' 48"	106° 25' 12"	6	704.36667	410.266902	0.582462117	7
15	El Fuerte	25142	26° 6'	108° 45'	5	408.14	220.884807	0.541198625	5
16	Navolato	25171	24° 46' 48"	107° 40' 48"	5	366.4	194.450456	0.530705393	5
17	Eliota	25050	23° 55' 12"	106° 54'	19	471.557895	244.940912	0.51942914	6
18	Culliacán	25166	24° 33'	107° 22' 12"	5	437.84	219.443006	0.501194514	5
19	Guasave	25133	25° 36'	108° 34' 12"	6	139.98333	69.0058089	0.492957332	5
20	Sinaloa	25158	25° 49' 12"	108° 13' 12"	8	630.45	305.470644	0.484527947	6
21	Ahome	25022	26° 16' 12"	109° 22' 48"	18	401.48333	194.473245	0.484386849	6
22	Ahome	25151	26° 18'	109° 1' 12"	9	330.8	160.11417	0.48402107	5
23	Sinaloa	25090	25° 49' 12"	108° 13' 12"	17	487.335294	235.438975	0.483114968	5
24	Navolato	25162	24° 43' 12"	107° 34' 48"	5	386.18	185.735382	0.480955466	6
25	El Fuerte	25059	26° 10' 12"	108° 52' 12"	19	513.089474	244.956186	0.477414171	6
26	Navolato	25165	24° 33'	107° 31' 48"	5	450.36	213.508824	0.474084786	5
27	Ahome	25042	25° 58' 48"	109° 19' 48"	24	336.470833	159.422175	0.473806819	5
28	Sinaloa	25137	25° 55' 48"	108° 27'	4	382.3	177.934613	0.465431894	5
29	Mocorito	25099	25° 37' 12"	108° 3'	14	312.821429	143.489384	0.458694228	5
30	Culliacán	25076	24° 25' 48"	107° 13' 48"	24	447.61667	203.976228	0.455693994	5
31	Guasave	25178	25° 43' 12"	108° 19' 48"	7	703.557143	315.091007	0.447854179	7
32	Badiraguato	25111	25° 21'	107° 33'	7	602.442857	265.120689	0.440076077	6
33	Ahome	25116	25° 48'	109°	23	356.926087	152.818074	0.428150476	6
34	Culliacán	25075	25° 52' 48"	105° 45'	11	612.465455	259.683081	0.423996291	5
35	San Ignacio	25021	23° 43' 48"	106° 46' 48"	22	659.809091	279.269018	0.423257305	7
36	Navolato	25160	24° 40' 48"	107° 46' 48"	5	381.4	158.562243	0.415737396	5
37	El Fuerte	25088	25° 55' 12"	108° 54'	25	399.604	163.669257	0.409578625	5

Fig. 10. Estaciones ordenadas mediante el valor descendente del coeficiente de variación

Número	Municipio	No. de estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Media de la serie	Desviación Estándar	Coeficiente de variación	Duración de la lluvia en meses
38	Culliacán	25170	24° 54'	107° 31' 48"	4	511.45	208.945567	0.408535667	
39	Angostura	25030	25° 15'	108° 10' 48"	24	870.148148	344.881711	0.396348268	8
40	Mazatlán	25176	23° 30'	106° 28' 48"	7	702.271429	277.756138	0.395511089	7
41	El Fuerte	25061	26° 25' 12"	108° 43' 12"	15	520.493333	204.82153	0.393514226	7
42	Ahome	25185	25° 54'	109° 10' 12"	4	392.625	152.276818	0.387842898	5
43	Guasave	25040	25° 34' 48"	108° 28' 12"	3	384.86667	149.067781	0.387323176	6
44	El Fuerte	25082	26° 6'	108° 46' 12"	25	486.596	185.054606	0.380304413	5
45	Cosalá	25051	23° 54'	106° 54'	3	505.8667	190.65155	0.376881004	6
46	Mazatlán	25156	23° 19' 48"	106° 13' 48"	2	231.8	87.1155554	0.375822068	5
47	Guasave	25080	25° 43' 12"	108° 43' 48"	24	401.9	149.503913	0.371992817	5
48	El Fuerte	25143	26° 10' 12"	108° 31' 48"	5	316.2	117.207935	0.370676581	5
49	Ahome	25086	25° 57'	109° 1' 48"	22	388.940909	143.70972	0.369489855	6
50	Badiraguato	25177	25° 33'	107° 22' 12"	5	872.16	315.467606	0.361708409	9
51	Ahome	25048	25° 45'	108° 48'	14	402.55	144.892813	0.359937431	5
52	Mocorito	25117	25° 28' 48"	107° 55' 12"	25	638.688	228.05732	0.357071559	6
53	Culliacán	25167	24° 46' 48"	107° 6'	4	456.15	158.650339	0.347803001	5
54	Eliota	25101	24° 10' 12"	106° 40' 48"	22	808.695455	280.613836	0.346995688	9
55	Mazatlán	25192	23° 30'	106° 28' 12"	8	815.725	280.890069	0.344344073	9
56	El Fuerte	25174	26° 22' 48"	108° 33'		585.471429	200.294464	0.342108007	5
57	El Fuerte	25009	26° 4' 48"	108° 46' 48"	25	463.464	157.101169	0.338971676	5
58	Culliacán	25163	25° 1' 48"	107° 28' 12"	5	488.78	165.289873	0.338168241	6
59	El Fuerte	25053	26° 13' 12"	108° 36'	25	621.384	209.03445	0.336401404	6
60	Rosario	25073	23° 4' 12"	105° 28' 12"	43	1182.76744	389.490659	0.329304516	11
61	Concordia	25070	23° 25' 12"	105° 55' 48"	22	1274.04091	418.203717	0.328249834	10
62	S. Alvarado	25115	25° 28' 12"	108° 4' 48"	25	572.108	187.327496	0.327433799	6
63	Culliacán	25069	24° 55' 48"	107° 22' 48"	25	742.724	240.715978	0.324098828	6
64	Navolato	25129	24° 33'	109° 36'	3	399.8333	127.08526	0.317845612	5
65	Rosario	25186	23° 1' 12"	105° 40' 12"	4	1110.8	351.314342	0.316271464	11
66	Guasave	25038	25° 43' 12"	108° 28' 12"	17	496.6	155.889484	0.31391358	5
67	El Fuerte	25035	26° 19' 48"	108° 55' 48"	14	412.485714	128.957911	0.312636066	5
68	Choix	25019	26° 13' 18"	108° 16' 12"	25	745.524	231.162124	0.310066643	6
69	Mocorito	25064	25° 28' 48"	107° 57' 12"	16	668.2	207.017513	0.309813698	6
70	Escuinapa	25130	22° 49' 48"	105° 46' 48"	4	455.975	139.679714	0.306331957	5
71	S. Ignacio	25028	23° 57'	106° 43' 12"	30	655.81667	199.499279	0.304199768	6
72	Mocorito	25063	25° 28' 48"	107° 55' 12"	3	602.9	181.021214	0.300250811	5
73	Choix	25017	26° 43' 48"	108° 19' 48"	16	778.4375	232.929285	0.299226701	6
74	Guasave	25027	25° 34' 48"	108° 28' 12"	24	483.854167	143.307799	0.296179735	5
75	Sinaloa	25085	26° 7' 48"	107° 57'	28	878.935714	258.167501	0.293727399	8

Fig. 10. Estaciones ordenadas mediante el valor descendente del coeficiente de variación

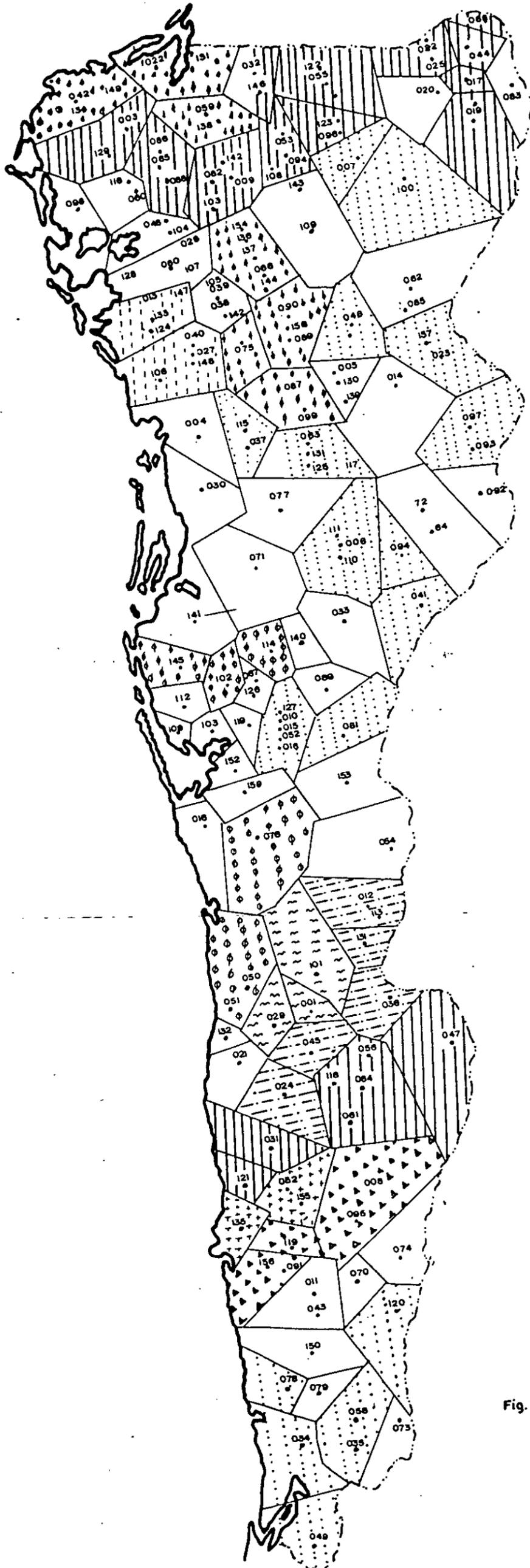
Número	Municipio	No. de estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Media de la serie	Desviación Estándar	Coeficiente de variación	Duración de la lluvia en meses
76	Mazatlán	25119	23° 21'	106° 15'	16	721.15	210.260023	0.29156212	8
77	Choix	25002	26° 49' 12"	108° 25' 12"	21	691.57619	199.98377	0.289170988	7
78	Sinaloa	25066	25° 55' 48"	108° 27'	29	570.624138	164.705843	0.288641563	5
79	Culiacán	25057	24° 48'	107° 24'	5	581.28	166.733371	0.286838307	5
80	San Ignacio	25047	24° 15'	106° 15'	12	1061.19167	303.881159	0.28635841	11
81	Rosario	25150	23° 4' 48"	105° 55' 12"	12	910.9333	256.081455	0.281119875	9
82	Sinaloa	25005	25° 49' 12"	107° 55' 12"	19	831.7	233.700815	0.280991722	9
83	Choix	25068	27° 1' 12"	108° 25' 12"	25	934.008	260.75448	0.279177994	10
84	Culiacán	25033	25° 6'	107° 24'	25	908.892	250.471342	0.275578773	10
85	Choix	25044	26° 54'	108° 22' 12"	29	800.79322	220.426337	0.275259994	10
86	Eloia	25132	23° 55' 12"	106° 54'	5	322.26	88.6720813	0.275156958	5
87	El Fuerte	25023	26° 25' 48"	108° 37' 12"	25	635.252	173.149262	0.272567834	6
88	Rosario	25078	23°	105° 55' 12"	23	850.73913	229.741522	0.270049318	8
89	Badiraguato	25110	25° 22' 12"	107° 31' 48"	24	970.429167	261.533131	0.269502546	11
90	Mocorito	25071	25° 4' 48"	107° 46' 48"	24	649.5625	174.803701	0.269109902	6
91	Mazatlán	25031	23° 33'	106° 28' 12"	30	662.74	178.247361	0.268955188	6
92	San Ignacio	25001	24° 4' 12"	106° 39'	25	793.26	212.793768	0.268252235	7
93	Eloia	25128	24° 4' 12"	105° 40' 12"	7	337.4	89.6598944	0.265737683	5
94	Badiraguato	25092	25° 52' 12"	107° 18'	30	783.31333	207.784673	0.265263803	7
95	Culiacán	25015	24° 49' 12"	107° 24'	25	666.612	175.455449	0.263204756	6
96	Concordia	25011	23° 16' 12"	106° 3'	28	806.657143	211.95585	0.262758288	9
97	San Ignacio	25118	23° 55' 48"	106° 25' 48"	30	893.63	233.832125	0.261665482	8
98	Rosario	25058	23° 1' 48"	105° 45'	18	1094.56111	284.782592	0.26017971	10
99	Mocorito	25077	25° 24'	107° 49' 48"	17	712.158824	184.871408	0.259592947	7
100	El Fuerte	25032	26° 28' 48"	108° 43' 48"	17	586.205882	152.138779	0.259531307	5
101	El Fuerte	25065	25° 58' 12"	108° 55' 48"	23	297.530435	76.9795217	0.258728226	4
102	Choix	25018	26° 43' 12"	108° 16' 48"	2	685	173.948268	0.253939077	7
103	Badiraguato	25006	25° 22' 12"	107° 33'	19	944.255	239.04373	0.253155906	9
104	Concordia	25112	23° 16' 48"	106° 4' 12"	6	701.116667	175.997766	0.251024935	8
105	Cosalá	25087	24° 30'	106° 51'	25	745.772	186.211807	0.249688995	6
106	Cosalá	25181	24° 22' 48"	106° 36'	5	1236.46	307.337214	0.248562197	10
107	Concordia	25029	23° 25' 48"	105° 49' 48"	29	1097.17931	270.791804	0.246807246	10
108	San Ignacio	25024	23° 45'	106° 31' 48"	30	756.623333	184.530726	0.243887173	7
109	Badiraguato	25094	25° 39'	107° 22' 48"	15	904.95333	216.447572	0.239180922	10
110	Cosalá	25012	24° 25' 12"	106° 42'	20	933.82	221.14709	0.236819826	10
111	Mocorito	25131	25° 28' 12"	107° 55' 12"	6	357.25	84.566394	0.236714889	6
112	Culiacán	25043	23° 58' 48"	107° 46' 48"	30	815.55	191.799369	0.23517794	9
113	Sinaloa	25175	26° 4' 48"	107° 51'	4	881.55	205.83.9492	0.23349724	9

Fig. 10. Estaciones ordenadas mediante el valor descendente del coeficiente de variación

Número	Municipio	No. de estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Media de la serie	Desviación		Coeficiente de variación	Duración de la lluvia en meses
							Estándar			
114	San Ignacio	25084	23° 55' 58"	106° 25' 48"	11	821.3636	191.414875	0.233045237	9	
115	San Ignacio	25045	23° 57'	106° 37' 12"	24	784.7667	182.818729	0.232959336	7	
116	Culiacán	25172	24° 45'	107° 22' 48"	6	761.53333	175.873007	0.230945909	8	
117	Sinaloa	25046	25° 54'	108° 1' 12"	25	871.884	200.705744	0.23019776	9	
118	Salvador Alv.	25037	25° 28' 12"	108° 4' 48' 0"	4	559.875	127.959873	0.228550789	7	
119	El Fuerte	25055	26° 28' 12"	108° 36'	25	576.504	130.119997	0.22570528	6	
120	El Fuerte	25122	26° 28' 12"	108° 42'	10	519.5	116.754529	0.22474404	6	
121	El Fuerte	25007	26° 21'	108° 28' 48"	25	721.88	161.394958	0.223575882	7	
122	Mazatlán	25091	23° 19' 48"	106° 13' 12"	30	725.99333	160.395184	0.220932035	6	
123	Badiraguato	25041	25° 21'	107° 13' 48"	22	1026.39091	225.189251	0.219399109	10	
124	Concordia	25095	23° 34' 48"	106° 7' 12"	8	1047.3	219.697532	0.209775167	10	
125	El Fuerte	25114	26° 25' 48"	106° 37' 48"	3	597.3333	124.075676	0.207715987	5	
126	Culiacán	25081	24° 48'	107° 9'	25	845.496	173.763991	0.205517224	8	
127	Badiraguato	25097	25° 51'	107° 22' 48"	30	985.53333	199.041434	0.201963169	9	
128	Choix	25100	26° 22' 12"	108° 18'	30	801.07333	159.191561	0.198722832	10	
129	Escuinapa	25034	22° 51'	105° 46' 48"	2	629.05	123.390133	0.19615314	6	
130	Sinaloa	25054	26° 3'	106° 19' 48"	23	793.178261	152.006582	0.191642396	8	
131	Culiacán	25010	24° 48'	107° 24'	4	599.15	114.414233	0.190960916	5	
132	Badiraguato	25093	25° 52' 48"	107° 21'	24	1237.0875	232.870786	0.18824116	11	
133	Cosalá	25036	24° 13' 48"	106° 30'	11	1524.68182	282.658217	0.18538833	10	
134	Navolato	25169	24° 31' 48"	107° 37' 48"	4	529.575	97.3239393	0.183777443	7	
135	Navolato	25123	24° 45'	107° 31' 48"	5	580.78	105.336684	0.18137106	5	
136	Escuinapa	25049	22° 31' 48"	105° 28' 12"	25	1092.332	196.662061	0.180038725	10	
137	Ahome	25003	25° 55' 12"	109° 10' 48"	24	494.795833	88.7623328	0.179391836	5	
138	Choix	25083	26° 54'	108° 9'	13	688.4	122.670181	0.178196079	6	
139	El Fuerte	25025	26° 31' 12"	108° 36'	25	656.66	115.274958	0.175547404	6	
140	El Fuerte	25056	26° 18'	108° 43' 12"	16	746.027064	129.914392	0.174141661	7	
141	Rosario	25079	23°	105° 51'	5	471.02	78.0966837	0.165803328	6	
142	Concordia	25074	23° 30'	105° 52' 48"	17	1203.39412	193.562963	0.160847523	10	
143	Cosalá	25113	24° 25' 12"	106° 42'	4	546.125	84.7252963	0.155139018	7	
144	Guasave	25139	24° 45'	105° 22' 48"	3	197.33333	29.0916087	0.147424709	6	
145	Culiacán	25016	24° 48'	107° 24'	10	613.76	83.4835074	0.136019792	6	
146	Sinaloa	25188	26° 3'	108° 25' 12"	2	1210.25	164.402327	0.135841625	9	
147	Choix	25190	26° 52' 12"	107° 22' 12"	2	932.35	126.501403	0.135680166	10	
148	Mocorito	25125	25° 28' 12"	107° 55' 12"	5	447.36	58.2603467	0.130231462	4	
149	Guasave	25124	25° 36'	108° 34' 48"	4	339.075	44.1433555	0.130187585	6	
150	Choix	25020	26° 43' 12"	108° 19' 48"	4	649.85	74.2440346	0.114247957	7	
151	Angostura	25004	25° 19' 12"	108° 10' 12"	4	500.725	54.300729	0.108444214	6	

Fig. 10. Estaciones ordenadas mediante el valor descendente del coeficiente de variación

Número	Municipio	No. de estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Media de la serie	Desviación		Coeficiente de variación	Duración de la lluvia en meses
							Estándar			
152	Navolato	25123	24° 33'	107° 31' 48"	3	440.7333	47.173329	0.107033739	4	
153	Cosalá	25183	24° 36'	106° 49' 12"	3	686.23333	67.7581237	0.098739191	7	
154	Cullacán	25126	24° 45'	107° 31' 48"	3	226.46667	19.6607053	0.086815006	5	
155	Angostura	25168	24° 49' 12"	107° 49' 12"	4	450.85	33.6592236	0.074657255	5	
156	Sinaloa	25184	25° 49' 48"	107° 55' 12"	2	624.25	18.3140656	0.02933771	5	
157	Cullacán	25127	24° 48'	107° 22' 48"	3	242.8	4.5508241	0.018743098	4	
158	Sinaloa	25180	25° 48'	107° 55' 12"	3	868.7	15.8391919	0.018233213	8	
159	Guasave	25039	25° 43' 12"	108° 28' 12"	2	379.85	5.02045815	0.013216949	6	
160	Sinaloa	25187	25° 49' 48"	107° 49' 48"	2	258.95	0.07071068	0.000273067	4	



**SIMBOLOGÍA .**

Valores del Coeficiente de Variación.

-  0.26 - 0.34
-  0.155 - 0.25
-  0.40 - 0.48
-  0.16 - 0.24
-  0.58
-  0.28 - 0.34
-  0.20 - 0.22
-  0.67 - 0.71

Fig. 16. Regiones de precipitación homogénea en función del coeficiente de variación

Ésta se realizó de acuerdo a los criterios de Snedecor y Cochran para muestras pequeñas. Ellos recomiendan usar un nivel crítico o de rechazo del 2% ( $\alpha=0.02$ ). Los resultados de la prueba que aparecen en la tabla 11, muestran que 68 estaciones cumplieron con la condición de normalidad y 92 resultados rechazadas. Por lo que estas últimas se transformaron en normales mediante la utilización de la función logaritmo. De la misma manera se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para probar la hipótesis nula de que la función cumulativa de una variable concuerda con alguna función de probabilidad especificada. La tabla 11 también presenta los resultados de este test.

#### **4.5 Resultados de la prueba de independencia.**

Como lo muestra la figura 13 la prueba de independencia de la serie fue el segundo paso en el procedimiento.

Se aplicó el test de Anderson para probar la dependencia con el tiempo utilizando el primer coeficiente de correlación serial, ya que se considera que una serie es independiente cuando el correlograma poblacional es cero, sin embargo, algunas series presentan un coeficiente de correlación fluctuando alrededor de cero. Por ello esta prueba identificó la serie con un 99% de confianza. De acuerdo a los resultados obtenidos se encontró que 141 (88.125%) estaciones cumplen con la condición de independencia y 19 (11.875%) rechazan este test.

Adicional a lo anterior. Se aplicó otra prueba para verificar la independencia de la serie denominada Run-test, propuesta por Saldarriaga y Yevjevich en 1970. Esta fue aplicada considerando una región de aceptación de la hipótesis nula con dos colas con una región crítica o de rechazo del 5%. Los resultados de esta prueba demostraron que 117 estaciones corresponden a muestras independientes. La tabla 12 presenta los resultados obtenidos mediante esta prueba.

Tabla 11. Resultados de la prueba de normalidad.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Coefficiente de sesgo	Test de Kolmogorov-Smirnov
1	San Ignacio	25036	24° 13' 48"	106° 30'	11	A	A
2	Concordia	25074	23° 30'	105° 52' 48"	17	A	A
3	Sinaloa	25188	26° 3'	108° 25' 12"	2	A	A
4	Elota	25181	24° 22' 48"	106° 36'	5	A	A
5	Badiraguato	25093	25° 52' 48"	107° 21'	24	R	A
6	Concordia	25070	23° 25' 12'	105° 55' 48"	22	R	A
7	Escuinapa	25029	23° 25' 48"	105° 49' 48"	29	A	A
8	Concordia	25095	23° 34' 48"	106° 7' 12"	8	A	A
9	San Ignacio	25047	24° 15'	106° 15'	12	A	A
10	Escuinapa	25049	22° 31' 48"	105° 28' 12"	25	R	A
11	Rosario	25058	23° 1' 48"	105° 45'	18	A	A
12	Rosario	25186	23° 1' 12"	105° 40' 12"	4	A	A
13	Rosario	25073	23° 4' 12"	105° 28' 12"	43	A	A
14	Badiraguato	25041	25° 21'	107° 13' 48"	22	A	A
15	Badiraguato	25094	25° 39'	107° 22' 48"	15	A	A
16	Culiacán	25033	25° 6'	107° 24'	25	A	A
17	Escuinapa	25150	23° 4' 48"	105° 55' 12"	12	R	A
18	Mazatlán	25052	23° 30'	106° 19' 12"	28	A	A
19	Choix	25190	26° 52' 12"	107° 22' 12"	2	A	A
20	Cosalá	25012	24° 25' 12"	106° 42'	20	A	A
21	Choix	25068	27° 1' 12"	108° 25' 12"	25	A	A
22	Badiraguato	25006	25° 22' 12"	107° 33'	19	A	A
23	Badiraguato	25097	25° 51'	107° 22' 48"	30	A	A
24	Badiraguato	25110	25° 22' 12"	107° 31' 48"	24	A	A
25	Choix	25044	26° 54'	108° 22' 12"	29	A	A
26	El Fuerte	25100	26° 22' 12"	108° 18'	30	R	A
27	Concordia	25011	23° 16' 12"	106° 3'	28	A	A
28	Guasave	25148	25° 34' 48"	108° 27'	7	R	A
29	Elota	25101	24° 10' 12"	106° 40' 48"	22	R	A
30	Culiacán	25043	23° 58' 48"	107° 46' 48"	30	A	A
31	San Ignacio	25192	23° 30'	106° 28' 12"	8	A	A
32	San Ignacio	25084	23° 55' 58"	106° 25' 48"	11	R	A
33	Sinaloa	25005	25° 49' 12"	107° 55' 12"	19	A	A
34	Culiacán	25081	24° 48'	107° 9'	25	R	A
35	Rosario	25078	23°	105° 55' 12"	23	A	A
36	Badiraguato	25180	25° 48'	107° 55' 12"	3	A	A
37	Culiacán	25030	25° 15'	108° 10' 48"	24	A	A
38	Sinaloa	25046	25° 54'	108° 1' 12"	25	A	A
39	Badiraguato	25177	25° 33'	107° 22' 12"	5	A	A
40	Sinaloa	25085	26° 7' 48"	107° 57'	28	R	A
41	Sinaloa	25175	26° 4' 48"	107° 51'	4	A	A
42	San Ignacio	25118	23° 55' 48"	106° 25' 48"	30	A	A
43	Concordia	25112	23° 16' 48"	106° 4' 12"	6	R	A
44	Mazatlán	25176	23° 30'	106° 28' 48"	7	A	A
45	Guasave	25178	25° 43' 12"	108° 19' 48"	7	A	A
46	Mazatlán	25135	23° 10' 48"	106° 25' 12"	6	A	A
47	Rosario	25134	23° 12'	105° 24'	5	A	A

Tabla 11. Resultados de la prueba de normalidad.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Coefficiente de sesgo	Test de Kolmo- gorov-Smirnov
48	Mocorito	25077	25° 24'	107° 49' 48"	17	R	A
49	Mazatlán	25119	23° 21'	106° 15'	16	R	A
50	El Fuerte	25007	26° 21'	108° 28' 48"	25	R	A
51	Mazatlán	25091	23° 19' 48"	106° 13' 12"	30	R	A
52	Sinaloa	25019	26° 13' 18"	108° 16' 12"	25	R	A
53	Culiacán	25069	24° 55' 48"	107° 22' 48"	25	A	A
54	Cosalá	25087	24° 30'	106° 51'	25	R	A
55	El Fuerte	25056	26° 18'	108° 43' 12"	16	A	A
56	San Ignacio	25024	23° 45'	106° 31' 48"	30	A	A
57	Culiacán	25172	24° 45'	107° 22' 48"	6	R	A
58	Choix	25017	26° 43' 48"	108° 19' 48"	16	R	A
59	Escuinapa	25149	22° 4' 12"	105° 43' 48"	15	R	A
60	Badiraguato	25092	25° 52' 12"	107° 18'	30	R	A
61	San Ignacio	25045	23° 57'	106° 37' 12"	24	A	A
62	Sinaloa	25054	26° 3'	106° 19' 48"	23	A	A
63	San Ignacio	25001	24° 4' 12"	106° 39'	25	A	A
64	Badiraguato	25111	25° 21'	107° 33'	7	R	A
65	Mocorito	25063	25° 28' 48"	107° 55' 12"	3	A	A
66	Ahome	25060	25° 48'	109°	8	A	A
67	Culiacán	25075	25° 52' 48"	105° 45'	11	R	A
68	Culiacán	25016	24° 48'	107° 24'	10	R	A
69	El Fuerte	25053	26° 13' 12"	108° 36'	25	A	A
70	Sinaloa	25184	25° 49' 48"	107° 55' 12"	2	A	A
71	Escuinapa	25034	22° 51'	105° 46' 48"	2	A	A
72	Badiraguato	25158	25° 49' 12"	105° 13' 12"	8	R	A
73	El Fuerte	25023	26° 25' 48"	108° 37' 12"	25	R	A
74	Mocorito	25117	25° 28' 48"	107° 55' 12"	25	R	A
75	Mocorito	25071	25° 4' 48"	107° 46' 48"	24	A	A
76	Choix	25020	26° 43' 12"	108° 19' 48"	4	R	A
77	Elota	25028	23° 57'	106° 43' 12"	30	R	A
78	El Fuerte	25025	26° 31' 12"	108° 36'	25	R	A
79	San Ignacio	25021	23° 43' 48"	106° 46' 48"	22	R	A
80	Mazatlán	25031	23° 33'	106° 28' 12"	30	A	A
81	Culiacán	25015	24° 49' 12"	107° 24'	25	R	A
82	Mocorito	25064	25° 28' 48"	107° 57' 12"	16	R	A
83	Choix	25018	26° 43' 12"	108° 16' 48"	2	A	A
84	Cosalá	25183	24° 36'	106° 49' 12"	3	A	A
85	Choix	25083	26° 54'	108° 9'	13	R	A
86	Choix	25002	26° 49' 12"	108° 25' 12"	21	R	A
87	Salvador Alv	25004	25° 19' 12"	108° 10' 12"	4	R	A
88	San Ignacio	25051	23° 54'	106° 54'	3	A	A
89	Culiacán	25170	24° 54'	107° 31' 48"	4	R	A
90	Ahome	25059	26° 10' 12"	108° 52' 12'	19	A	A
91	El Fuerte	25122	26° 28' 12"	108° 42'	10	R	A
92	El Fuerte	25061	26° 25' 12"	108° 43' 12"	15	A	A
93	Culiacán	25169	24° 31' 48"	107° 37' 48"	4	A	A
94	Elota	25113	24° 25' 12"	106° 42'	4	R	A

Tabla 11. Resultados de la prueba de normalidad.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Coficiente de sesgo	Test de Kolmogorov-Smirnov
95	Salvador Alv	25037	25° 28' 12"	108° 4' 48'0"	4	R	A
96	El Fuerte	25066	25° 55' 48"	108° 27'	29	A	A
97	Guasave	25115	25° 48' 12"	108° 4' 48"	25	R	A
98	El Fuerte	25055	26° 28' 12"	108° 36'	25	A	A
99	Navolato	25123	24° 45'	107° 31' 48"	5	R	A
100	Culiacán	25057	24° 48'	107° 24'	5	A	A
101	El Fuerte	25174	26° 22' 48"	108° 33'		A	A
102	El Fuerte	25032	26° 28' 48"	108° 43' 48"	17	R	A
103	El Fuerte	25114	26° 25' 48"	106° 37' 48"	3	R	A
104	Guasave	25010	24° 48'	107° 24'	4	R	A
105	Ahome	25022	26° 16' 12"	109° 22' 48"	18	R	A
106	Guasave	25080	25° 43' 12"	108° 43' 48"	24	R	A
107	Guasave	25048	25° 45'	108° 48'	14	A	A
108	El Fuerte	25142	26° 6'	108° 45'	5	R	A
109	Choix	25035	26° 19' 48"	108° 55' 48"	14	R	A
110	Guasave	25089	25° 48'	108° 13' 12"	5	R	A
111	Culiacán	25166	24° 33'	107° 22' 12"	5	A	A
112	Navolato	25123	24° 33'	107° 31' 48"	3	R	A
113	Mocorito	25125	25° 28' 12"	107° 55' 12"	5	R	A
114	Culiacán	25076	24° 25' 48"	107° 13' 48"	24	R	A
115	Navolato	25165	24° 33'	107° 31' 48"	5	R	A
116	Angostura	25168	24° 49' 12"	107° 49' 12"	4	A	A
117	Escuinapa	25130	22° 49' 48"	105° 46' 48"	4	R	A
118	Culiacán	25167	24° 46' 48"	107° 6'	4	A	A
119	El Fuerte	25009	26° 4' 48"	108° 46' 48"	25	R	A
120	Rosario	25079	23°	105° 51'	5	R	A
121	Elota	25050	23° 55' 12"	106° 54'	19	R	A
122	Culiacán	25179	24° 40' 12"	107° 28' 48"	3	A	A
123	Guasave	25027	25° 34' 48"	108° 28' 12"	24	R	A
124	El Fuerte	25082	26° 6'	108° 46' 12"	25	R	A
125	Sinaloa	25090	25° 49' 12"	108° 13' 12"	17	R	A
126	Culiacán	25163	25° 1' 48"	107° 28' 12"	5	R	A
127	Ahome	25003	25° 55' 12"	109° 10' 48"	24	R	A
128	Guasave	25038	25° 43' 12"	108° 28' 12"	17	R	A
129	Ahome	25098	25° 37' 12"	109° 3'	23	R	A
130	Sinaloa	25099	25° 37' 12"	108° 3'	14	R	A
131	El Fuerte	25143	26° 10' 12"	108° 31' 48"	5	R	A
132	Elota	25132	23° 55' 12"	106° 54'	5	R	A
133	Ahome	25151	26° 18'	109° 1' 12"	9	R	A
134	Ahome	25042	25° 58' 48"	109° 19' 48"	24	R	A
135	Elota	25128	24° 4' 12"	105° 40' 12"	7	R	A
136	Guasave	25124	25° 36'	108° 34' 48"	4	R	A
137	Culiacán	25164	24° 48'	107° 31' 48"	3	R	A
138	Ahome	25116	25° 48'	109°	23	R	A
139	Mocorito	25131	25° 28' 12"	107° 55' 12"	6	R	A
140	Culiacán	25161	24° 18'	107° 22' 12"	5	R	A
141	Navolato	25171	24° 46' 48"	107° 40' 48"	5	A	A

Tabla 11. Resultados de la prueba de normalidad.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Coefficiente de sesgo	Test de Kolmo- gorov-Smirnov
142	Guasave	25013	25° 36'	108° 34' 48"	18	R	A
143	Culiacán	25159	24° 28' 12"	107° 19' 12"	4	R	A
144	Guasave	25039	25° 43' 12"	108° 28' 12"	2	R	A
145	Navolato	25160	24° 40' 48"	107° 46' 48"	5	R	A
146	El Fuerte	25137	25° 55' 48"	108° 27'	4	R	A
147	Guasave	25040	25° 34' 48"	108° 28' 12"	3	R	A
148	Culiacán	25162	24° 43' 12"	107° 34' 48"	5	R	A
149	Ahome	25086	25° 57'	109° 1' 48"	22	R	A
150	Ahome	25185	25° 54'	109° 10' 12"	4	A	A
151	El Fuerte	25088	25° 55' 12"	108° 54'	25	A	A
152	Navolato	25129	24° 33'	109° 36'	3	R	A
153	Culiacán	25126	24° 45'	107° 31' 48"	3	R	A
154	Guasave	25144	25° 40' 12"	105° 19' 12"	5	R	A
155	Concordia	25156	23° 19' 48"	106° 13' 48"	2	R	A
156	Culiacán	25127	24° 48'	107° 22' 48"	3	R	A
157	Sinaloa	25187	25° 49' 48"	107° 49' 48"	2	R	A
158	Ahome	25065	25° 58' 12"	109° 55' 48"	23	R	A
159	Guasave	25133	25° 36'	108° 34' 12"	6	R	A
160	Guasave	25139	24° 45'	108° 22' 48"	3	R	A

Tabla 12. Resultados de las pruebas de independencia

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Anderson	Test de Run-Length
1	San Ignacio	25036	24° 13' 48"	106° 30'	11	A	A
2	Concordia	25074	23° 30'	105° 52' 48"	17	A	A
3	Sinaloa	25188	26° 3'	108° 25' 12"	2	A	R
4	Eloa	25181	24° 22' 48"	106° 36'	5	R	R
5	Badiraguato	25093	25° 52' 48"	107° 21'	24	A	A
6	Concordia	25070	23° 25' 12"	105° 55' 48"	22	A	A
7	Escuinapa	25029	23° 25' 48"	105° 49' 48"	29	A	A
8	Concordia	25095	23° 34' 48"	106° 7' 12"	8	A	R
9	San Ignacio	25047	24° 15'	106° 15'	12	A	A
10	Escuinapa	25049	22° 31' 48"	105° 28' 12"	25	A	R
11	Rosario	25058	23° 1' 48"	105° 45'	18	A	A
12	Rosario	25186	23° 1' 12"	105° 40' 12"	4	R	R
13	Rosario	25073	23° 4' 12"	105° 28' 12"	43	A	A
14	Badiraguato	25041	25° 21'	107° 13' 48"	22	A	A
15	Badiraguato	25094	25° 39'	107° 22' 48"	15	A	R
16	Culliacán	25033	25° 6'	107° 24'	25	A	A
17	Escuinapa	25150	23° 4' 48"	105° 55' 12"	12	A	A
18	Mazatlán	25052	23° 30'	106° 19' 12"	28	A	R
19	Choix	25190	26° 52' 12"	107° 22' 12"	2	A	R
20	Cosalá	25012	24° 25' 12"	106° 42'	20	A	A
21	Choix	25068	27° 1' 12"	108° 25' 12"	25	A	A
22	Badiraguato	25006	25° 22' 12"	107° 33'	19	A	A
23	Badiraguato	25097	25° 51'	107° 22' 48"	30	A	A
24	Badiraguato	25110	25° 22' 12"	107° 31' 48"	24	A	A
25	Choix	25044	26° 54'	108° 22' 12"	29	A	A
26	El Fuerte	25100	26° 22' 12"	108° 18'	30	A	A
27	Concordia	25011	23° 16' 12"	106° 3'	28	A	R
28	Guasave	25148	25° 34' 48"	108° 27'	7	A	A
29	Eloa	25101	24° 10' 12"	106° 40' 48"	22	A	A
30	Culliacán	25043	23° 58' 48"	107° 46' 48"	30	A	A
31	San Ignacio	25192	23° 30'	106° 28' 12"	8	R	R
32	San Ignacio	25084	23° 55' 58"	106° 25' 48"	11	A	A
33	Sinaloa	25005	25° 49' 12"	107° 55' 12"	19	A	A

Tabla 12. Resultados de las pruebas de independencia

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Anderson	Test de Run-Length
34	Culiacán	25081	24° 48'	107° 9'	25	A	A
35	Rosario	25078	23°	105° 55' 12"	23	A	R
36	Badiraguato	25180	25° 48'	107° 55' 12"	3	A	R
37	Culiacán	25030	25° 15'	108° 10' 48"	24	A	A
38	Sinaloa	25046	25° 54'	108° 1' 12"	25	A	R
39	Badiraguato	25177	25° 33'	107° 22' 12"	5	A	A
40	Sinaloa	25085	26° 7' 48"	107° 57'	28	A	A
41	Sinaloa	25175	26° 4' 48"	107° 51'	4	A	R
42	San Ignacio	25118	23° 55' 48"	106° 25' 48"	30	A	A
43	Concordia	25112	23° 16' 48"	106° 4' 12"	6	A	A
44	Mazatlán	25176	23° 30'	106° 28' 48"	7	A	A
45	Guasave	25178	25° 43' 12"	108° 19' 48"	7	A	R
46	Mazatlán	25135	23° 10' 48"	106° 25' 12"	6	A	A
47	Rosario	25134	23° 12'	105° 24'	5	A	R
48	Mocorito	25077	25° 24'	107° 49' 48"	17	A	R
49	Mazatlán	25119	23° 21'	106° 15'	16	A	A
50	El Fuerte	25007	26° 21'	108° 28' 48"	25	A	A
51	Mazatlán	25091	23° 19' 48"	106° 13' 12"	30	A	A
52	Sinaloa	25019	26° 13' 18"	108° 16' 12"	25	A	A
53	Culiacán	25069	24° 55' 48"	107° 22' 48"	25	A	A
54	Cosalá	25087	24° 30'	106° 51'	25	A	A
55	El Fuerte	25056	26° 18'	108° 43' 12"	16	A	A
56	San Ignacio	25024	23° 45'	106° 31' 48"	30	A	A
57	Culiacán	25172	24° 45'	107° 22' 48"	6	A	R
58	Choix	25017	26° 43' 48"	108° 19' 48"	16	A	A
59	Escuinapa	25149	22° 4' 12"	105° 43' 48"	15	A	R
60	Badiraguato	25092	25° 52' 12"	107° 18'	30	A	A
61	San Ignacio	25045	23° 57'	106° 37' 12"	24	A	R
62	Sinaloa	25054	26° 3'	106° 19' 48"	23	A	A
63	San Ignacio	25001	24° 4' 12"	106° 39'	25	R	R
64	Badiraguato	25111	25° 21'	107° 33'	7	A	R
65	Mocorito	25063	25° 28' 48"	107° 55' 12"	3	R	R
66	Ahome	25060	25° 48'	109°	8	A	A

Tabla 12. Resultados de las pruebas de independencia

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Anderson	Test de Run-Length
67	Culiacán	25075	25° 52' 48"	105° 45'	11	A	A
68	Culiacán	25016	24° 48'	107° 24'	10	A	A
69	El Fuerte	25053	26° 13' 12"	108° 36'	25	A	R
70	Sinaloa	25184	25° 49' 48"	107° 55' 12"	2	A	R
71	Escuinapa	25034	22° 51'	105° 46' 48"	2	R	R
72	Badiraguato	25158	25° 49' 12"	105° 13' 12"	8	R	A
73	El Fuerte	25023	26° 25' 48"	108° 37' 12"	25	A	A
74	Mocorito	25117	25° 28' 48"	107° 55' 12"	25	A	A
75	Mocorito	25071	25° 4' 48"	107° 46' 48"	24	A	A
76	Choix	25020	26° 43' 12"	108° 19' 48"	4	A	A
77	Elota	25028	23° 57'	106° 43' 12"	30	A	A
78	El Fuerte	25025	26° 31' 12"	108° 36'	25	A	R
79	San Ignacio	25021	23° 43' 48"	106° 46' 48"	22	R	R
80	Mazatlán	25031	23° 33'	106° 28' 12"	30	A	A
81	Culiacán	25015	24° 49' 12"	107° 24'	25	A	A
82	Mocorito	25064	25° 28' 48"	107° 57' 12"	16	A	A
83	Choix	25018	26° 43' 12"	108° 16' 48"	2	R	R
84	Cosalá	25183	24° 36'	106° 49' 12"	3	R	R
85	Choix	25083	26° 54'	108° 9'	13	A	A
86	Choix	25002	26° 49' 12"	108° 25' 12"	21	R	R
87	Salvador Aliv	25004	25° 19' 12"	108° 10' 12"	4	A	A
88	San Ignacio	25051	23° 54'	106° 54'	3	R	R
89	Culiacán	25170	24° 54'	107° 31' 48"	4	A	A
90	Ahome	25059	26° 10' 12"	108° 52' 12"	19	A	R
91	El Fuerte	25122	26° 28' 12"	108° 42'	10	A	A
92	El Fuerte	25061	26° 25' 12"	108° 43' 12"	15	A	A
93	Culiacán	25169	24° 31' 48"	107° 37' 48"	4	A	R
94	Elota	25113	24° 25' 12"	106° 42'	4	R	A
95	Salvador Aliv	25037	25° 28' 12"	108° 4' 48' 0"	4	A	A
96	El Fuerte	25066	25° 55' 48"	108° 27'	29	A	A
97	Guasave	25115	25° 48' 12"	108° 4' 48"	25	A	A
98	El Fuerte	25055	26° 28' 12"	108° 36'	25	A	R
99	Navolato	25123	24° 45'	107° 31' 48"	5	A	R

Tabla 12. Resultados de las pruebas de independencia

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Anderson	Test de Run-Length
100	Culiacán	25057	24° 48'	107° 24'	5	A	R
101	El Fuerte	25174	26° 22' 48"	108° 33'	3	A	R
102	El Fuerte	25032	26° 28' 48"	108° 43' 48"	17	A	A
103	El Fuerte	25114	26° 25' 48"	106° 37' 48"	3	A	R
104	Guasave	25010	24° 48'	107° 24'	4	A	R
105	Ahome	25022	26° 16' 12"	109° 22' 48"	18	A	A
106	Guasave	25080	25° 43' 12"	108° 43' 48"	24	A	A
107	Guasave	25048	25° 45'	108° 48'	14	A	A
108	El Fuerte	25142	26° 6'	108° 45'	5	R	A
109	Choix	25035	26° 19' 48"	108° 55' 48"	14	A	A
110	Guasave	25089	25° 48'	108° 13' 12"	5	A	R
111	Culiacán	25166	24° 33'	107° 22' 12"	5	A	R
112	Navolato	25123	24° 33'	107° 31' 48"	3	A	R
113	Mocorito	25125	25° 28' 12"	107° 55' 12"	5	R	A
114	Culiacán	25076	24° 25' 48"	107° 13' 48"	24	A	A
115	Navolato	25165	24° 33'	107° 31' 48"	5	R	R
116	Angostura	25168	24° 49' 12"	107° 49' 12"	4	A	A
117	Escuinapa	25130	22° 49' 48"	105° 46' 48"	4	A	A
118	Culiacán	25167	24° 46' 48"	107° 6'	4	A	R
119	El Fuerte	25009	26° 4' 48"	108° 46' 48"	25	A	A
120	Rosario	25079	23°	105° 51'	5	A	R
121	Elota	25050	23° 55' 12"	106° 54'	19	A	R
122	Culiacán	25179	24° 40' 12"	107° 28' 48"	3	A	R
123	Guasave	25027	25° 34' 48"	108° 28' 12"	24	A	A
124	El Fuerte	25082	26° 6'	108° 46' 12"	25	A	A
125	Sinaloa	25090	25° 49' 12"	108° 13' 12"	17	A	A
126	Culiacán	25163	25° 1' 48"	107° 28' 12"	5	A	R
127	Ahome	25003	25° 55' 12"	109° 10' 48"	24	A	A
128	Guasave	25038	25° 43' 12"	108° 28' 12"	17	A	A
129	Ahome	25098	25° 37' 12"	109° 3'	23	A	A
130	Sinaloa	25099	25° 37' 12"	108° 3'	14	A	A
131	El Fuerte	25143	26° 10' 12"	108° 31' 48"	5	A	R
132	Elota	25132	23° 55' 12"	106° 54'	5	A	A

Tabla 12. Resultados de las pruebas de independencia

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Anderson	Test de Run-Length
133	Ahome	25151	26° 18'	109° 1' 12"	9	A	A
134	Ahome	25042	25° 58' 48"	109° 19' 48"	24	A	A
135	Eloa	25128	24° 4' 12"	105° 40' 12"	7	R	R
136	Guasave	25124	25° 36'	108° 34' 48"	4	A	A
137	Culiacán	25164	24° 48'	107° 31' 48"	3	A	R
138	Ahome	25116	25° 48'	109°	23	A	R
139	Mocorito	25131	25° 28' 12"	107° 55' 12"	6	A	A
140	Culiacán	25161	24° 18'	107° 22' 12"	5	A	R
141	Navolato	25171	24° 46' 48"	107° 40' 48"	5	A	R
142	Guasave	25013	25° 36'	108° 34' 48"	18	A	A
143	Culiacán	25159	24° 28' 12"	107° 19' 12"	4	A	R
144	Guasave	25039	25° 43' 12"	108° 28' 12"	2	R	R
145	Navolato	25160	24° 40' 48"	107° 46' 48"	5	A	R
146	El Fuerte	25137	25° 55' 48"	108° 27'	4	A	A
147	Guasave	25040	25° 34' 48"	108° 28' 12"	3	R	R
148	Culiacán	25162	24° 43' 12"	107° 34' 48"	5	A	R
149	Ahome	25086	25° 57'	109° 1' 48"	22	A	A
150	Ahome	25185	25° 54'	109° 10' 12"	4	R	A
151	El Fuerte	25088	25° 55' 12"	108° 54'	25	A	A
152	Navolato	25129	24° 33'	109° 36'	3	A	A
153	Culiacán	25126	24° 45'	107° 31' 48"	3	R	A
154	Guasave	25144	25° 40' 12"	105° 19' 12"	5	A	A
155	Concordia	25156	23° 19' 48"	106° 13' 48"	2	A	R
156	Culiacán	25127	24° 48'	107° 22' 48"	3	A	A
157	Sinaloa	25187	25° 49' 48"	107° 49' 48"	2	A	R
158	Ahome	25065	25° 58' 12"	109° 55' 48"	23	A	A
159	Guasave	25133	25° 36'	108° 34' 12"	6	A	A
160	Guasave	25139	24° 45'	108° 22' 48"	3	A	A

#### **4.6 Resultados de la prueba de estacionariedad.**

Como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 13, las pruebas de estacionariedad fue el tercer paso en el procedimiento de estudio de las series de precipitación. El test de Kendall y el del primer coeficiente de autocorrelación fueron aplicadas a las 160 series de precipitación anual.

El test de Kendall fue aplicado tomando en cuenta una región de aceptación de la hipótesis nula con dos colas del 90% y un nivel de rechazo del 10%. Los resultados obtenidos muestran que 126 estaciones (78.75%) fueron aceptadas, en cambio 34 (21.25%) fueron rechazadas.

En cuanto a la prueba que utiliza el primer coeficiente de autocorrelación, se aplicó asumiendo que el valor del coeficiente varía entre los valores de -1 y 1. Bajo esta consideración, se encontró que las 160 estaciones aprobaron dicha condición.

La tabla 13 presenta los resultados obtenidos al aplicar la prueba de estacionariedad.

#### **4.7. Resultados de la prueba para confirmar la aplicación del modelo autorregresivo AR(1).**

Como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 13, la prueba de confirmación del modelo autorregresivo AR(1), fue el cuarto paso del procedimiento de análisis de las series de precipitación anual.

Esta prueba se aplicó sobre la base de que todos los modelos autorregresivos con retraso mayores que uno son asintóticamente normales con media cero y varianza  $1/N$ . por lo que el límite de probabilidad  $(1-\alpha)$  para la autocorrelación parcial fue del 90% (límite de confianza con dos colas).

De acuerdo a los datos obtenidos, se encontró que en 74 estaciones es factible aplicar el modelo autorregresivo AR(1). La tabla 14 presenta los resultados de ésta prueba.

Tabla 13. Resultados de la prueba de estacionariedad

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Kendall	Test de $r_1$
1	San Ignacio	25036	24° 13' 48"	106° 30'	11	A	A
2	Concordia	25074	23° 30'	105° 52' 48"	17	A	A
3	Sinaloa	25188	26° 3'	108° 25' 12"	2	A	A
4	Eiota	25181	24° 22' 48"	106° 36'	5	A	A
5	Badiraguato	25093	25° 52' 48"	107° 21'	24	A	A
6	Concordia	25070	23° 25' 12"	105° 55' 48"	22	A	A
7	Escuinapa	25029	23° 25' 48"	105° 49' 48"	29	R	A
8	Concordia	25095	23° 34' 48"	106° 7' 12"	8	A	A
9	San Ignacio	25047	24° 15'	106° 15'	12	A	A
10	Escuinapa	25049	22° 31' 48"	105° 28' 12"	25	R	A
11	Rosario	25058	23° 1' 48"	105° 45'	18	A	A
12	Rosario	25186	23° 1' 12"	105° 40' 12"	4	A	A
13	Rosario	25073	23° 4' 12"	105° 28' 12"	43	R	A
14	Badiraguato	25041	25° 21'	107° 13' 48"	22	A	A
15	Badiraguato	25094	25° 39'	107° 22' 48"	15	A	A
16	Culiacán	25033	25° 6'	107° 24'	25	A	A
17	Escuinapa	25150	23° 4' 48"	105° 55' 12"	12	R	A
18	Mazatlán	25052	23° 30'	106° 19' 12"	28	A	A
19	Choix	25190	26° 52' 12"	107° 22' 12"	2	A	A
20	Cosalá	25012	24° 25' 12"	106° 42'	20	A	A
21	Choix	25068	27° 1' 12"	108° 25' 12"	25	A	A
22	Badiraguato	25006	25° 22' 12"	107° 33'	19	R	A
23	Badiraguato	25097	25° 51'	107° 22' 48"	30	R	A
24	Badiraguato	25110	25° 22' 12"	107° 31' 48"	24	R	A
25	Choix	25044	26° 54'	108° 22' 12"	29	A	A
26	El Fuerte	25100	26° 22' 12"	108° 18'	30	R	A
27	Concordia	25011	23° 16' 12"	106° 3'	28	R	A
28	Guasave	25148	25° 34' 48"	108° 27'	7	A	A
29	Eiota	25101	24° 10' 12"	106° 40' 48"	22	A	A
30	Culiacán	25043	23° 58' 48"	107° 46' 48"	30	A	A
31	San Ignacio	25192	23° 30'	106° 28' 12"	8	A	A
32	San Ignacio	25084	23° 55' 58"	106° 25' 48"	11	A	A
33	Sinaloa	25005	25° 49' 12"	107° 55' 12"	19	R	A

Tabla 13. Resultados de la prueba de estacionariedad

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Kendall	Test de $r_1$
34	Culiacán	25081	24° 48'	107° 9'	25	A	A
35	Rosario	25078	23°	105° 55' 12"	23	R	A
36	Badiraguato	25180	25° 48'	107° 55' 12"	3	A	A
37	Culiacán	25030	25° 15'	108° 10' 48"	24	A	A
38	Sinaloa	25046	25° 54'	108° 1' 12"	25	R	A
39	Badiraguato	25177	25° 33'	107° 22' 12"	5	A	A
40	Sinaloa	25085	26° 7' 48"	107° 57'	28	A	A
41	Sinaloa	25175	26° 4' 48"	107° 51'	4	A	A
42	San Ignacio	25118	23° 55' 48"	106° 25' 48"	30	R	A
43	Concordia	25112	23° 16' 48"	106° 4' 12"	6	A	A
44	Mazatlán	25176	23° 30'	106° 28' 48"	7	A	A
45	Guasave	25178	25° 43' 12"	108° 19' 48"	7	A	A
46	Mazatlán	25135	23° 10' 48"	106° 25' 12"	6	A	A
47	Rosario	25134	23° 12'	105° 24'	5	A	A
48	Mocorito	25077	25° 24'	107° 49' 48"	17	R	A
49	Mazatlán	25119	23° 21'	106° 15'	16	A	A
50	El Fuerte	25007	26° 21'	108° 28' 48"	25	A	A
51	Mazatlán	25091	23° 19' 48"	106° 13' 12"	30	R	A
52	Sinaloa	25019	26° 13' 18"	108° 16' 12"	25	R	A
53	Culiacán	25069	24° 55' 48"	107° 22' 48"	25	A	A
54	Cosalá	25087	24° 30'	106° 51'	25	A	A
55	El Fuerte	25056	26° 18'	108° 43' 12"	16	A	A
56	San Ignacio	25024	23° 45'	106° 31' 48"	30	R	A
57	Culiacán	25172	24° 45'	107° 22' 48"	6	A	A
58	Choix	25017	26° 43' 48"	108° 19' 48"	16	A	A
59	Escuinapa	25149	22° 4' 12"	105° 43' 48"	15	A	A
60	Badiraguato	25092	25° 52' 12"	107° 18'	30	A	A
61	San Ignacio	25045	23° 57'	106° 37' 12"	24	A	A
62	Sinaloa	25054	26° 3'	106° 19' 48"	23	R	A
63	San Ignacio	25001	24° 4' 12"	106° 39'	25	A	A
64	Badiraguato	25111	25° 21'	107° 33'	7	A	A
65	Mocorito	25063	25° 28' 48"	107° 55' 12"	3	A	A
66	Ahome	25060	25° 48'	109°	8	A	A

Tabla 13. Resultados de la prueba de estacionariedad

No	Municipio	Estación		Latitud	Longitud	Años de registro	Test de	
		No.					Kendall	$r_1$
67	Culiacán	25075		25° 52' 48"	105° 45'	11	A	A
68	Culiacán	25016		24° 48'	107° 24'	10	A	A
69	El Fuerte	25053		26° 13' 12"	108° 36'	25	A	A
70	Sinaloa	25184		25° 49' 48"	107° 55' 12"	2	A	A
71	Escuinapa	25034		22° 51'	105° 46' 48"	2	A	A
72	Badiraguato	25158		25° 49' 12"	105° 13' 12"	8	A	A
73	El Fuerte	25023		26° 25' 48"	108° 37' 12"	25	A	A
74	Mocorito	25117		25° 28' 48"	107° 55' 12"	25	R	A
75	Mocorito	25071		25° 4' 48"	107° 46' 48"	24	A	A
76	Choix	25020		26° 43' 12"	108° 19' 48"	4	A	A
77	Elota	25028		23° 57'	106° 43' 12"	30	A	A
78	El Fuerte	25025		26° 31' 12"	108° 36'	25	A	A
79	San Ignacio	25021		23° 43' 48"	106° 46' 48"	22	A	A
80	Mazatlán	25031		23° 33'	106° 28' 12"	30	A	A
81	Culiacán	25015		24° 49' 12"	107° 24'	25	R	A
82	Mocorito	25064		25° 28' 48"	107° 57' 12"	16	A	A
83	Choix	25018		26° 43' 12"	108° 16' 48"	2	A	A
84	Cosalá	25183		24° 36'	106° 49' 12"	3	A	A
85	Choix	25083		26° 54'	108° 9'	13	A	A
86	Choix	25002		26° 49' 12"	108° 25' 12"	21	A	A
87	Salvador Alv	25004		25° 19' 12"	108° 10' 12"	4	A	A
88	San Ignacio	25051		23° 54'	106° 54'	3	A	A
89	Culiacán	25170		24° 54'	107° 31' 48"	4	R	A
90	Ahome	25059		26° 10' 12"	108° 52' 12"	19	R	A
91	El Fuerte	25122		26° 28' 12"	108° 42'	10	A	A
92	El Fuerte	25061		26° 25' 12"	108° 43' 12"	15	A	A
93	Culiacán	25169		24° 31' 48"	107° 37' 48"	4	A	A
94	Elota	25113		24° 25' 12"	106° 42'	4	A	A
95	Salvador Alv	25037		25° 28' 12"	108° 4' 48'0"	4	R	A
96	El Fuerte	25066		25° 55' 48"	108° 27'	29	A	A
97	Guasave	25115		25° 48' 12"	108° 4' 48"	25	R	A
98	El Fuerte	25055		26° 28' 12"	108° 36'	25	A	A
99	Navolato	25123		24° 45'	107° 31' 48"	5	A	A

Tabla 13. Resultados de la prueba de estacionariedad

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Kendall	Test de $r_1$
100	Culiacán	25057	24° 48'	107° 24'	5	R	A
101	El Fuerte	25174	26° 22' 48"	108° 33'	3	A	A
102	El Fuerte	25032	26° 28' 48"	108° 43' 48"	17	A	A
103	El Fuerte	25114	26° 25' 48"	106° 37' 48"	3	A	A
104	Guasave	25010	24° 48'	107° 24'	4	A	A
105	Ahome	25022	26° 16' 12"	109° 22' 48"	18	A	A
106	Guasave	25080	25° 43' 12"	108° 43' 48"	24	R	A
107	Guasave	25048	25° 45'	108° 48'	14	R	A
108	El Fuerte	25142	26° 6'	108° 45'	5	A	A
109	Choix	25035	26° 19' 48"	108° 55' 48"	14	A	A
110	Guasave	25089	25° 48'	108° 13' 12"	5	A	A
111	Culiacán	25166	24° 33'	107° 22' 12"	5	A	A
112	Navolato	25123	24° 33'	107° 31' 48"	3	A	A
113	Mocorito	25125	25° 28' 12"	107° 55' 12"	5	A	A
114	Culiacán	25076	24° 25' 48"	107° 13' 48"	24	R	A
115	Navolato	25165	24° 33'	107° 31' 48"	5	A	A
116	Angostura	25168	24° 49' 12"	107° 49' 12"	4	A	A
117	Escuinapa	25130	22° 49' 48"	105° 46' 48"	4	A	A
118	Culiacán	25167	24° 46' 48"	107° 6'	4	A	A
119	El Fuerte	25009	26° 4' 48"	108° 46' 48"	25	R	A
120	Rosario	25079	23°	105° 51'	5	A	A
121	Eliota	25050	23° 55' 12"	106° 54'	19	A	A
122	Culiacán	25179	24° 40' 12"	107° 28' 48"	3	A	A
123	Guasave	25027	25° 34' 48"	108° 28' 12"	24	A	A
124	El Fuerte	25082	26° 6'	108° 46' 12"	25	A	A
125	Sinaloa	25090	25° 49' 12"	108° 13' 12"	17	A	A
126	Culiacán	25163	25° 1' 48"	107° 28' 12"	5	A	A
127	Ahome	25003	25° 55' 12"	109° 10' 48"	24	R	A
128	Guasave	25038	25° 43' 12"	108° 28' 12"	17	R	A
129	Ahome	25098	25° 37' 12"	109° 3'	23	A	A
130	Sinaloa	25099	25° 37' 12"	108° 3'	14	A	A
131	El Fuerte	25143	26° 10' 12"	108° 31' 48"	5	R	A
132	Eliota	25132	23° 55' 12"	106° 54'	5	A	A

Tabla 13. Resultados de la prueba de estacionariedad

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Kendall	Test de $r_1$
133	Ahome	25151	26° 18'	109° 1' 12"	9	A	A
134	Ahome	25042	25° 58' 48"	109° 19' 48"	24	R	A
135	Elota	25128	24° 4' 12"	105° 40' 12"	7	A	A
136	Guasave	25124	25° 36'	108° 34' 48"	4	A	A
137	Culliacán	25164	24° 48'	107° 31' 48"	3	A	A
138	Ahome	25116	25° 48'	109°	23	A	A
139	Mocorito	25131	25° 28' 12"	107° 55' 12"	6	R	A
140	Culliacán	25161	24° 18'	107° 22' 12"	5	R	A
141	Navolato	25171	24° 46' 48"	107° 40' 48"	5	A	A
142	Guasave	25013	25° 36'	108° 34' 48"	18	A	A
143	Culliacán	25159	24° 28' 12"	107° 19' 12"	4	A	A
144	Guasave	25039	25° 43' 12"	108° 28' 12"	2	A	A
145	Navolato	25160	24° 40' 48"	107° 46' 48"	5	A	A
146	ElFuerte	25137	25° 55' 48"	108° 27'	4	A	A
147	Guasave	25040	25° 34' 48"	108° 28' 12"	3	A	A
148	Culliacán	25162	24° 43' 12"	107° 34' 48"	5	A	A
149	Ahome	25086	25° 57'	109° 1' 48"	22	A	A
150	Ahome	25185	25° 54'	109° 10' 12"	4	A	A
151	ElFuerte	25088	25° 55' 12"	108° 54'	25	A	A
152	Navolato	25129	24° 33'	109° 36'	3	A	A
153	Culliacán	25126	24° 45'	107° 31' 48"	3	R	A
154	Guasave	25144	25° 40' 12"	105° 19' 12"	5	A	A
155	Concordia	25156	23° 19' 48"	106° 13' 48"	2	A	A
156	Culliacán	25127	24° 48'	107° 22' 48"	3	A	A
157	Sinaloa	25187	25° 49' 48"	107° 49' 48"	2	A	A
158	Ahome	25065	25° 58' 12"	109° 55' 48"	23	A	A
159	Guasave	25133	25° 36'	108° 34' 12"	6	A	A
160	Guasave	25139	24° 45'	108° 22' 48"	3	A	A

Tabla 14. Resultados de la prueba para confirmar el modelo autorregresivo AR(1)

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Corre- lograma parcial
1	San Ignacio	25036	24° 13' 48"	106° 30'	11	A
2	Concordia	25074	23° 30'	105° 52' 48"	17	A
3	Sinaloa	25188	26° 3'	108° 25' 12"	2	R
4	Elota	25181	24° 22' 48"	106° 36'	5	R
5	Badiraguato	25093	25° 52' 48"	107° 21'	24	A
6	Concordia	25070	23° 25' 12'	105° 55' 48"	22	A
7	Escuinapa	25029	23° 25' 48"	105° 49' 48"	29	A
8	Concordia	25095	23° 34' 48"	106° 7' 12"	8	R
9	San Ignacio	25047	24° 15'	106° 15'	12	R
10	Escuinapa	25049	22° 31' 48"	105° 28' 12"	25	A
11	Rosario	25058	23° 1' 48"	105° 45'	18	A
12	Rosario	25186	23° 1' 12"	105° 40' 12"	4	R
13	Rosario	25073	23° 4' 12"	105° 28' 12"	43	A
14	Badiraguato	25041	25° 21'	107° 13' 48"	22	A
15	Badiraguato	25094	25° 39'	107° 22' 48"	15	R
16	Culiacán	25033	25° 6'	107° 24'	25	A
17	Escuinapa	25150	23° 4' 48"	105° 55' 12"	12	R
18	Mazatlán	25052	23° 30'	106° 19' 12"	28	A
19	Choix	25190	26° 52' 12"	107° 22' 12"	2	R
20	Cosalá	25012	24° 25' 12"	106° 42'	20	A
21	Choix	25068	27° 1' 12"	108° 25' 12"	25	A
22	Badiraguato	25006	25° 22' 12"	107° 33'	19	A
23	Badiraguato	25097	25° 51'	107° 22' 48"	30	A
24	Badiraguato	25110	25° 22' 12"	107° 31' 48"	24	A
25	Choix	25044	26° 54'	108° 22' 12"	29	A
26	El Fuerte	25100	26° 22' 12"	108° 18'	30	A
27	Concordia	25011	23° 16' 12"	106° 3'	28	A
28	Guasave	25148	25° 34' 48"	108° 27'	7	R
29	Elota	25101	24° 10' 12"	106° 40' 48"	22	A
30	Culiacán	25043	23° 58' 48"	107° 46' 48"	30	A
31	San Ignacio	25192	23° 30'	106° 28' 12"	8	R
32	San Ignacio	25084	23° 55' 58"	106° 25' 48"	11	R
33	Sinaloa	25005	25° 49' 12"	107° 55' 12"	19	A
34	Culiacán	25081	24° 48'	107° 9'	25	A
35	Rosario	25078	23°	105° 55' 12"	23	A
36	Badiraguato	25180	25° 48'	107° 55' 12"	3	R
37	Culiacán	25030	25° 15'	108° 10' 48"	24	A
38	Sinaloa	25046	25° 54'	108° 1' 12"	25	A
39	Badiraguato	25177	25° 33'	107° 22' 12"	5	R
40	Sinaloa	25085	26° 7' 48"	107° 57'	28	A
41	Sinaloa	25175	26° 4' 48"	107° 51'	4	R
42	San Ignacio	25118	23° 55' 48"	106° 25' 48"	30	A
43	Concordia	25112	23° 16' 48"	106° 4' 12"	6	R
44	Mazatlán	25176	23° 30'	106° 28' 48"	7	R
45	Guasave	25178	25° 43' 12"	108° 19' 48"	7	R
46	Mazatlán	25135	23° 10' 48"	106° 25' 12"	6	R
47	Rosario	25134	23° 12'	105° 24'	5	R

Tabla 14. Resultados de la prueba para confirmar el modelo autorregresivo AR(1)

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Correlograma parcial
48	Mocorito	25077	25° 24'	107° 49' 48"	17	A
49	Mazatlán	25119	23 21'	106° 15'	16	R
50	El Fuerte	25007	26° 21'	108° 28' 48"	25	A
51	Mazatlán	25091	23° 19' 48"	106° 13' 12"	30	A
52	Sinaloa	25019	26° 13' 18"	108° 16' 12"	25	A
53	Culiacán	25069	24° 55' 48"	107° 22' 48"	25	A
54	Cosalá	25087	24° 30'	106° 51'	25	A
55	El Fuerte	25056	26° 18'	108° 43' 12"	16	R
56	San Ignacio	25024	23° 45'	106° 31' 48"	30	A
57	Culiacán	25172	24° 45'	107° 22' 48"	6	R
58	Choix	25017	26° 43' 48"	108° 19' 48"	16	A
59	Escuinapa	25149	22° 4' 12"	105° 43' 48"	15	R
60	Badiraguato	25092	25° 52' 12"	107° 18'	30	A
61	San Ignacio	25045	23° 57'	106° 37' 12"	24	A
62	Sinaloa	25054	26° 3'	106° 19' 48"	23	A
63	San Ignacio	25001	24° 4' 12"	106° 39'	25	A
64	Badiraguato	25111	25° 21'	107° 33'	7	R
65	Mocorito	25063	25° 28' 48"	107° 55' 12"	3	R
66	Ahome	25060	25° 48'	109°	8	R
67	Culiacán	25075	25° 52' 48"	105° 45'	11	R
68	Culiacán	25016	24° 48'	107° 24'	10	R
69	El Fuerte	25053	26° 13' 12"	108° 36'	25	A
70	Sinaloa	25184	25° 49' 48"	107° 55' 12"	2	R
71	Escuinapa	25034	22° 51'	105° 46' 48"	2	R
72	Badiraguato	25158	25° 49' 12"	105° 13' 12"	8	R
73	El Fuerte	25023	26° 25' 48"	108° 37' 12"	25	A
74	Mocorito	25117	25° 28' 48"	107° 55' 12"	25	A
75	Mocorito	25071	25° 4' 48"	107° 46' 48"	24	A
76	Choix	25020	26° 43' 12"	108° 19' 48"	4	R
77	Elota	25028	23° 57'	106° 43' 12"	30	A
78	El Fuerte	25025	26° 31' 12"	108° 36'	25	A
79	San Ignacio	25021	23° 43' 48"	106° 46' 48"	22	A
80	Mazatlán	25031	23° 33'	106° 28' 12"	30	A
81	Culiacán	25015	24° 49' 12"	107° 24'	25	A
82	Mocorito	25064	25° 28' 48"	107° 57' 12"	16	R
83	Choix	25018	26° 43' 12"	108° 16' 48"	2	R
84	Cosalá	25183	24° 36'	106° 49' 12"	3	R
85	Choix	25083	26° 54'	108° 9'	13	R
86	Choix	25002	26° 49' 12"	108° 25' 12"	21	A
87	Salvador Alv	25004	25° 19' 12"	108° 10' 12"	4	R
88	San Ignacio	25051	23° 54'	106° 54'	3	R
89	Culiacán	25170	24° 54'	107° 31' 48"	4	R
90	Ahome	25059	26° 10' 12"	108° 52' 12'	19	A
91	El Fuerte	25122	26° 28' 12"	108° 42'	10	R
92	El Fuerte	25061	26° 25' 12"	108° 43' 12"	15	A
93	Culiacán	25169	24° 31' 48"	107° 37' 48"	4	R
94	Elota	25113	24° 25' 12"	106° 42'	4	R

Tabla 14. Resultados de la prueba para confirmar el modelo autorregresivo AR(1)

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Corre- lograma parcial
95	Salvador Alv	25037	25° 28' 12"	108° 4' 48'0"	4	R
96	El Fuerte	25066	25° 55' 48"	108° 27'	29	A
97	Guasave	25115	25° 48' 12"	108° 4' 48"	25	A
98	El Fuerte	25055	26° 28' 12"	108° 36'	25	A
99	Navolato	25123	24° 45'	107° 31' 48"	5	R
100	Culiacán	25057	24° 48'	107° 24'	5	R
101	El Fuerte	25174	26° 22' 48"	108° 33'	3	R
102	El Fuerte	25032	26° 28' 48"	108° 43' 48"	17	A
103	El Fuerte	25114	26° 25' 48"	106° 37' 48"	3	R
104	Guasave	25010	24° 48'	107° 24'	4	R
105	Ahome	25022	26° 16' 12"	109° 22' 48"	18	A
106	Guasave	25080	25° 43' 12"	108° 43' 48"	24	A
107	Guasave	25048	25° 45'	108° 48'	14	R
108	El Fuerte	25142	26° 6'	108° 45'	5	R
109	Choix	25035	26° 19' 48"	108° 55' 48"	14	R
110	Guasave	25089	25° 48'	108° 13' 12"	5	R
111	Culiacán	25166	24° 33'	107° 22' 12"	5	R
112	Navolato	25123	24° 33'	107° 31' 48"	3	R
113	Mocorito	25125	25° 28' 12"	107° 55' 12"	5	R
114	Culiacán	25076	24° 25' 48"	107° 13' 48"	24	A
115	Navolato	25165	24° 33'	107° 31' 48"	5	R
116	Angostura	25168	24° 49' 12"	107° 49' 12"	4	R
117	Escuinapa	25130	22° 49' 48"	105° 46' 48"	4	R
118	Culiacán	25167	24° 46' 48"	107° 6'	4	R
119	El Fuerte	25009	26° 4' 48"	108° 46' 48"	25	A
120	Rosario	25079	23°	105° 51'	5	R
121	Elota	25050	23° 55' 12"	106° 54'	19	A
122	Culiacán	25179	24° 40' 12"	107° 28' 48"	3	R
123	Guasave	25027	25° 34' 48"	108° 28' 12"	24	A
124	El Fuerte	25082	26° 6'	108° 46' 12"	25	A
125	Sinaloa	25090	25° 49' 12"	108° 13' 12"	17	A
126	Culiacán	25163	25° 1' 48"	107° 28' 12"	5	R
127	Ahome	25003	25° 55' 12"	109° 10' 48"	24	A
128	Guasave	25038	25° 43' 12"	108° 28' 12"	17	A
129	Ahome	25098	25° 37' 12"	109° 3'	23	A
130	Sinaloa	25099	25° 37' 12"	108° 3'	14	R
131	El Fuerte	25143	26° 10' 12"	108° 31' 48"	5	R
132	Elota	25132	23° 55' 12"	106° 54'	5	R
133	Ahome	25151	26° 18'	109° 1' 12"	9	R
134	Ahome	25042	25° 58' 48"	109° 19' 48"	24	A
135	Elota	25128	24° 4' 12"	105° 40' 12"	7	R
136	Guasave	25124	25° 36'	108° 34' 48"	4	R
137	Culiacán	25164	24° 48'	107° 31' 48"	3	R
138	Ahome	25116	25° 48'	109°	23	A
139	Mocorito	25131	25° 28' 12"	107° 55' 12"	6	R
140	Culiacán	25161	24° 18'	107° 22' 12"	5	R
141	Navolato	25171	24° 46' 48"	107° 40' 48"	5	R

Tabla 14. Resultados de la prueba para confirmar el modelo autorregresivo AR(1)

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de Corre- lograma parcial
142	Guasave	25013	25° 36'	108° 34' 48"	18	A
143	Culiacán	25159	24° 28' 12"	107° 19' 12"	4	R
144	Guasave	25039	25° 43' 12"	108° 28' 12"	2	R
145	Navolato	25160	24° 40' 48"	107° 46' 48"	5	R
146	El Fuerte	25137	25° 55' 48"	108° 27'	4	R
147	Guasave	25040	25° 34' 48"	108° 28' 12"	3	R
148	Culiacán	25162	24° 43' 12"	107° 34' 48"	5	R
149	Ahome	25086	25° 57'	109° 1' 48"	22	A
150	Ahome	25185	25° 54'	109° 10' 12"	4	R
151	El Fuerte	25088	25° 55' 12"	108° 54'	25	A
152	Navolato	25129	24° 33'	109° 36'	3	R
153	Culiacán	25126	24° 45'	107° 31' 48"	3	R
154	Guasave	25144	25° 40' 12"	105° 19' 12"	5	A
155	Concordia	25156	23° 19' 48"	106° 13' 48"	2	R
156	Culiacán	25127	24° 48'	107° 22' 48"	3	R
157	Sinaloa	25187	25° 49' 48"	107° 49' 48"	2	R
158	Ahome	25065	25° 58' 12"	109° 55' 48"	23	A
159	Guasave	25133	25° 36'	108° 34' 12"	6	R
160	Guasave	25139	24° 45'	108° 22' 48"	3	R

#### **4.8 Resultados de la generación de muestras sintéticas.**

De acuerdo a los resultados de aceptación de las pruebas de normalidad, independencia, estacionariedad y confirmación de la aplicación del modelo autorregresivo AR(1) y a las distancias relativamente pequeñas entre una estación y otra, puede aceptarse la aplicación del modelo autorregresivo AR(1) para generar muestras de lluvia anual.

En ese tenor, se produjeron cien muestras de lluvia sintética para cada una de las 160 estaciones del estado de Sinaloa con el propósito de identificar fenómenos de sequías mediante la teoría *run-length*.

Por otro lado, los residuales de la serie original fueron sometidos a las pruebas de normalidad utilizando el coeficiente de sesgo desarrollado en el punto 3.3.1.1. De acuerdo a los resultados obtenidos 73 estaciones (46%) aceptaron la hipótesis alternativa de que la serie era un proceso AR(1) y en 87 estaciones (54%) aceptó la hipótesis nula.

La tabla 15 presenta los resultados de la prueba de normalidad hecha a los residuales.

#### **4.9 Resultados de los análisis de frecuencia de sequías para el estado de Sinaloa.**

A partir de la aplicación del método de generación de datos utilizando el modelo autorregresivo AR(1), se obtuvieron cien muestras de lluvia sintética para cada estación. Posteriormente se procedió a realizar la investigación hidrológica de sequías mediante la teoría estadística de rachas propuestas por Yevjevich en 1967.

Cada dato generado se comparó con cinco niveles de truncamiento constante obtenidos mediante un porcentaje de la media (el nivel varió entre 0.6 a 1.0 veces la media). Por lo que de acuerdo a los resultados del programa de cómputo elaborado, se encontró que el 90% de las estaciones climatológicas sometidas a un nivel de truncamiento igual a la media, tienen sequías de 1 a 3 años consecutivos; asimismo el 9.375% y el 0.625% presentan sequías de 4 y 5 años consecutivos respectivamente.

Tabla 15. Resultados de la prueba de normalidad aplicada a los residuales de la serie.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de normalidad para residuales
1	San Ignacio	25036	24° 13' 48"	106° 30'	11	A
2	Concordia	25074	23° 30'	105° 52' 48"	17	A
3	Sinaloa	25188	26° 3'	108° 25' 12"	2	R
4	Elota	25181	24° 22' 48"	106° 36'	5	R
5	Badiraguato	25093	25° 52' 48"	107° 21'	24	A
6	Concordia	25070	23° 25' 12'	105° 55' 48"	22	A
7	Escuinapa	25029	23° 25' 48"	105° 49' 48"	29	A
8	Concordia	25095	23° 34' 48"	106° 7' 12"	8	R
9	San Ignacio	25047	24° 15'	106° 15'	12	R
10	Escuinapa	25049	22° 31' 48"	105° 28' 12"	25	A
11	Rosario	25058	23° 1' 48"	105° 45'	18	A
12	Rosario	25186	23° 1' 12"	105° 40' 12"	4	R
13	Rosario	25073	23° 4' 12"	105° 28' 12"	43	A
14	Badiraguato	25041	25° 21'	107° 13' 48"	22	A
15	Badiraguato	25094	25° 39'	107° 22' 48"	15	R
16	Culiacán	25033	25° 6'	107° 24'	25	A
17	Escuinapa	25150	23° 4' 48"	105° 55' 12"	12	R
18	Mazatlán	25052	23° 30'	106° 19' 12"	28	A
19	Choix	25190	26° 52' 12"	107° 22' 12"	2	R
20	Cosalá	25012	24° 25' 12"	106° 42'	20	A
21	Choix	25068	27° 1' 12"	108° 25' 12"	25	A
22	Badiraguato	25006	25° 22' 12"	107° 33'	19	A
23	Badiraguato	25097	25° 51'	107° 22' 48"	30	A
24	Badiraguato	25110	25° 22' 12"	107° 31' 48"	24	A
25	Choix	25044	26° 54'	108° 22' 12"	29	A
26	El Fuerte	25100	26° 22' 12"	108° 18'	30	A
27	Concordia	25011	23° 16' 12"	106° 3'	28	A
28	Guasave	25148	25° 34' 48"	108° 27'	7	R
29	Elota	25101	24° 10' 12"	106° 40' 48"	22	A
30	Culiacán	25043	23° 58' 48"	107° 46' 48"	30	A
31	San Ignacio	25192	23° 30'	106° 28' 12"	8	R
32	San Ignacio	25084	23° 55' 58"	106° 25' 48"	11	R
33	Sinaloa	25005	25° 49' 12"	107° 55' 12"	19	A
34	Culiacán	25081	24° 48'	107° 9'	25	A
35	Rosario	25078	23°	105° 55' 12"	23	A
36	Badiraguato	25180	25° 48'	107° 55' 12"	3	R
37	Culiacán	25030	25° 15'	108° 10' 48"	24	A
38	Sinaloa	25046	25° 54'	108° 1' 12"	25	A
39	Badiraguato	25177	25° 33'	107° 22' 12"	5	R
40	Sinaloa	25085	26° 7' 48"	107° 57'	28	A
41	Sinaloa	25175	26° 4' 48"	107° 51'	4	R
42	San Ignacio	25118	23° 55' 48"	106° 25' 48"	30	A
43	Concordia	25112	23° 16' 48"	106° 4' 12"	6	R
44	Mazatlán	25176	23° 30'	106° 28' 48"	7	R
45	Guasave	25178	25° 43' 12"	108° 19' 48"	7	R
46	Mazatlán	25135	23° 10' 48"	106° 25' 12"	6	R
47	Rosario	25134	23° 12'	105° 24'	5	R

Tabla 15. Resultados de la prueba de normalidad aplicada a los residuales de la serie.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de normalidad para residuales
48	Mocorito	25077	25° 24'	107° 49' 48"	17	A
49	Mazatlán	25119	23 21'	106° 15'	16	R
50	El Fuerte	25007	26° 21'	108° 28' 48"	25	A
51	Mazatlán	25091	23° 19' 48"	106° 13' 12"	30	A
52	Sinaloa	25019	26° 13' 18"	108° 16' 12"	25	A
53	Culiacán	25069	24° 55' 48"	107° 22' 48"	25	A
54	Cosalá	25087	24° 30'	106° 51'	25	A
55	El Fuerte	25056	26° 18'	108° 43' 12"	16	R
56	San Ignacio	25024	23° 45'	106° 31' 48"	30	A
57	Culiacán	25172	24° 45'	107° 22' 48"	6	R
58	Choix	25017	26° 43' 48"	108° 19' 48"	16	A
59	Escuinapa	25149	22° 4' 12"	105° 43' 48"	15	R
60	Badiraguato	25092	25° 52' 12"	107° 18'	30	A
61	San Ignacio	25045	23° 57'	106° 37' 12"	24	A
62	Sinaloa	25054	26° 3'	106° 19' 48"	23	A
63	San Ignacio	25001	24° 4' 12"	106° 39'	25	A
64	Badiraguato	25111	25° 21'	107° 33'	7	R
65	Mocorito	25063	25° 28' 48"	107° 55' 12"	3	R
66	Ahome	25060	25° 48'	109°	8	R
67	Culiacán	25075	25° 52' 48"	105° 45'	11	R
68	Culiacán	25016	24° 48'	107° 24'	10	R
69	El Fuerte	25053	26° 13' 12"	108° 36'	25	A
70	Sinaloa	25184	25° 49' 48"	107° 55' 12"	2	R
71	Escuinapa	25034	22° 51'	105° 46' 48"	2	R
72	Badiraguato	25158	25° 49' 12"	105° 13' 12"	8	R
73	El Fuerte	25023	26° 25' 48"	108° 37' 12"	25	A
74	Mocorito	25117	25° 28' 48"	107° 55' 12"	25	A
75	Mocorito	25071	25° 4' 48"	107° 46' 48"	24	A
76	Choix	25020	26° 43' 12"	108° 19' 48"	4	R
77	Elota	25028	23° 57'	106° 43' 12"	30	A
78	El Fuerte	25025	26° 31' 12"	108° 36'	25	A
79	San Ignacio	25021	23° 43' 48"	106° 46' 48"	22	A
80	Mazatlán	25031	23° 33'	106° 28' 12"	30	A
81	Culiacán	25015	24° 49' 12"	107° 24'	25	A
82	Mocorito	25064	25° 28' 48"	107° 57' 12"	16	R
83	Choix	25018	26° 43' 12"	108° 16' 48"	2	R
84	Cosalá	25183	24° 36'	106° 49' 12"	3	R
85	Choix	25083	26° 54'	108° 9'	13	R
86	Choix	25002	26° 49' 12"	108° 25' 12"	21	A
87	Salvador Alv	25004	25° 19' 12"	108° 10' 12"	4	R
88	San Ignacio	25051	23° 54'	106° 54'	3	R
89	Culiacán	25170	24° 54'	107° 31' 48"	4	R
90	Ahome	25059	26° 10' 12"	108° 52' 12"	19	A
91	El Fuerte	25122	26° 28' 12"	108° 42'	10	R
92	El Fuerte	25061	26° 25' 12"	108° 43' 12"	15	A
93	Culiacán	25169	24° 31' 48"	107° 37' 48"	4	R
94	Elota	25113	24° 25' 12"	106° 42'	4	R

Tabla 15. Resultados de la prueba de normalidad aplicada a los residuales de la serie.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de normalidad para residuales
95	Salvador Alv	25037	25° 28' 12"	108° 4' 48'0"	4	R
96	El Fuerte	25066	25° 55' 48"	108° 27'	29	A
97	Guasave	25115	25° 48' 12"	108° 4' 48"	25	A
98	El Fuerte	25055	26° 28' 12"	108° 36'	25	A
99	Navolato	25123	24° 45'	107° 31' 48"	5	R
100	Culiacán	25057	24° 48'	107° 24'	5	R
101	El Fuerte	25174	26° 22' 48"	108° 33'	3	R
102	El Fuerte	25032	26° 28' 48"	108° 43' 48"	17	A
103	El Fuerte	25114	26° 25' 48"	106° 37' 48"	3	R
104	Guasave	25010	24° 48'	107° 24'	4	R
105	Ahome	25022	26° 16' 12"	109° 22' 48"	18	A
106	Guasave	25080	25° 43' 12"	108° 43' 48"	24	A
107	Guasave	25048	25° 45'	108° 48'	14	R
108	El Fuerte	25142	26° 6'	108° 45'	5	R
109	Choix	25035	26° 19' 48"	108° 55' 48"	14	R
110	Guasave	25089	25° 48'	108° 13' 12"	5	R
111	Culiacán	25166	24° 33'	107° 22' 12"	5	R
112	Navolato	25123	24° 33'	107° 31' 48"	3	R
113	Mocorito	25125	25° 28' 12"	107° 55' 12"	5	R
114	Culiacán	25076	24° 25' 48"	107° 13' 48"	24	A
115	Navolato	25165	24° 33'	107° 31' 48"	5	R
116	Angostura	25168	24° 49' 12"	107° 49' 12"	4	R
117	Escuinapa	25130	22° 49' 48"	105° 46' 48"	4	R
118	Culiacán	25167	24° 46' 48"	107° 6'	4	R
119	El Fuerte	25009	26° 4' 48"	108° 46' 48"	25	A
120	Rosario	25079	23°	105° 51'	5	R
121	Elota	25050	23° 55' 12"	106° 54'	19	A
122	Culiacán	25179	24° 40' 12"	107° 28' 48"	3	R
123	Guasave	25027	25° 34' 48"	108° 28' 12"	24	A
124	El Fuerte	25082	26° 6'	108° 46' 12"	25	A
125	Sinaloa	25090	25° 49' 12"	108° 13' 12"	17	A
126	Culiacán	25163	25° 1' 48"	107° 28' 12"	5	R
127	Ahome	25003	25° 55' 12"	109° 10' 48"	24	A
128	Guasave	25038	25° 43' 12"	108° 28' 12"	17	A
129	Ahome	25098	25° 37' 12"	109° 3'	23	A
130	Sinaloa	25099	25° 37' 12"	108° 3'	14	R
131	El Fuerte	25143	26° 10' 12"	108° 31' 48"	5	R
132	Elota	25132	23° 55' 12"	106° 54'	5	R
133	Ahome	25151	26° 18'	109° 1' 12"	9	R
134	Ahome	25042	25° 58' 48"	109° 19' 48"	24	A
135	Elota	25128	24° 4' 12"	105° 40' 12"	7	R
136	Guasave	25124	25° 36'	108° 34' 48"	4	R
137	Culiacán	25164	24° 48'	107° 31' 48"	3	R
138	Ahome	25116	25° 48'	109°	23	A
139	Mocorito	25131	25° 28' 12"	107° 55' 12"	6	R
140	Culiacán	25161	24° 18'	107° 22' 12"	5	R
141	Navolato	25171	24° 46' 48"	107° 40' 48"	5	R

Tabla 15. Resultados de la prueba de normalidad aplicada a los residuales de la serie.

No	Municipio	Estación No.	Latitud	Longitud	Años de registro	Test de normalidad para residuales
142	Guasave	25013	25° 36'	108° 34' 48"	18	A
143	Culiacán	25159	24° 28' 12"	107° 19' 12"	4	R
144	Guasave	25039	25° 43' 12"	108° 28' 12"	2	R
145	Navolato	25160	24° 40' 48"	107° 46' 48"	5	R
146	El Fuerte	25137	25° 55' 48"	108° 27'	4	R
147	Guasave	25040	25° 34' 48"	108° 28' 12"	3	R
148	Culiacán	25162	24° 43' 12"	107° 34' 48"	5	R
149	Ahome	25086	25° 57'	109° 1' 48"	22	A
150	Ahome	25185	25° 54'	109° 10' 12"	4	R
151	El Fuerte	25088	25° 55' 12"	108° 54'	25	A
152	Navolato	25129	24° 33'	109° 36'	3	R
153	Culiacán	25126	24° 45'	107° 31' 48"	3	R
154	Guasave	25144	25° 40' 12"	105° 19' 12"	5	A
155	Concordia	25156	23° 19' 48"	106° 13' 48"	2	R
156	Culiacán	25127	24° 48'	107° 22' 48"	3	R
157	Sinaloa	25187	25° 49' 48"	107° 49' 48"	2	R
158	Ahome	25065	25° 58' 12"	109° 55' 48"	23	A
159	Guasave	25133	25° 36'	108° 34' 12"	6	R
160	Guasave	25139	24° 45'	108° 22' 48"	3	R

Para cada nivel de demanda se identificaron todos los eventos de sequías, de manera que se está en condición de responder las siguientes cuestiones:

- a. Dado que hay una sequía en la región. ¿Cuál es la probabilidad de que tenga duración (*Run-Length*) mayor que N años?
- b. Dado que hay una sequía en la región. ¿Cuál es la probabilidad de que se tenga una deficiencia total de agua (*Run-Sum*) mayor que D?
- c. Dado que hay una sequía en la región. ¿Cuál es la probabilidad de tener una severidad promedio (*Run-Intensity*) mayor que R ?.

Posteriormente a cada nivel de truncamiento aplicado a las mismas muestras se le calculó el período de retorno teniendo un evento de sequía con diferentes propiedades. Por lo que se está en condición de responder lo siguiente:

- d. ¿Cuál es el período de retorno teniendo un evento de sequía de duración mayor que N años ?.
- e. ¿Cuál es el período de retorno teniendo un evento de sequía con deficiencia total de agua mayor que D ?
- f. ¿Cuál es el período de retorno teniendo un evento de sequía con severidad promedio mayor que R ?

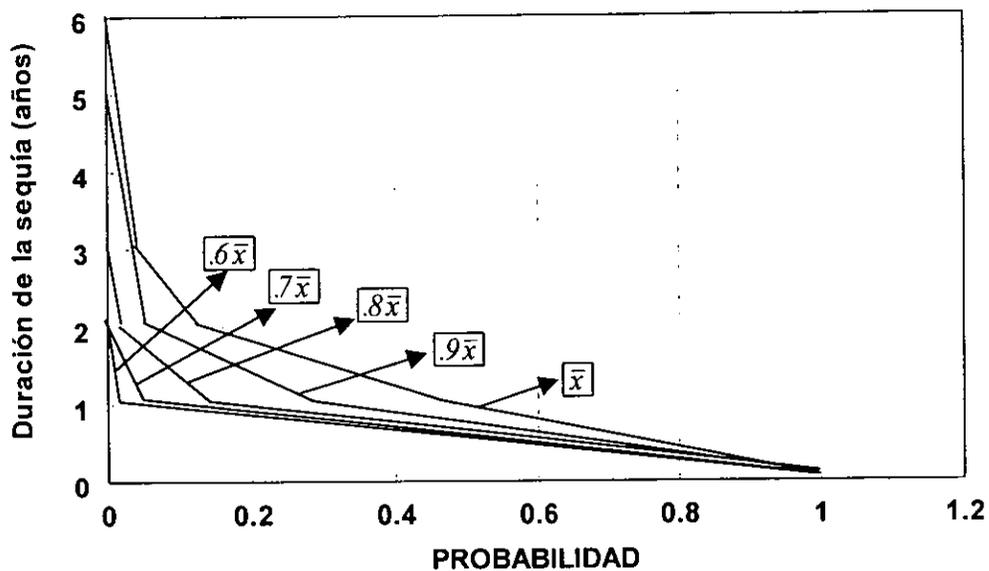
Las figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22 muestran las respuestas de las seis preguntas para ocho estaciones climatológicas del estado de Sinaloa.

La figura 23 señala la ubicación de regiones con valores de probabilidad de ocurrencia de sequías de un año cuando el nivel de truncamiento es la media. De la misma forma las figuras 24,

Fig. 17. Resultados de las probabilidades asociadas con la duración de sequías para cada nivel de truncación

Estación No 1

Run - Length



Estación No 2

Run - Length

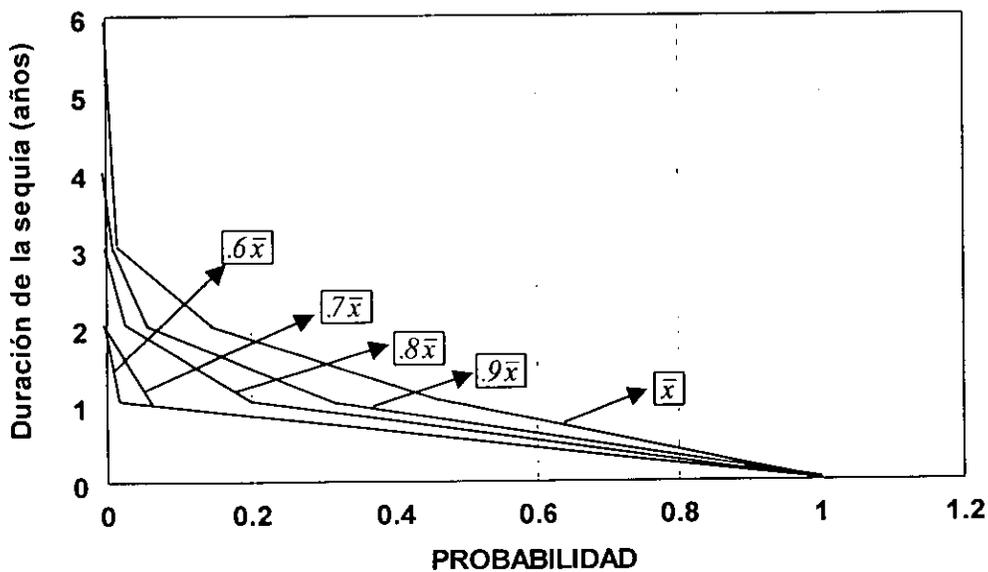
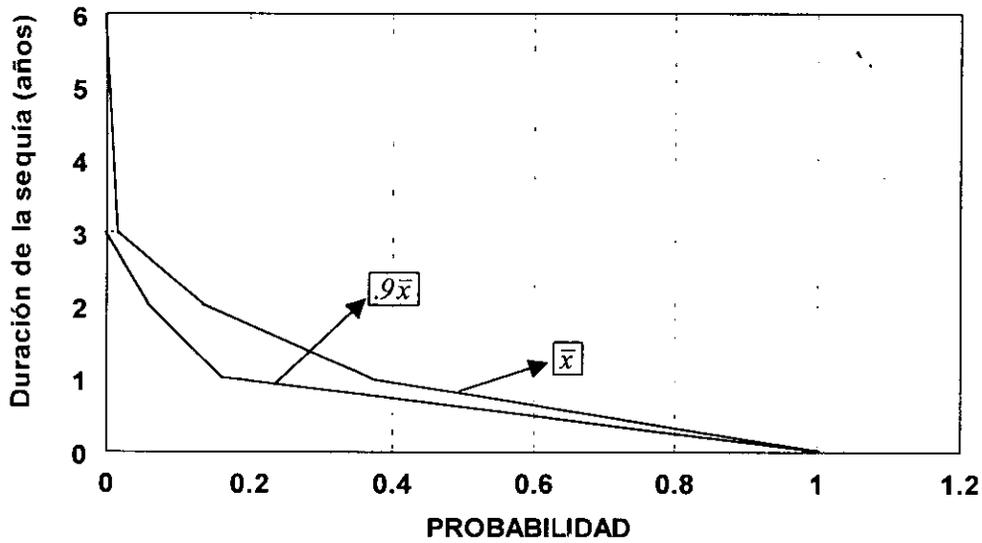


Fig. 17. Resultados de las probabilidades asociadas con la duración de sequías para cada nivel de truncación

Estación No 3

118

Run - Length



Estación No 4

Run - Length

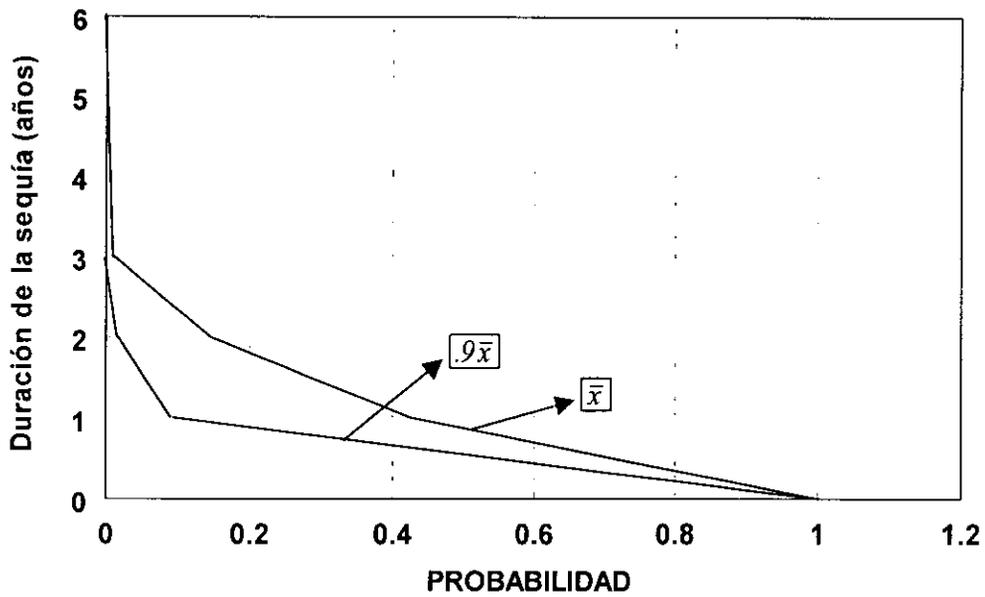
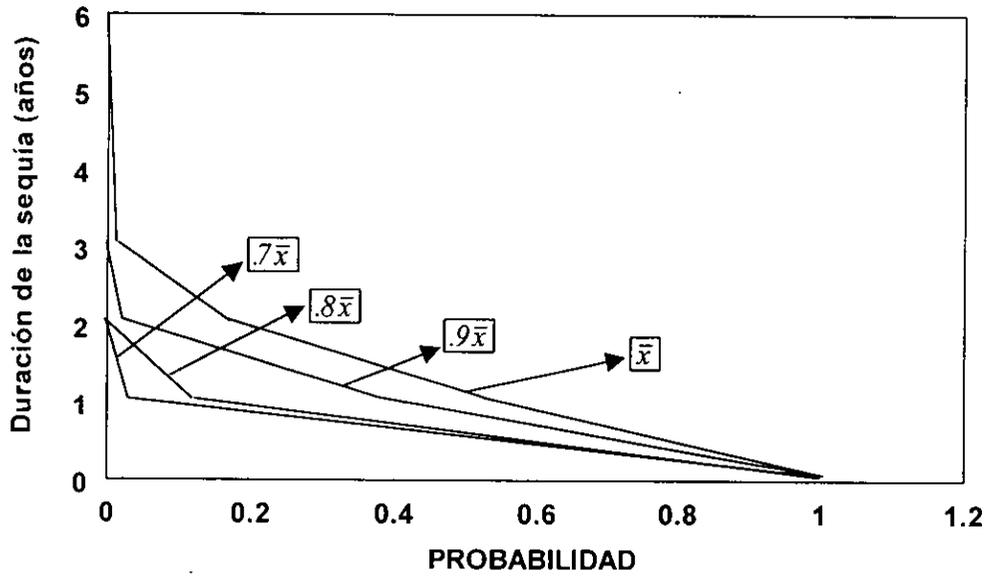


Fig. 17. Resultados de las probabilidades asociadas con la duración de sequías para cada nivel de truncación

Estación No 5

Run - Length

119



Estación No 6

Run - Length

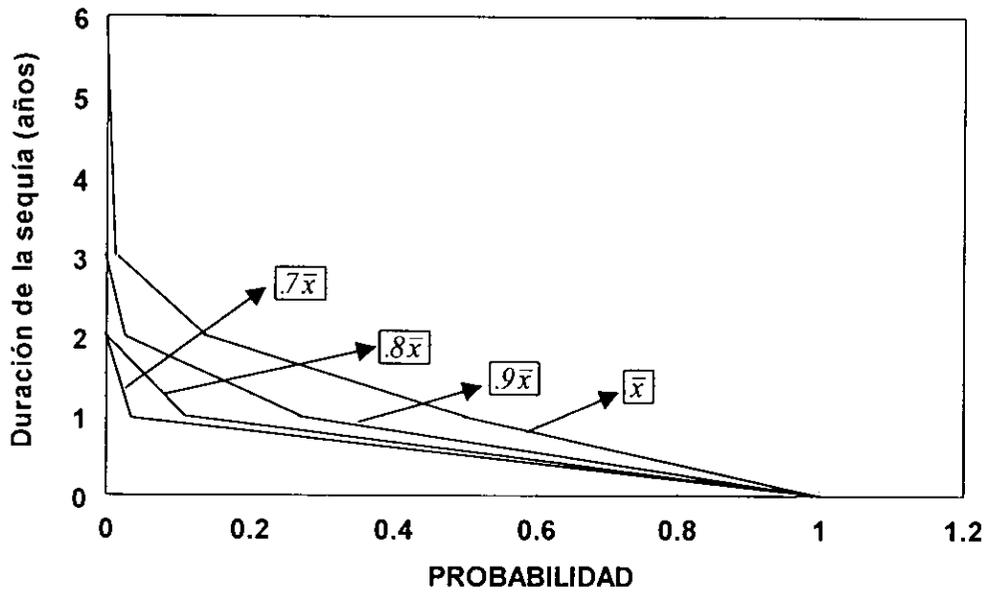
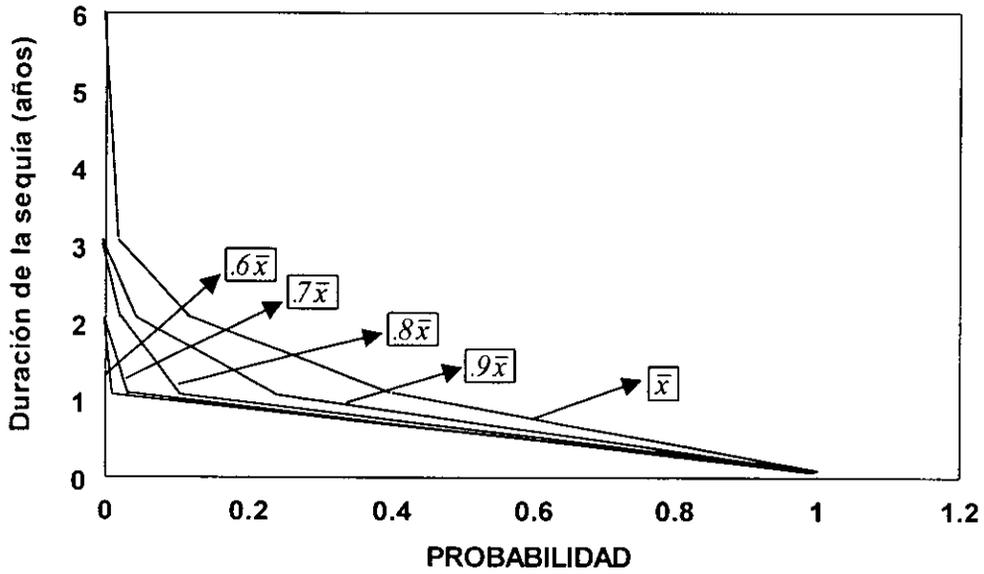


Fig. 17. Resultados de las probabilidades asociadas con la duración de sequías para cada nivel de truncación

Estación No 7

120

Run - Length



Estación No 8

Run - Length

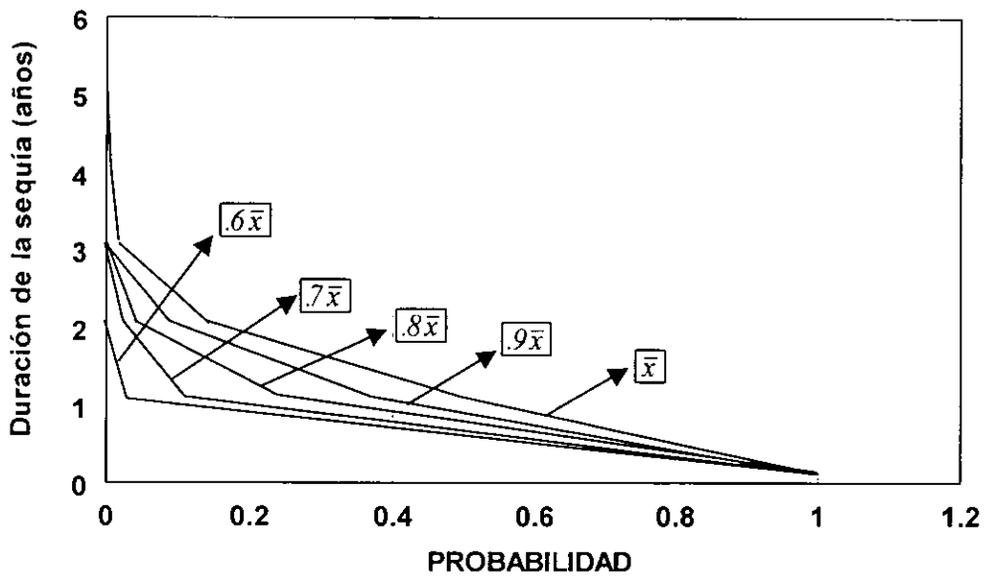
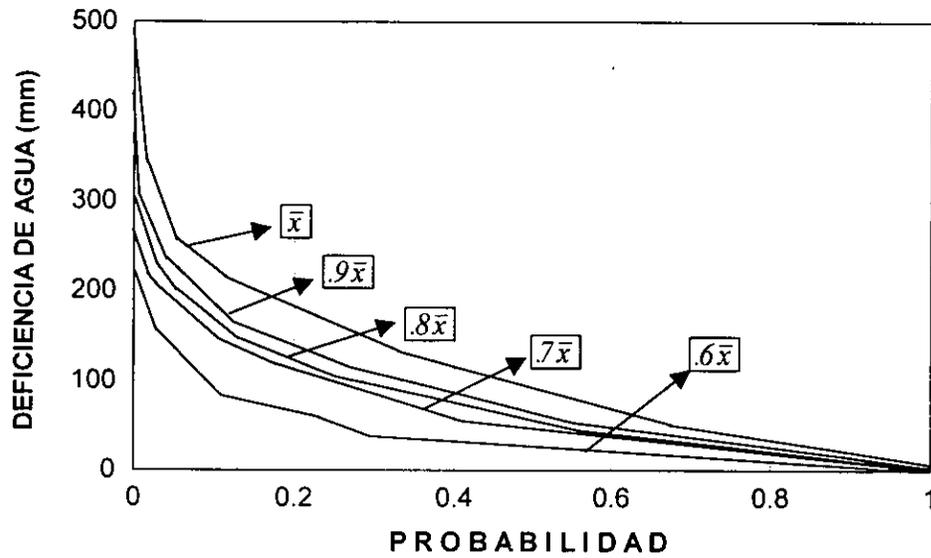


Fig. 18. Resultados de las probabilidades asociadas a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación

### Estación No. 1

Run-sum

121



### Estación No. 2

Run-sum

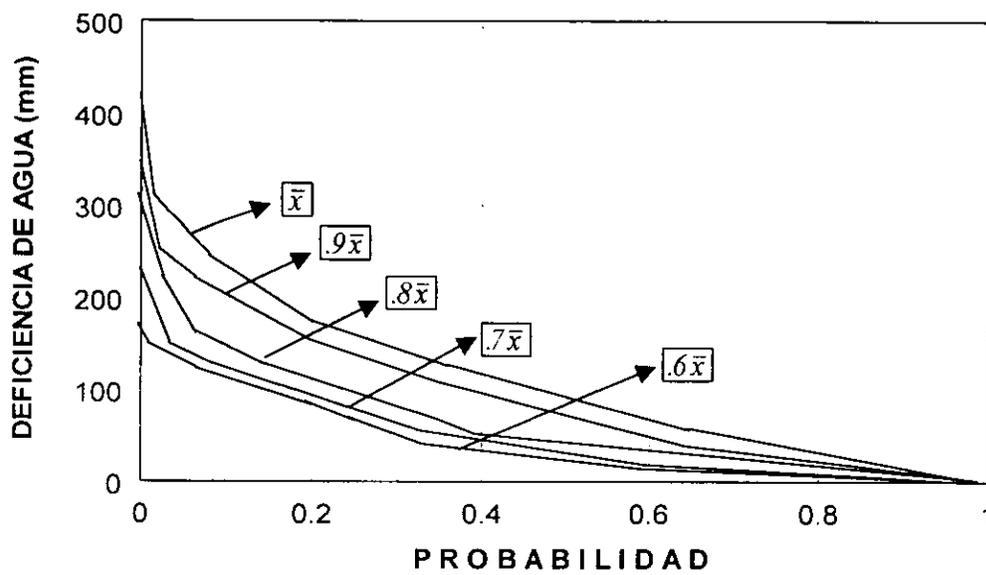
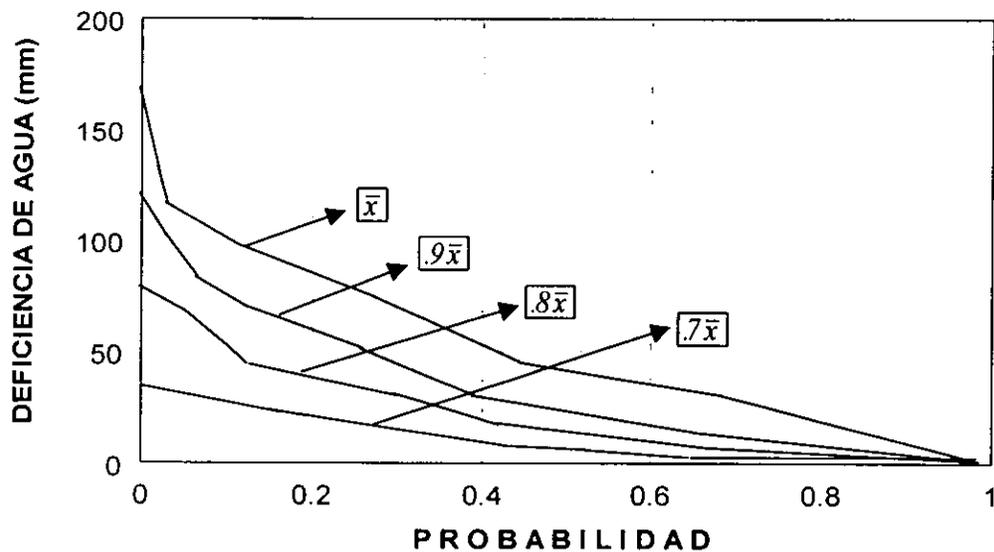


Fig. 18. Resultados de las probabilidades asociadas a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación

### Estación No. 3

Run-sum

122



### Estación No. 4

Run-sum

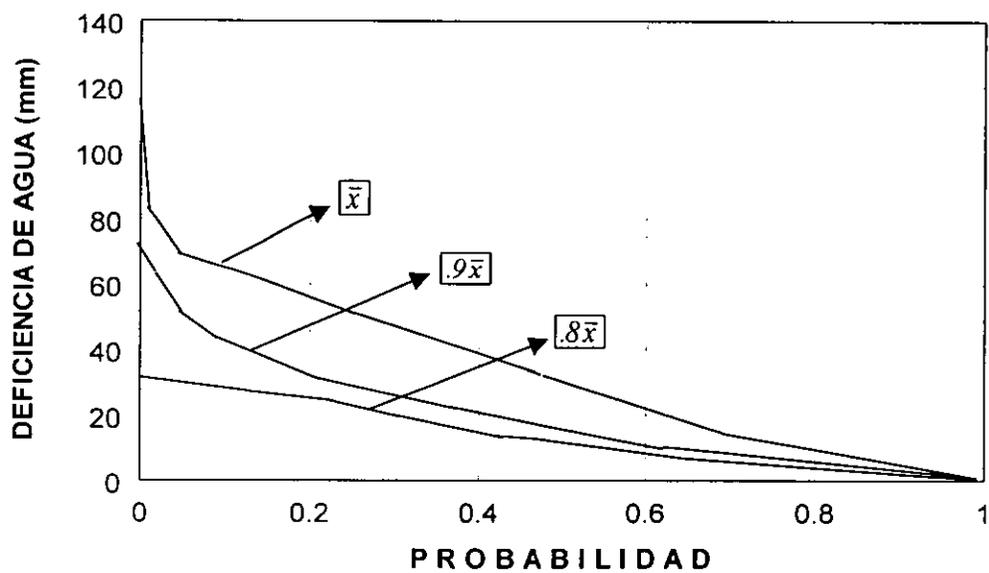
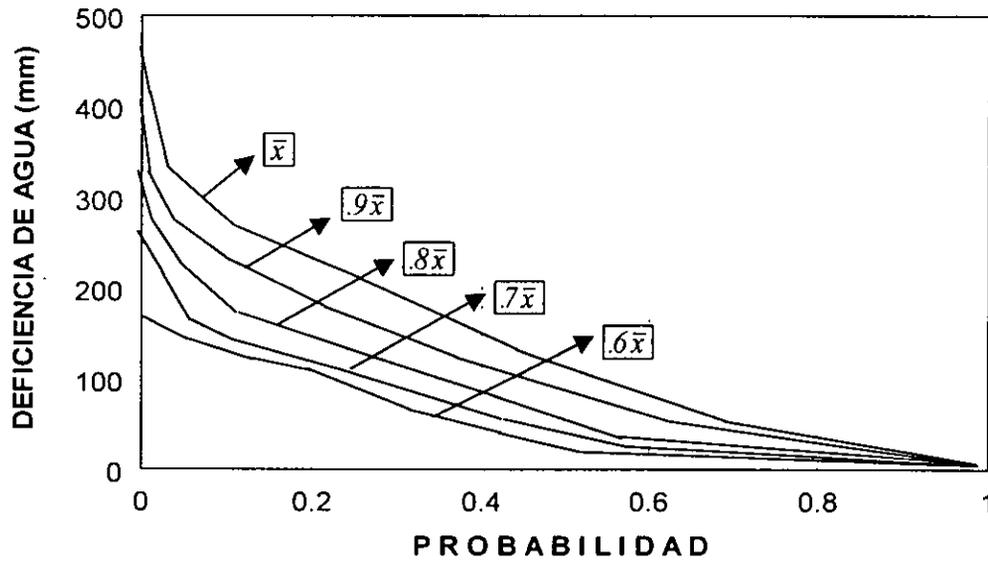


Fig. 18. Resultados de las probabilidades asociadas a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación

### Estación No. 5

Run-sum

123



### Estación No. 6

Run-sum

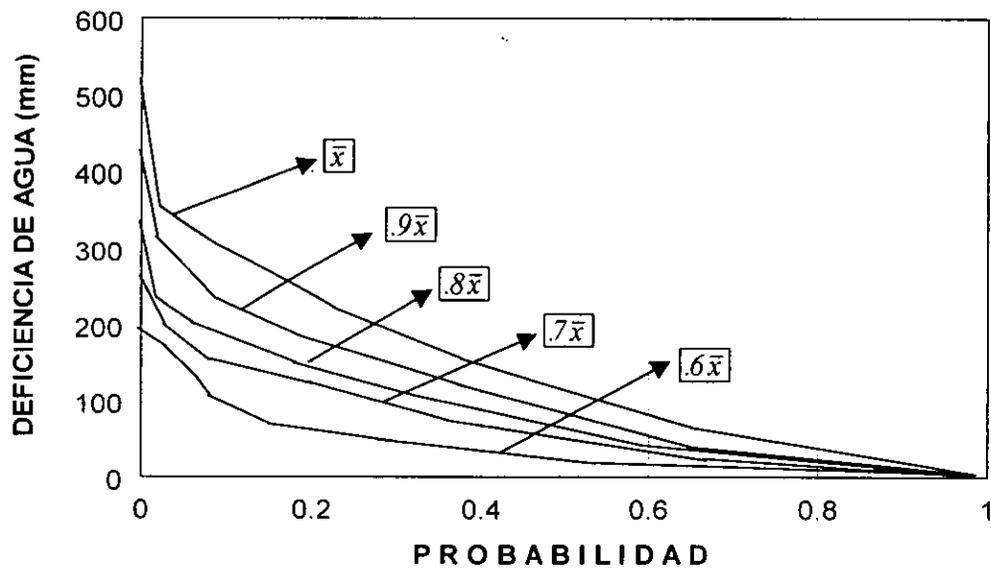
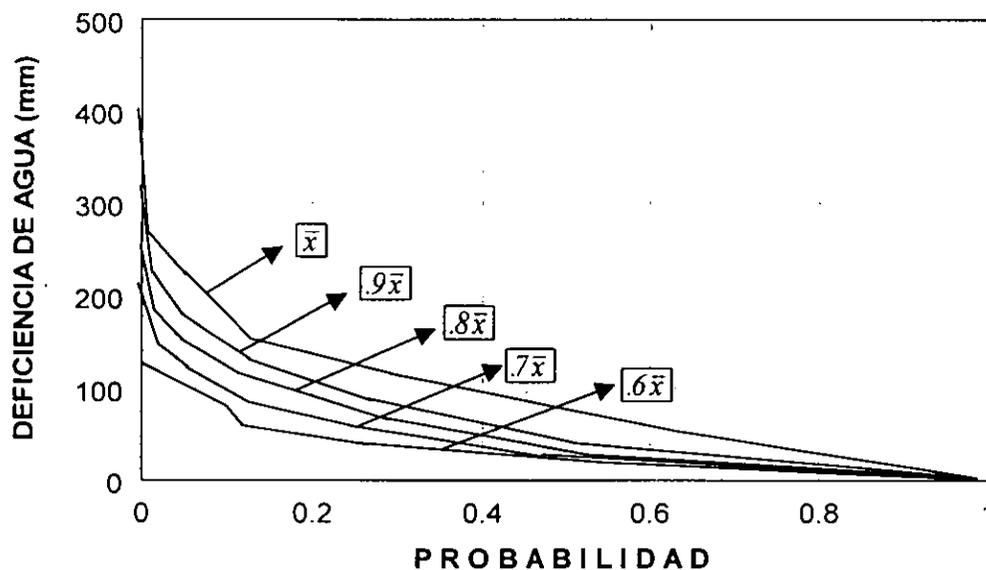


Fig. 18. Resultados de las probabilidades asociadas a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación

### Estación No. 7

Run-sum

124



### Estación No. 8

Run-sum

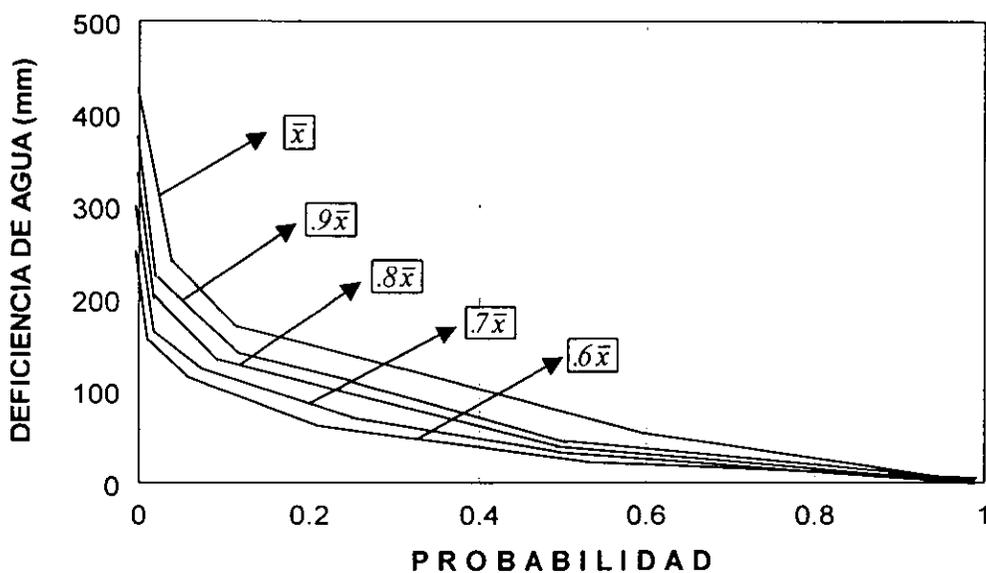
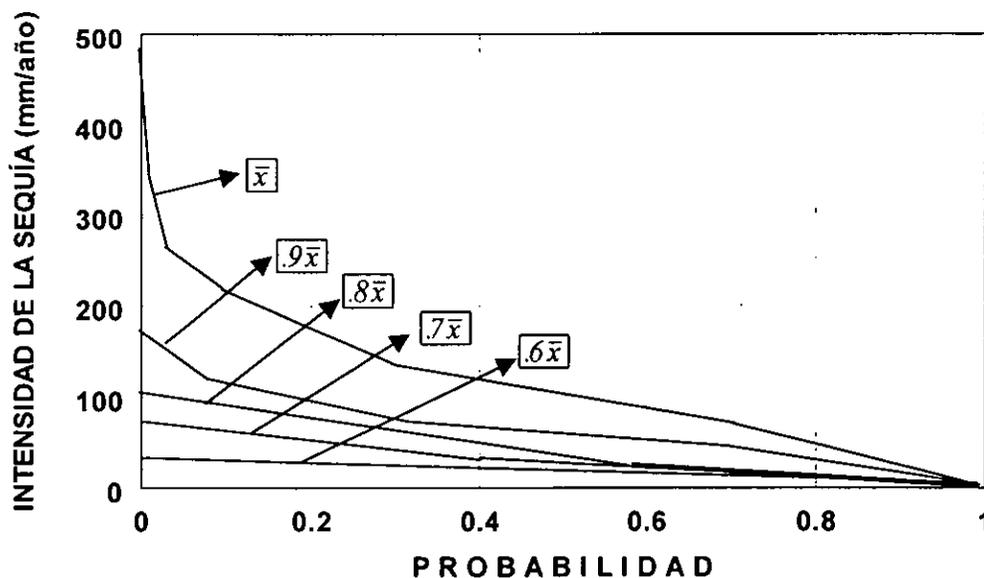


Fig. 19. Resultados de las probabilidades asociadas con la intensidad de la sequía, para cada nivel de truncación

### Estación No 1

Run-Intensity

125



### Estación No 2

Run-Intensity

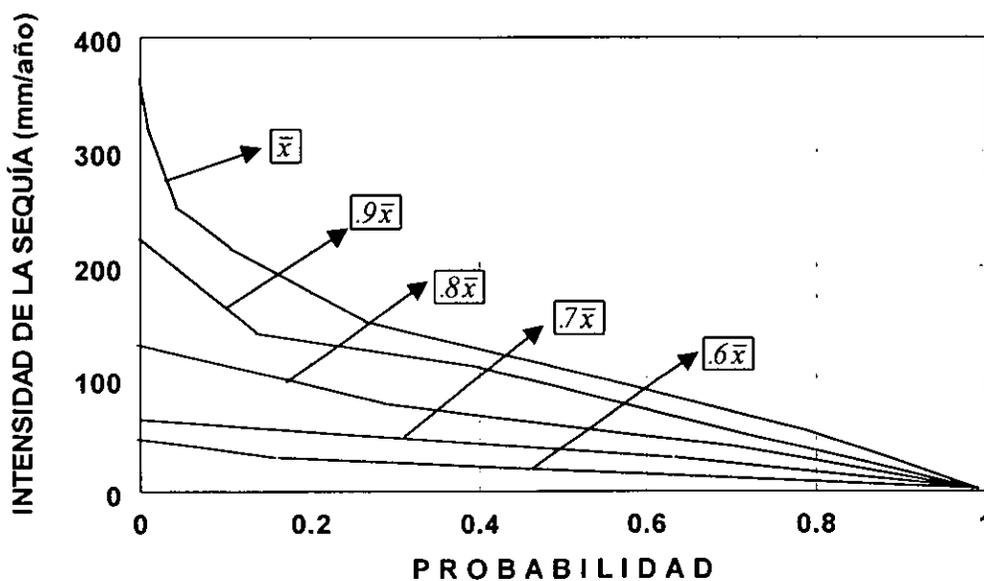
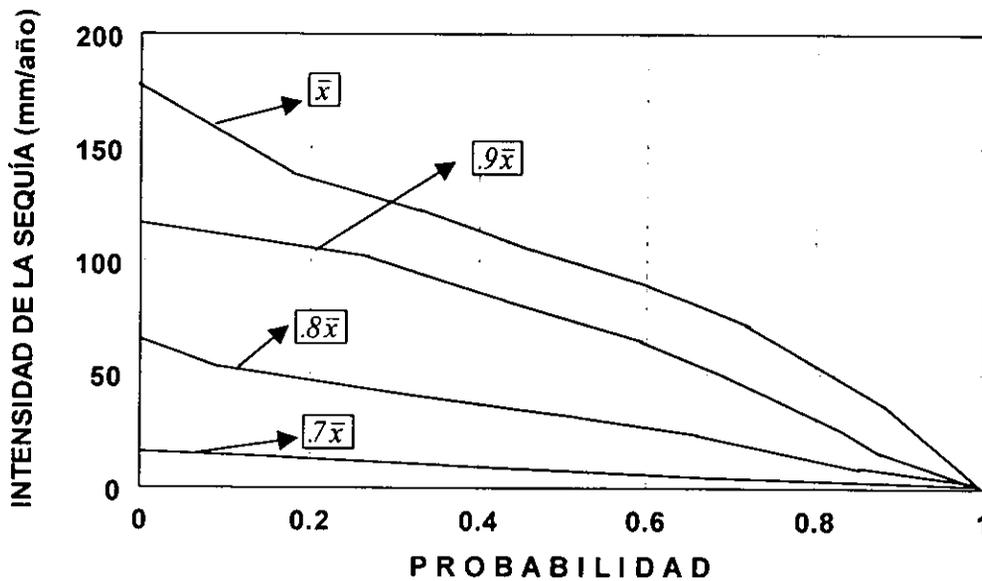


Fig. 19. Resultados de las probabilidades asociadas con la intensidad de la sequía, para cada nivel de truncación

### Estación No 3

Run-Intensity

126



### Estación No 4

Run-Intensity

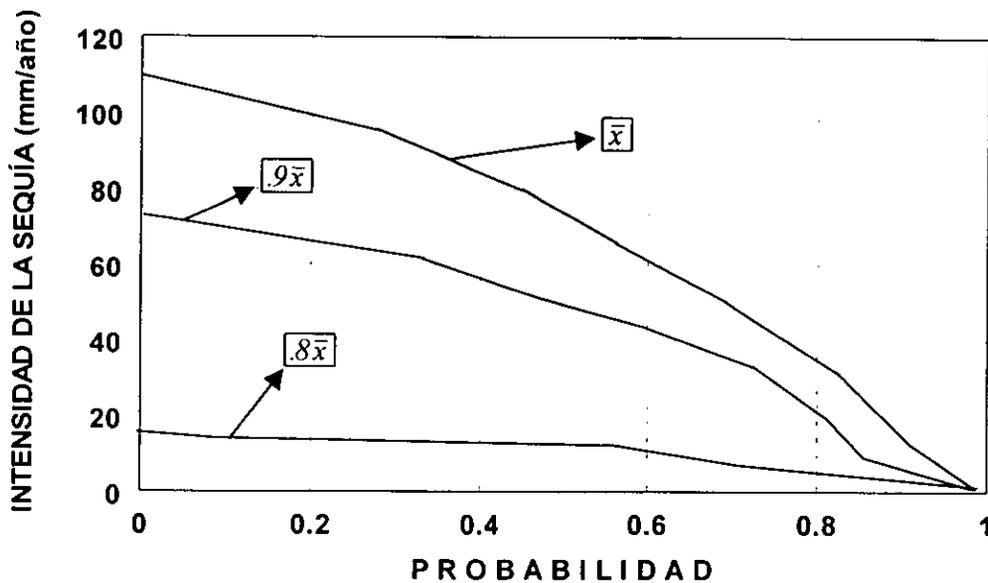
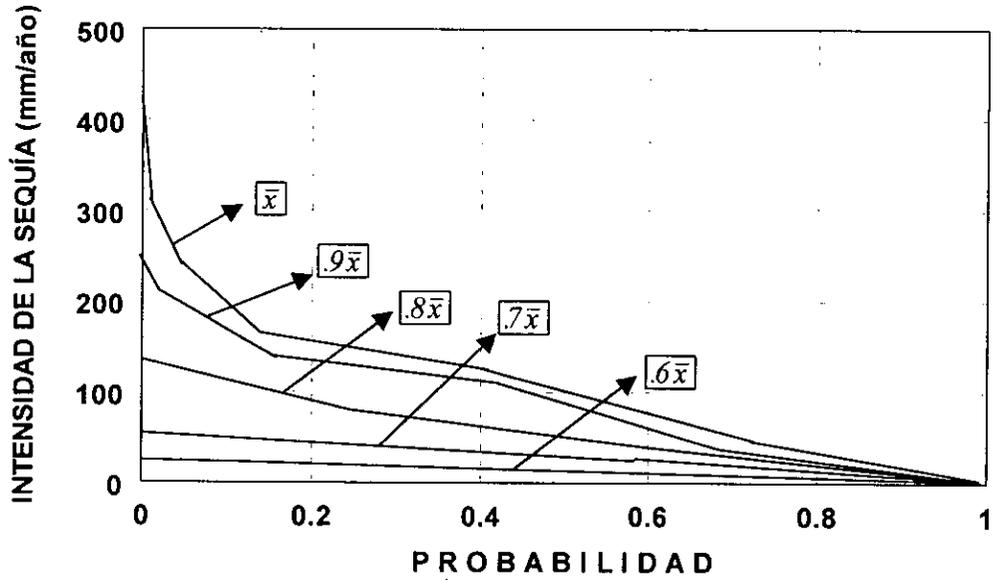


Fig. 19. Resultados de las probabilidades asociadas con la intensidad de la sequía, para cada nivel de truncación

### Estación No 5

Run-Intensity

127



### Estación No 6

Run-Intensity

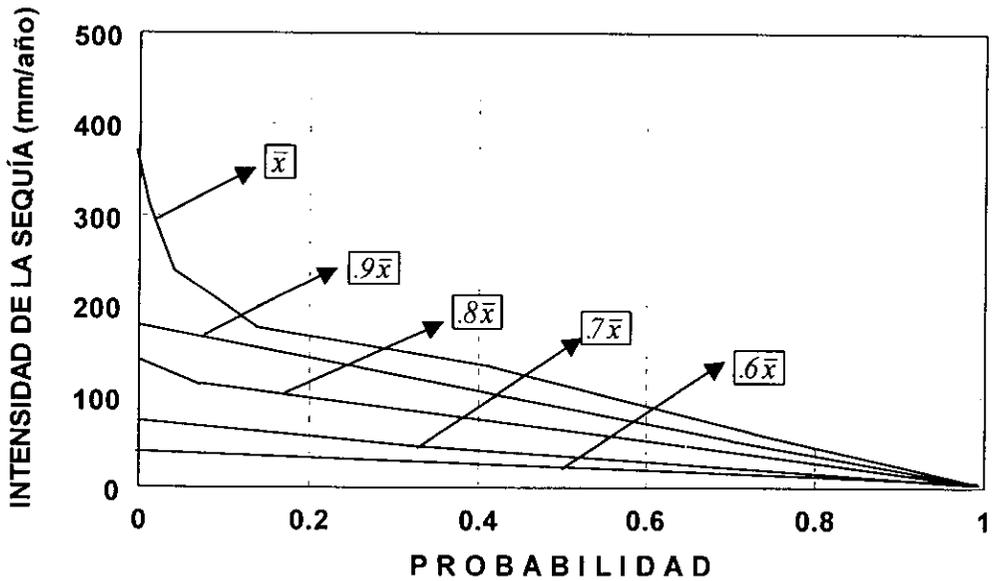
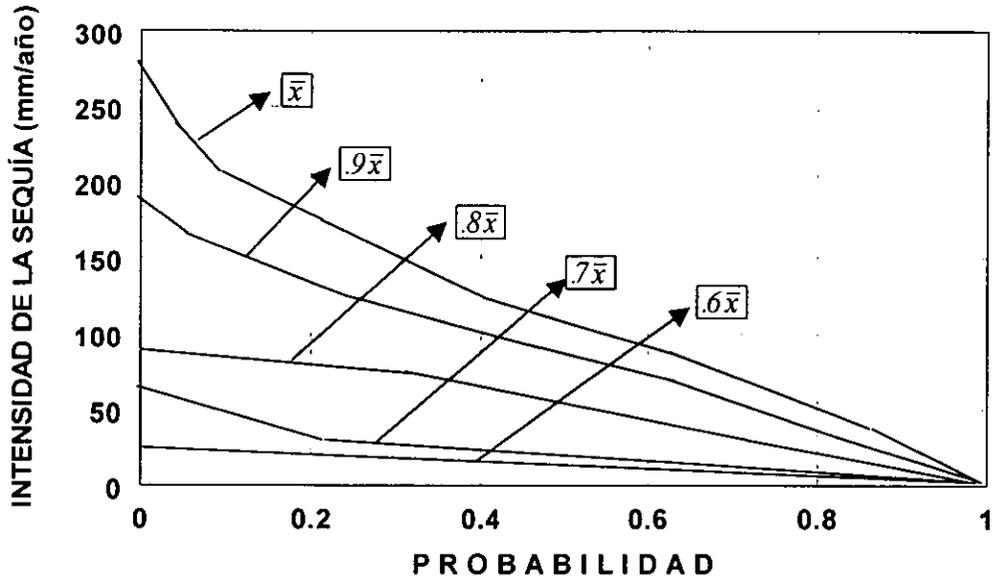


Fig. 19. Resultados de las probabilidades asociadas con la intensidad de la sequía, para cada nivel de truncación

### Estación No 7

Run-Intensity

128



### Estación No 8

Run-Intensity

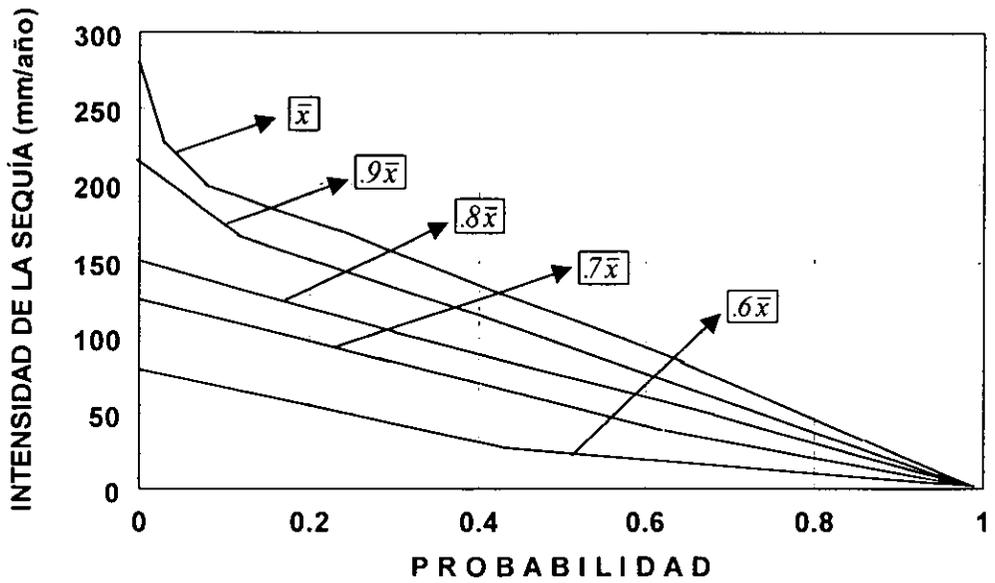
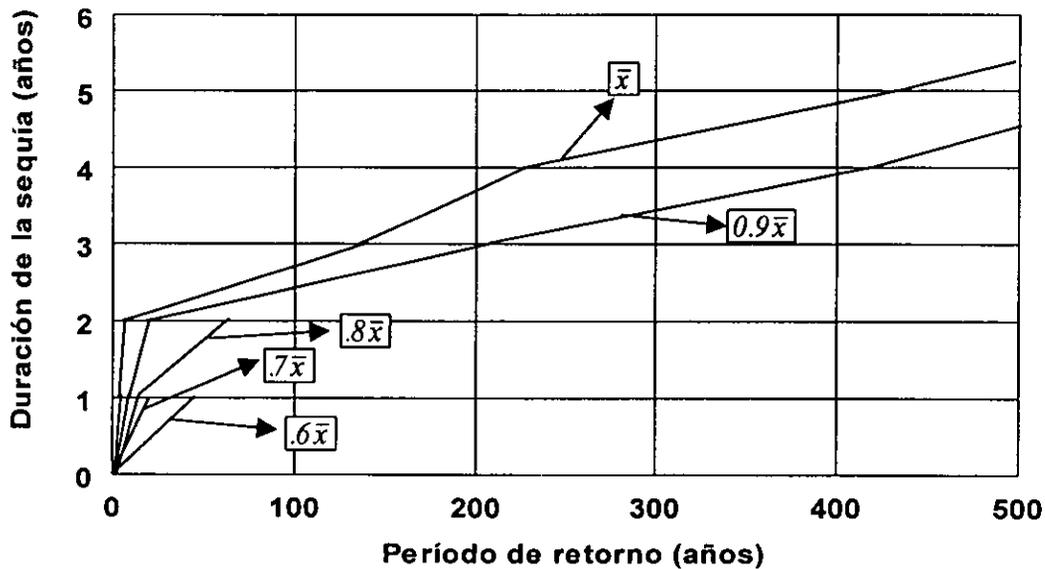


Fig. 20. Resultados de los periodos de retorno asociados a la duracion de la sequia para cada nivel de truncacion.

Estación No. 1

Run length



Estación No. 2

Run length

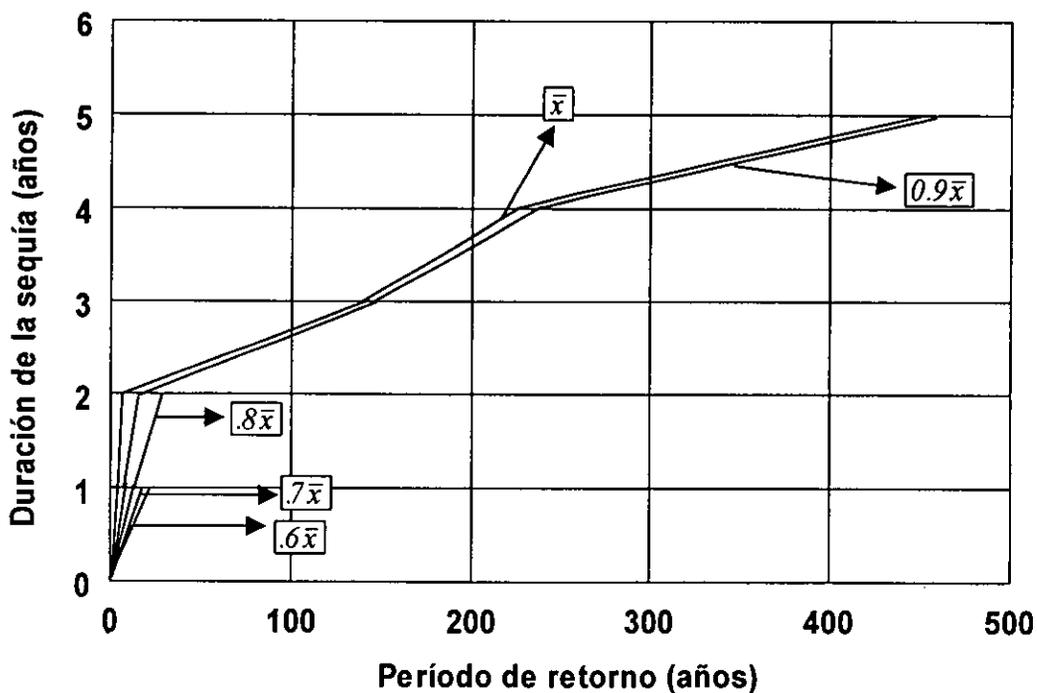
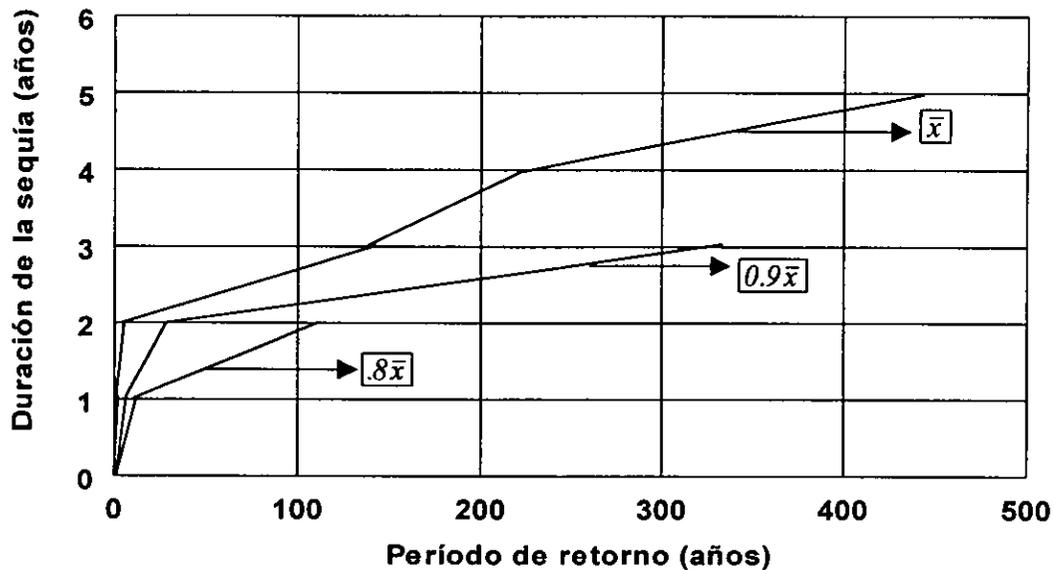


Fig. 20. Resultados de los períodos de retorno asociados a la duración de la sequía para cada nivel de truncación.

Estación No. 3

Run length



Estación No. 4

Run length

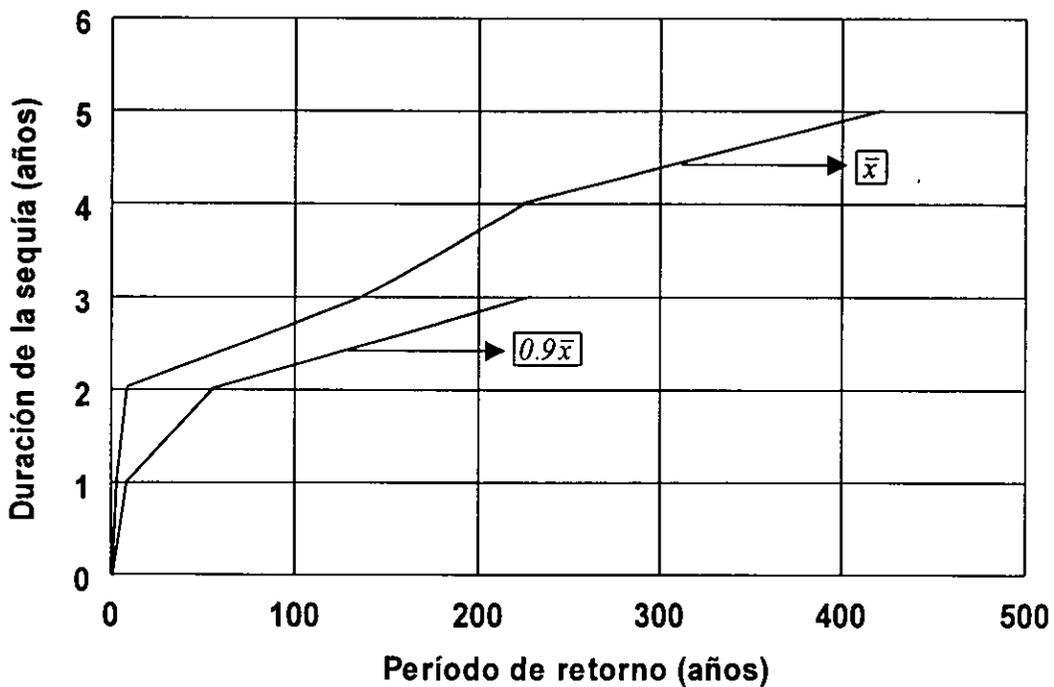
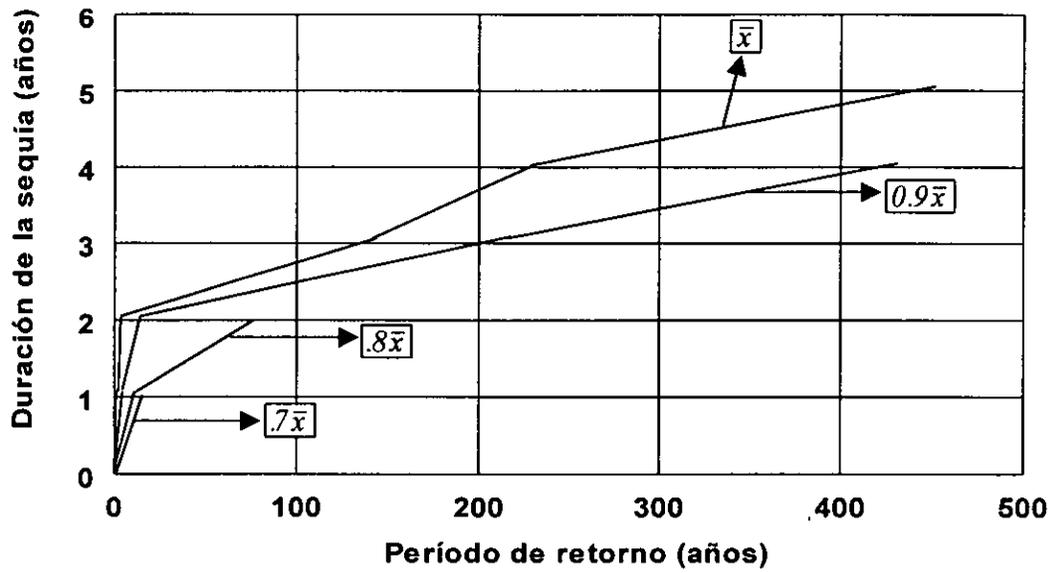


Fig. 20. Resultados de los períodos de retorno asociados a la duración de la sequía para cada nivel de truncación.

Estación No. 5

Run length



Estación No. 6

Run length

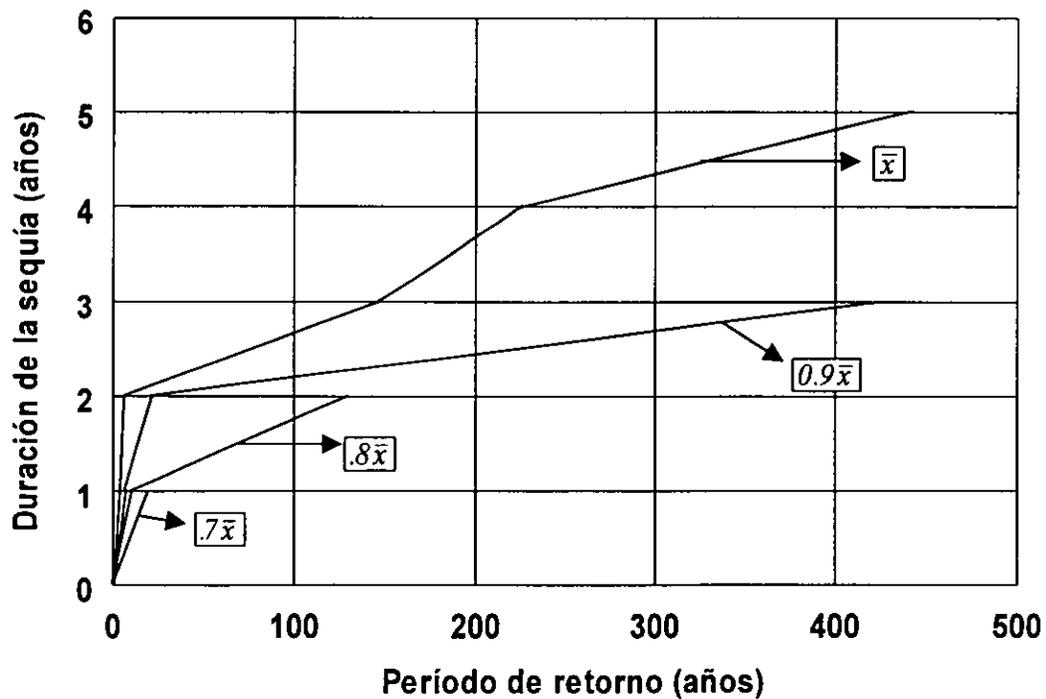
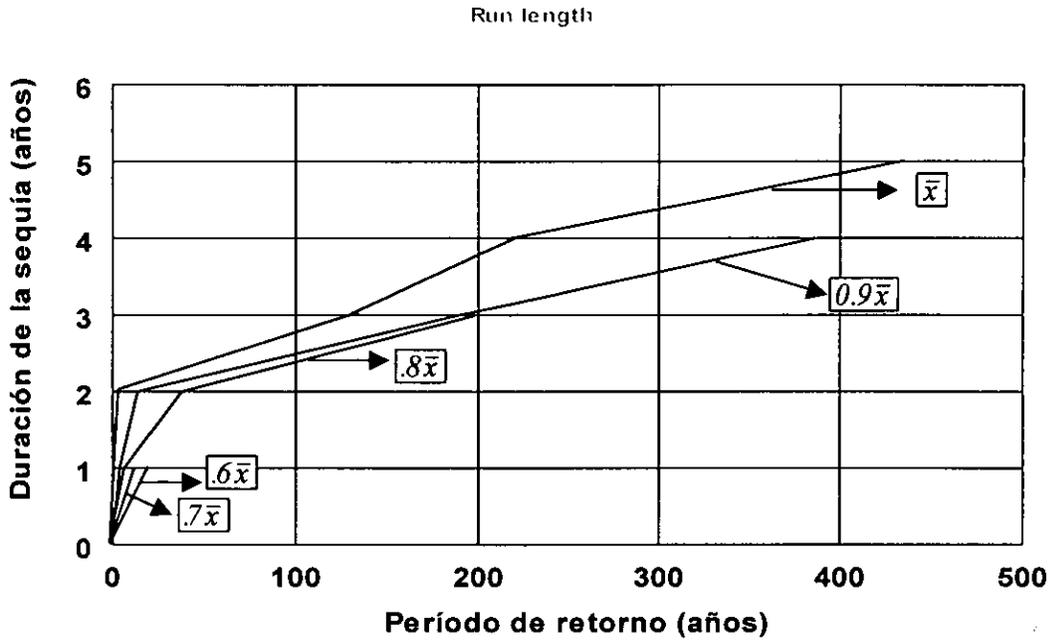


Fig. 20. Resultados de los períodos de retorno asociados a la duración de la sequía para cada nivel de truncación.

Estación No. 7



132

Estación No. 8

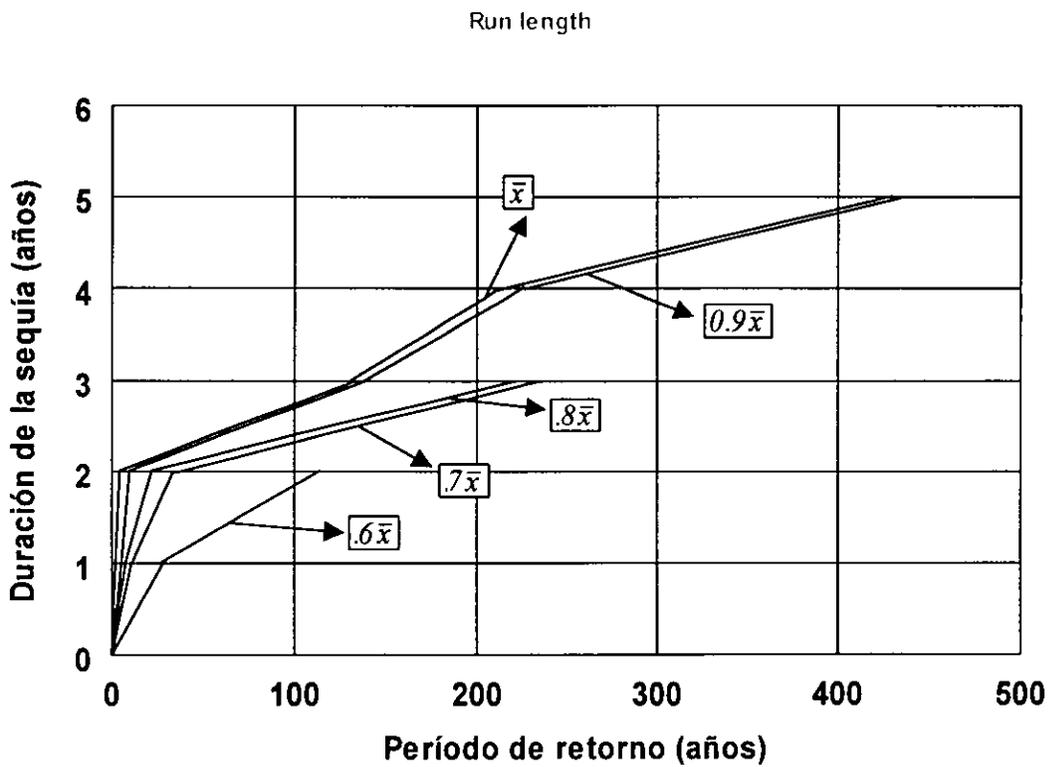
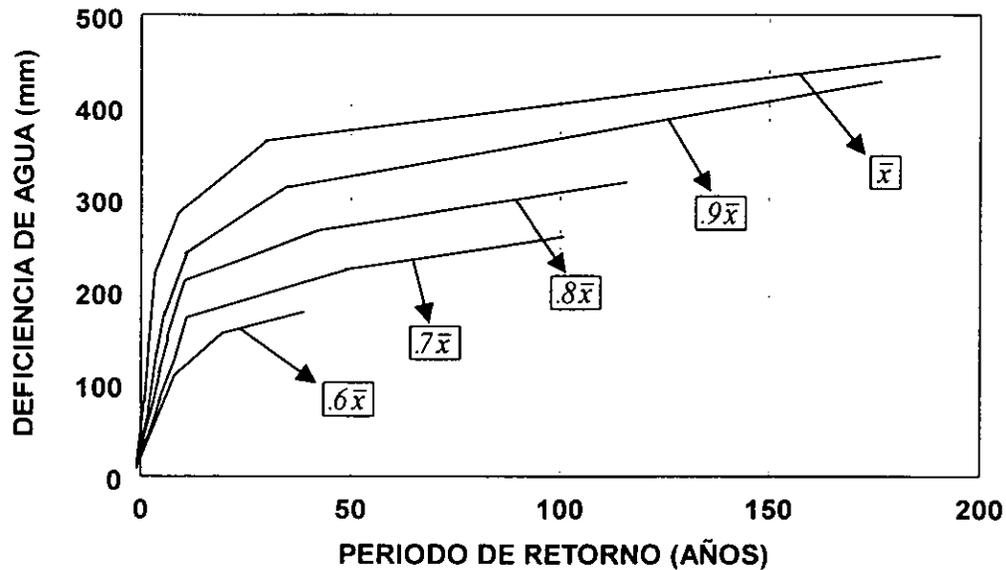


Fig. 21. Resultados de los periodos de retorno asociados a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación.

### Estación No. 1

Run-Sum

133



### Estación No. 2

Run-Sum

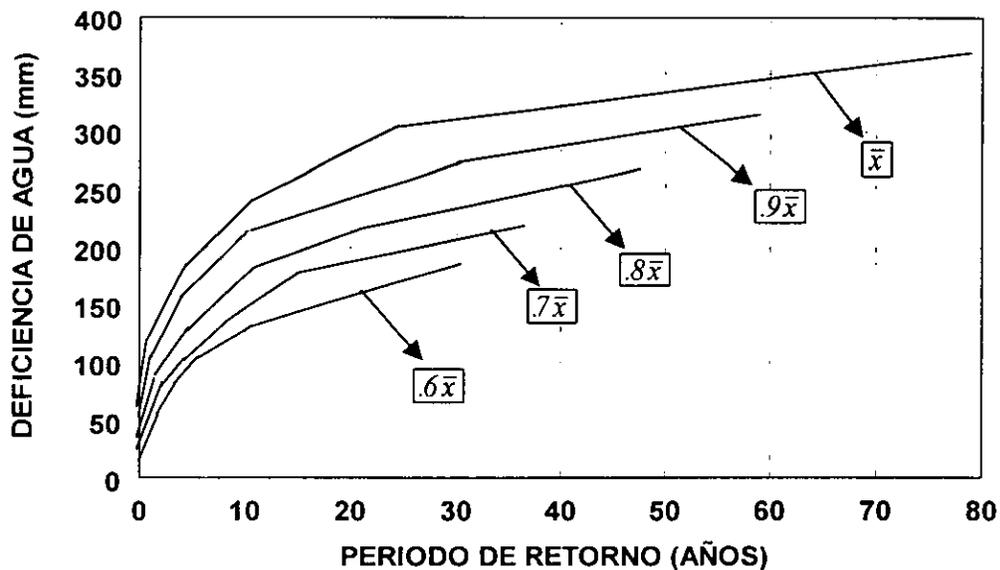
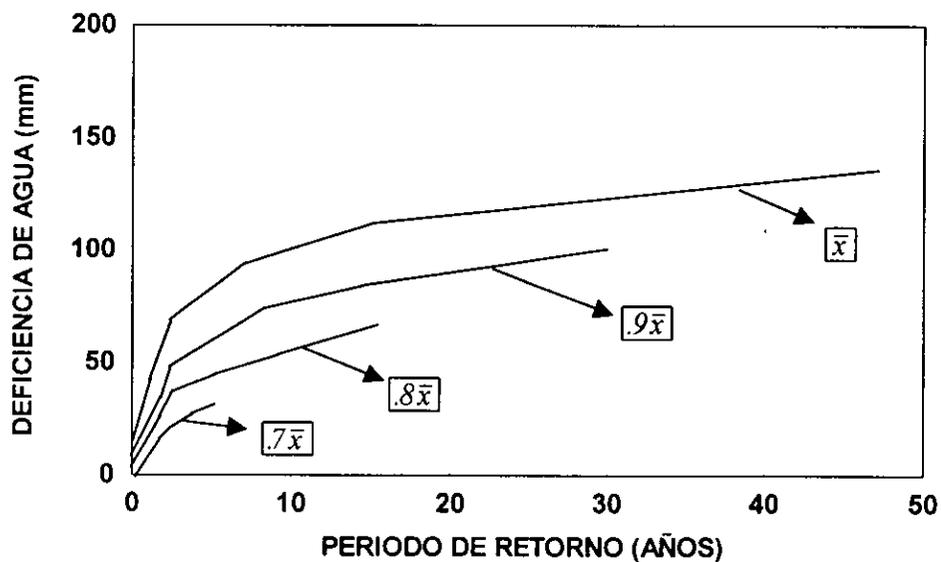


Fig. 21. Resultados de los periodos de retorno asociados a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación.

### Estación No. 3

Run-Sum

134



### Estación No. 4

Run-Sum

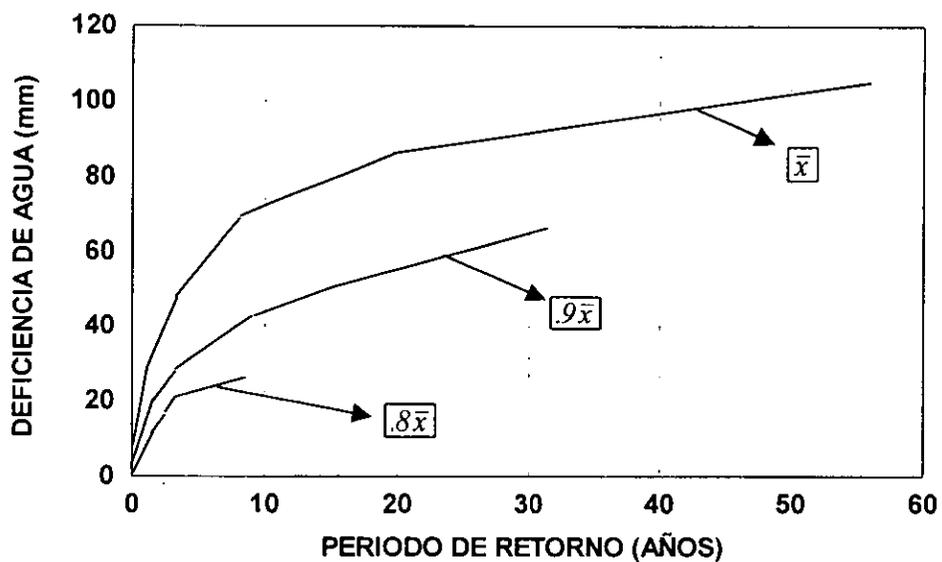
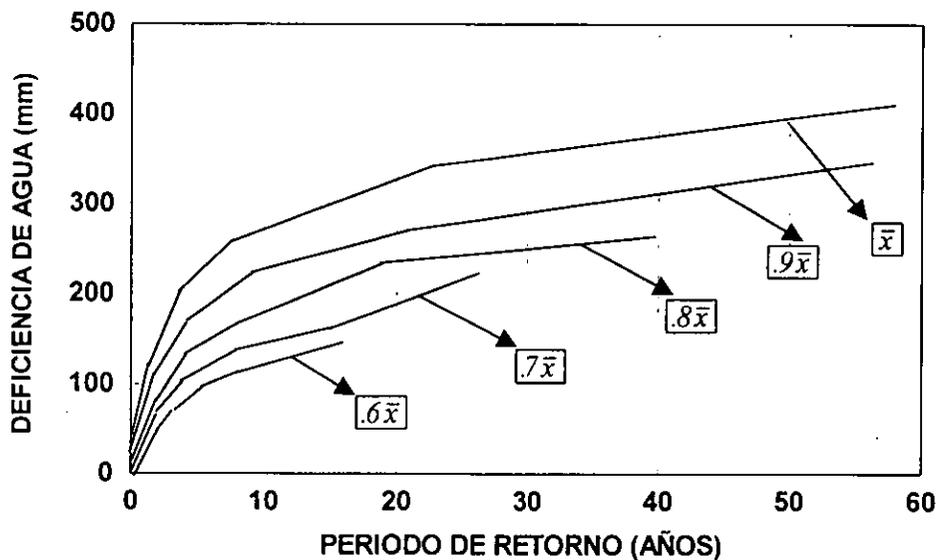


Fig. 21. Resultados de los periodos de retorno asociados a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación.

### Estación No. 5

Run-Sum



### Estación No. 6

Run-Sum

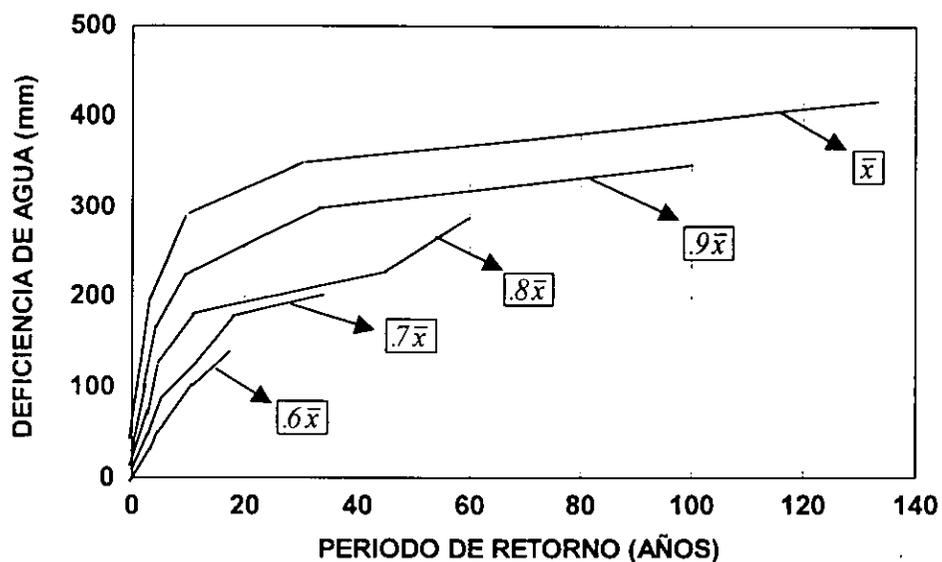


Fig. 21. Resultados de los periodos de retorno asociados a las deficiencias de agua por cada nivel de truncación.

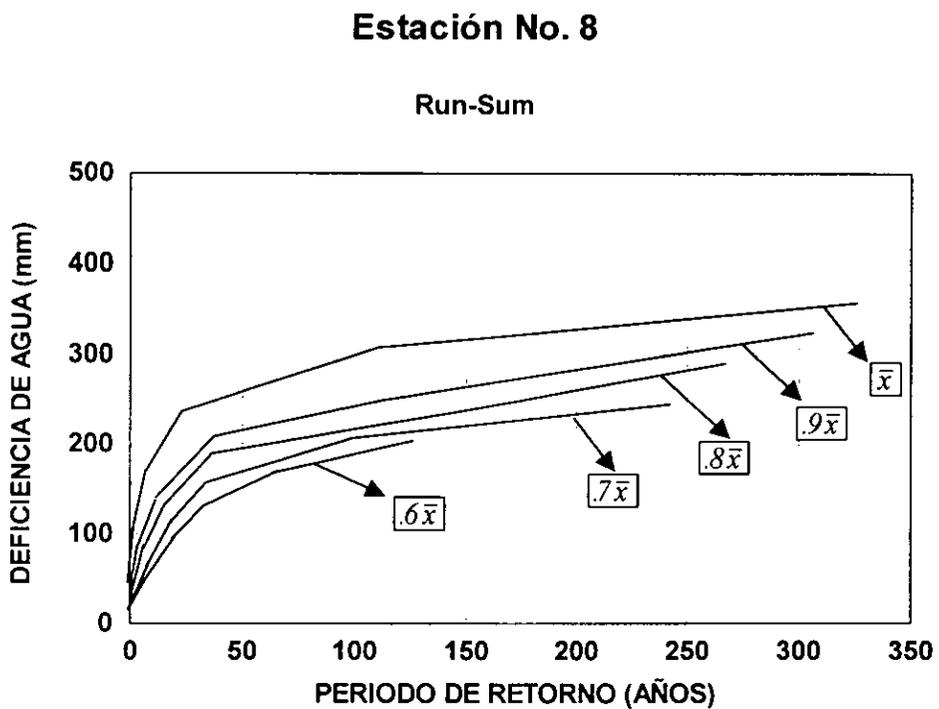
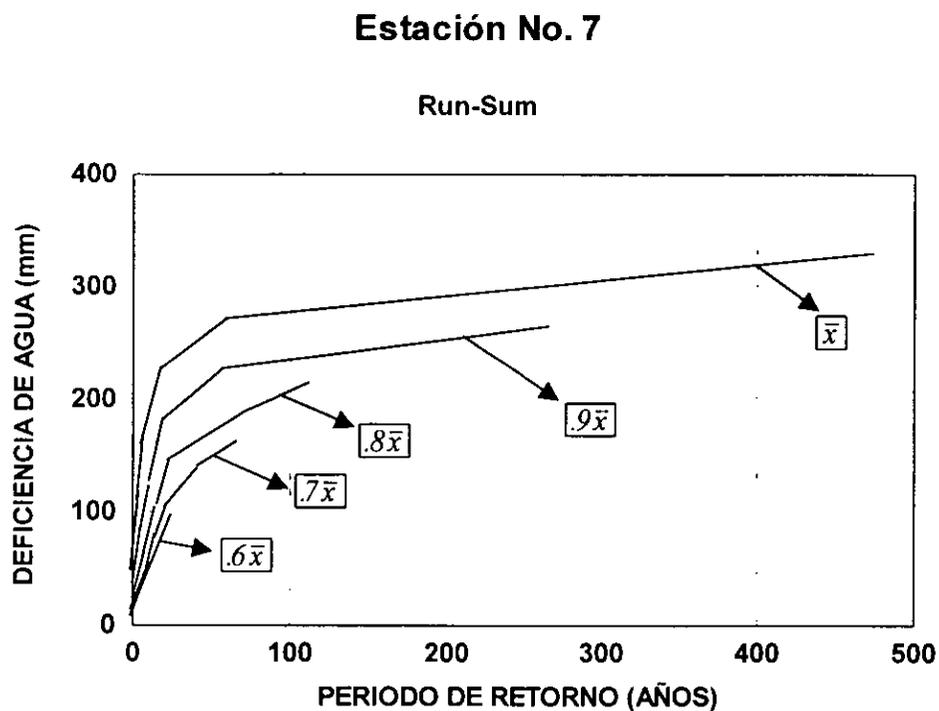
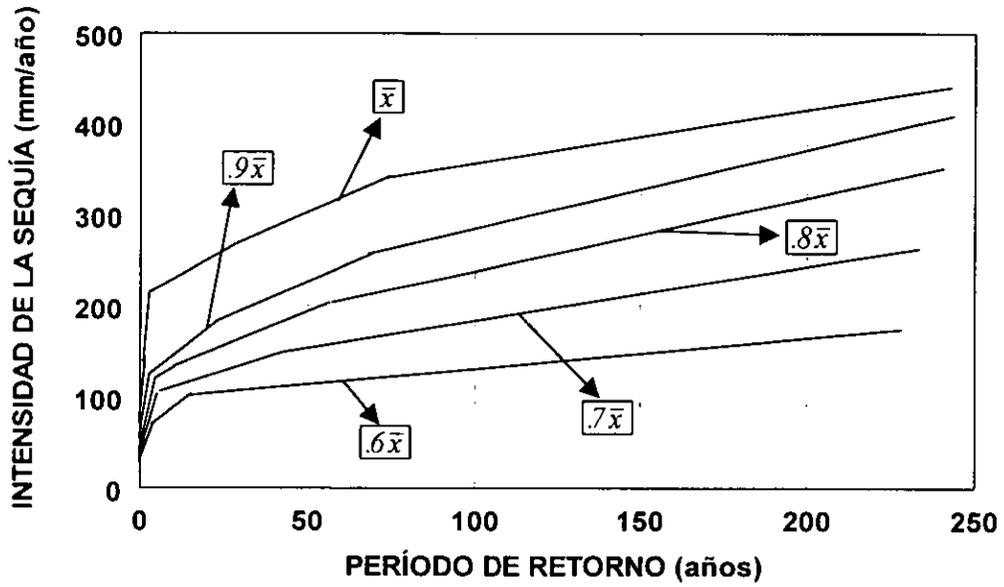


Fig. 22. Resultados de los períodos de retorno asociados con la intensidad de la sequía y con cada nivel de truncación

### Estación No. 1

#### Run-Intensity



### Estación No. 2

#### Run-Intensity

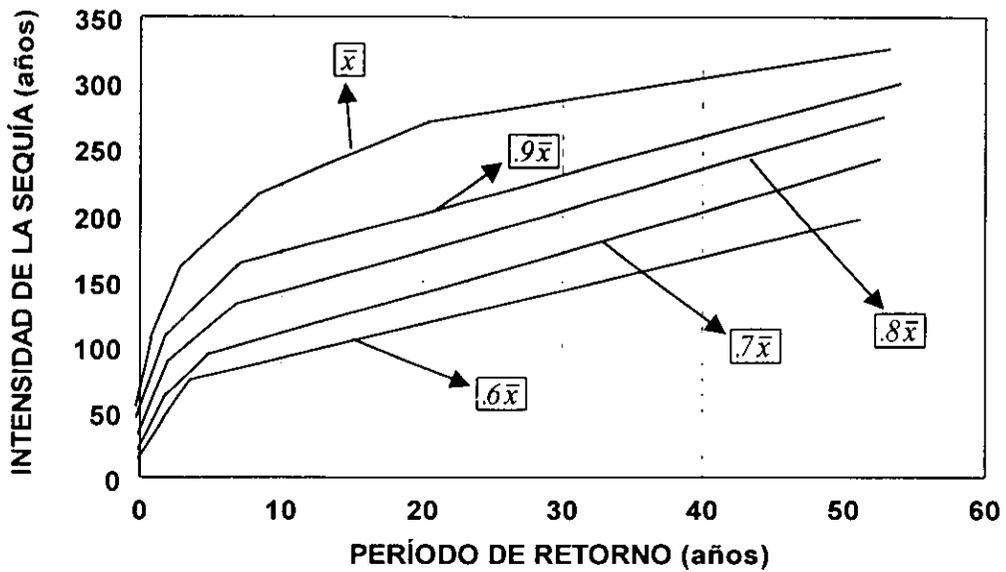
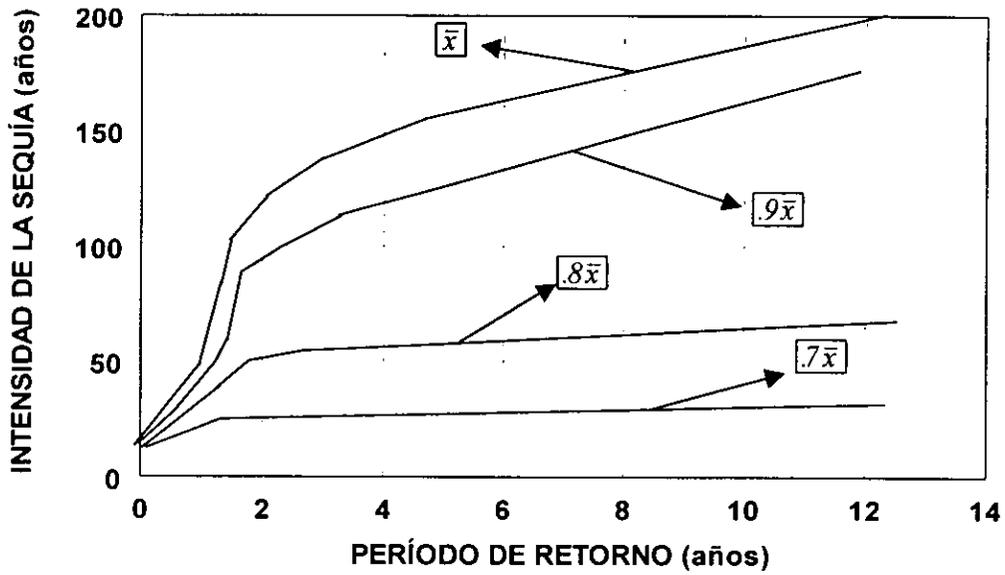


Fig. 22. Resultados de los periodos de retorno asociados con la intensidad de la sequía y con cada nivel de truncación

### Estación No. 3

Run-Intensity



### Estación No. 4

Run-Intensity

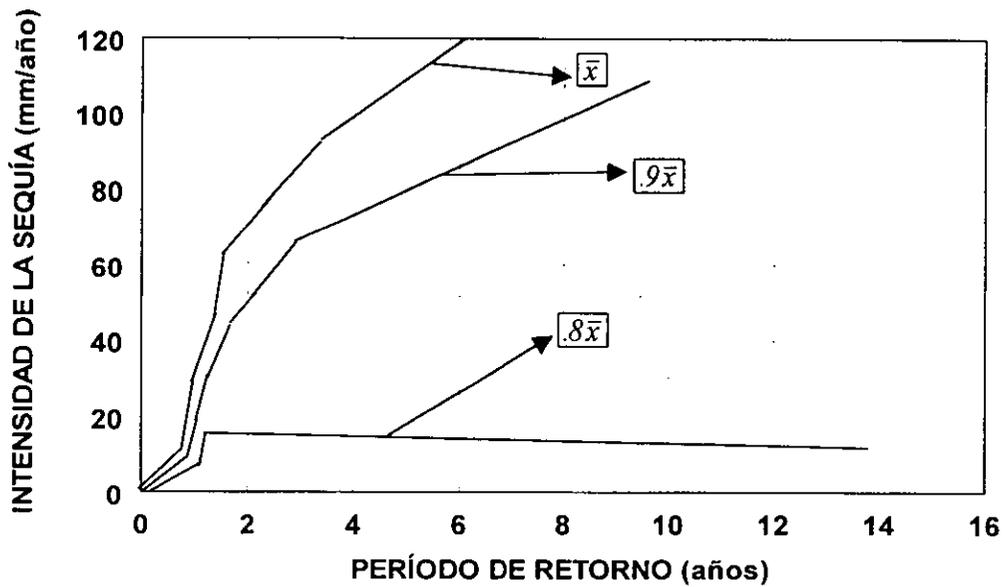
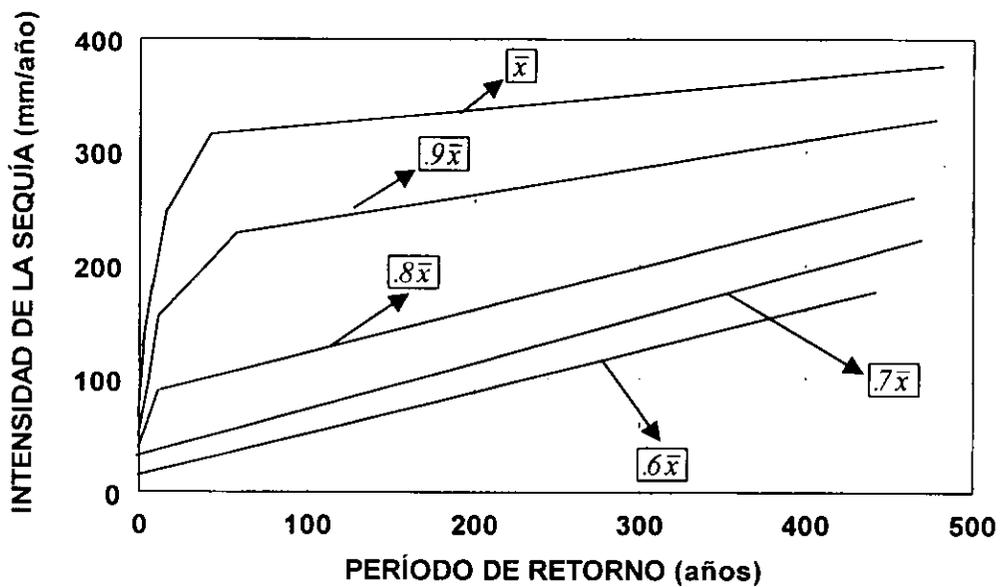


Fig. 22. Resultados de los periodos de retorno asociados con la intensidad de la sequía y con cada nivel de truncación

### Estación No. 5

#### Run-Intensity



### Estación No. 6

#### Run-Intensity

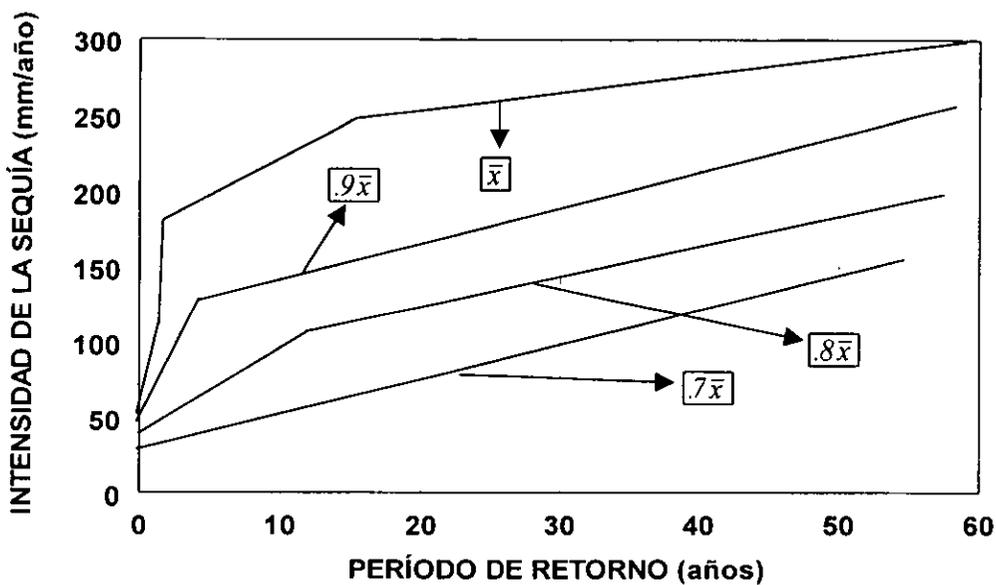
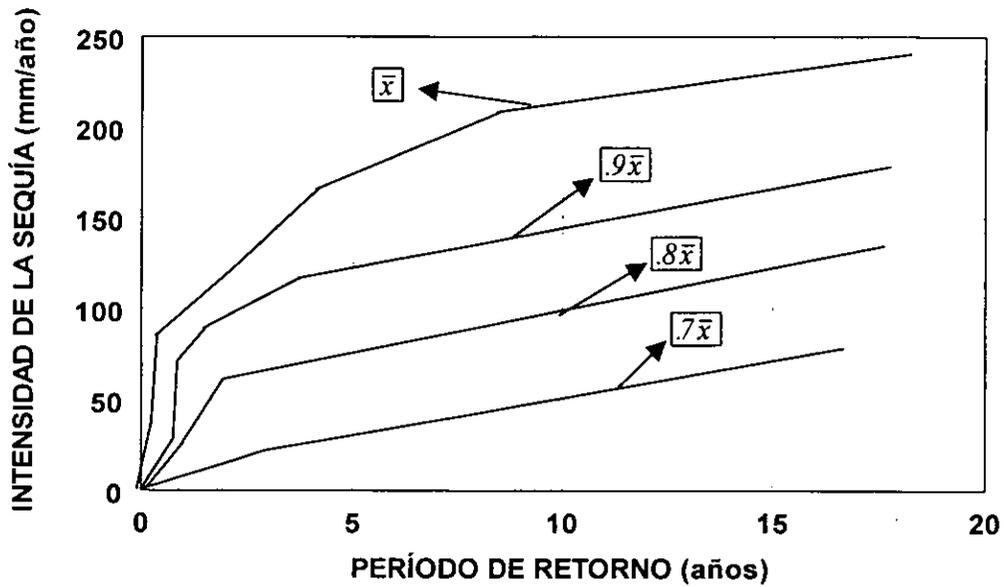


Fig. 22. Resultados de los períodos de retorno asociados con la intensidad de la sequía y con cada nivel de truncación

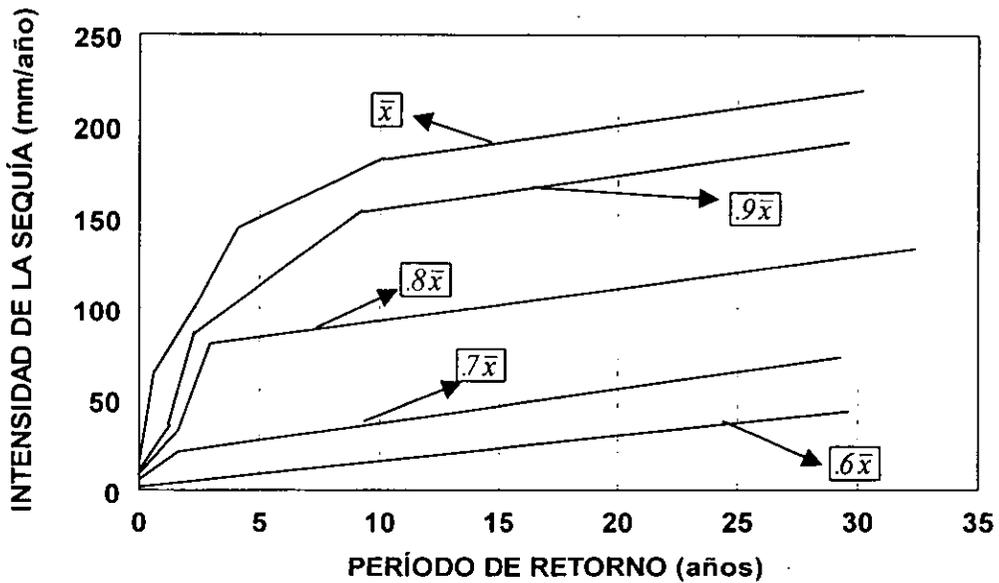
### Estación No. 7

#### Run-Intensity



### Estación No. 8

#### Run-Intensity



25, 26 y 27 presentan las regiones con probabilidad de sequías de un año cuando el nivel de truncamiento son el 90%, 80%, 70% y 60% respectivamente.

La figura 28 presenta las regiones con valores de la deficiencia de agua de un año, cuando el nivel de truncamiento es la media. Asimismo, las figuras 29, 30, 31 y 32 presentan las regiones con deficiencia de agua en milímetros de un año de sequía, cuando el nivel de truncamiento son el 90%, 80%, 70% y 60% respectivamente.

La figura 33 señala las regiones con valores de los períodos de retorno que están asociados con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es la media. De la misma manera, las figuras 34, 35, 36 y 37 presentan las regiones con los períodos de retorno para las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento son el 90%, 80%, 70% y 60% respectivamente.

La figura 38 señala las regiones con valores de los períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua cuando el nivel de truncamiento es la media. Asimismo, las figuras 39, 40, 41 y 42 presentan las regiones con los valores de los períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua para niveles de truncamiento del 90%, 80%, 70% y 60% respectivamente.

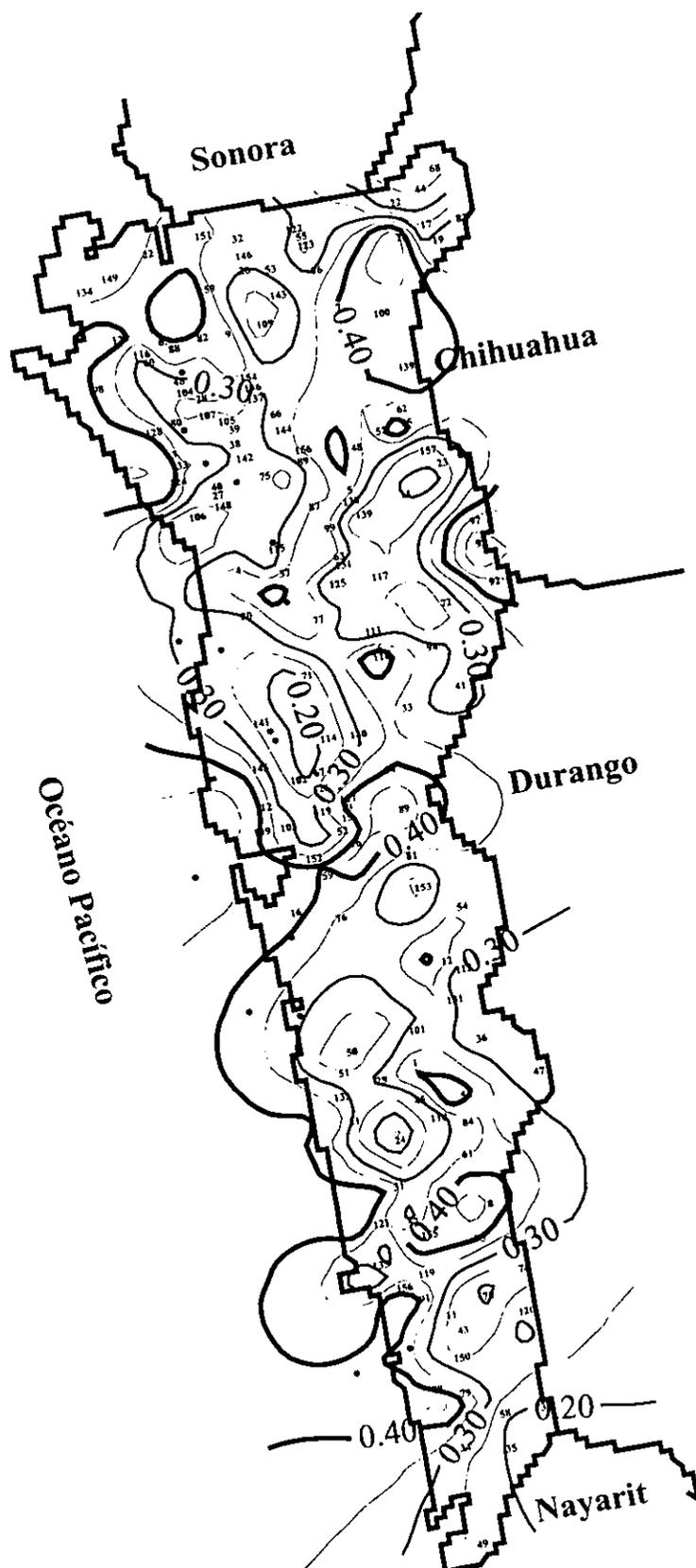


Fig. 23. Valores de la probabilidad de ocurrencias de sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es la media

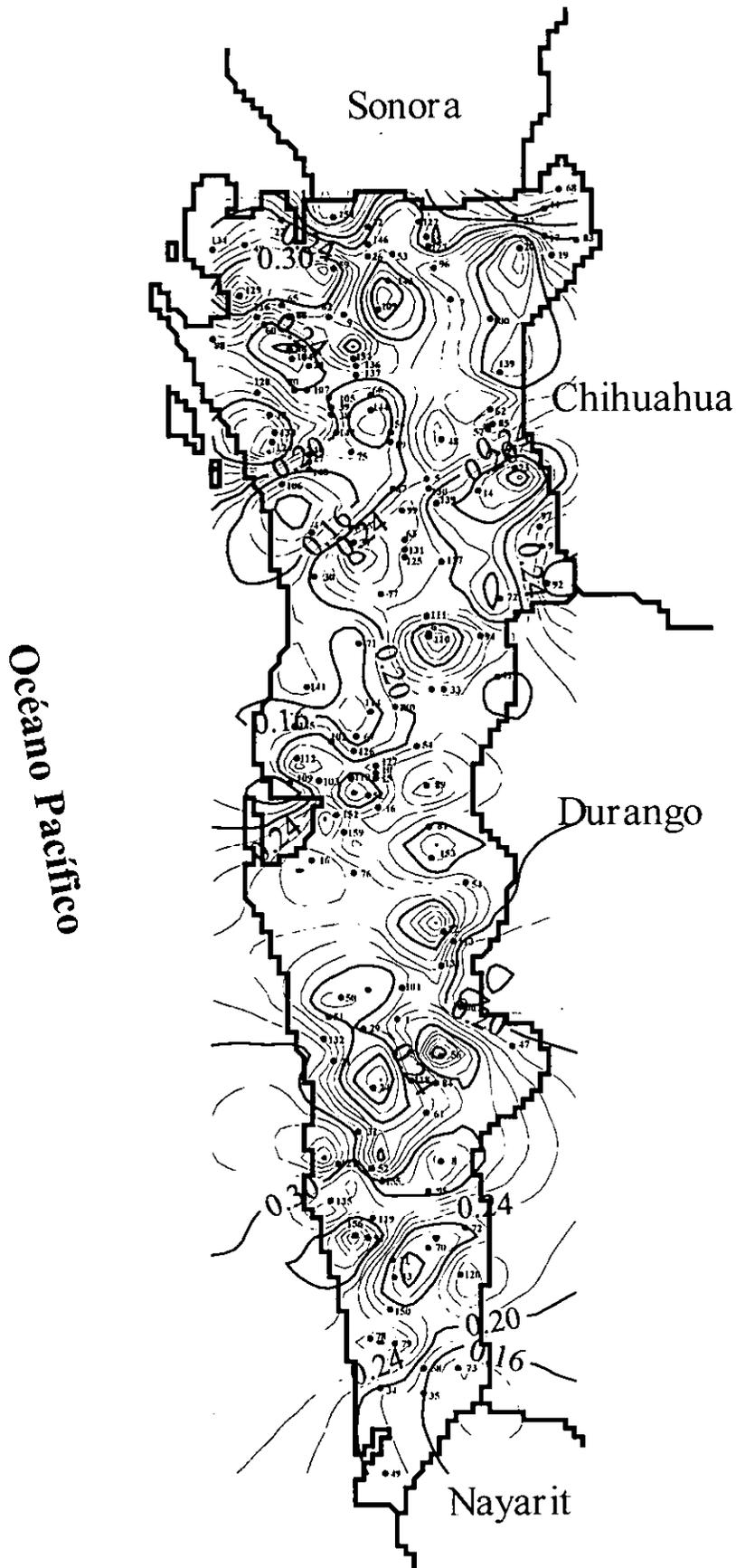


Fig. 24. Probabilidades asociadas con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media

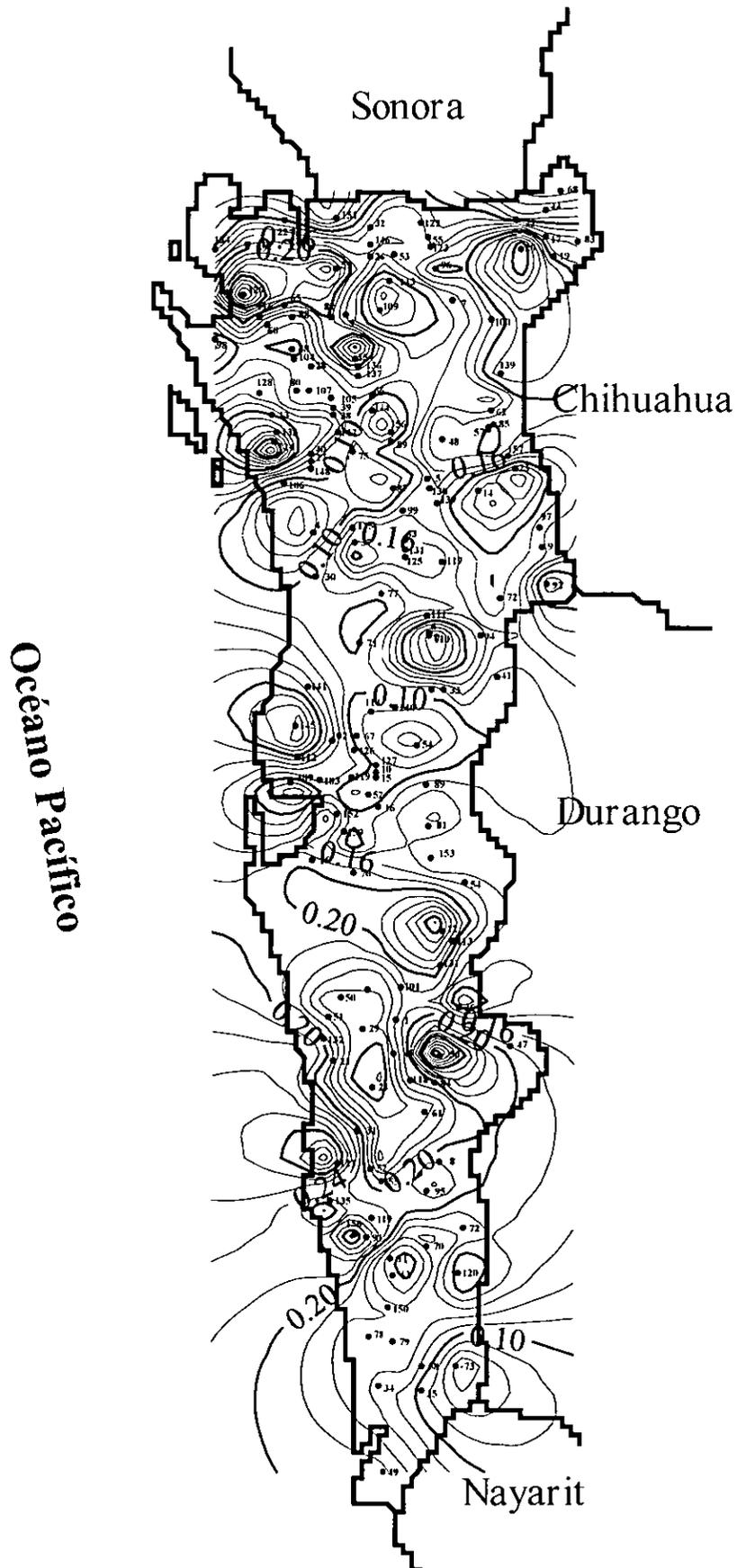


Fig. 25. Probabilidades asociadas con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media

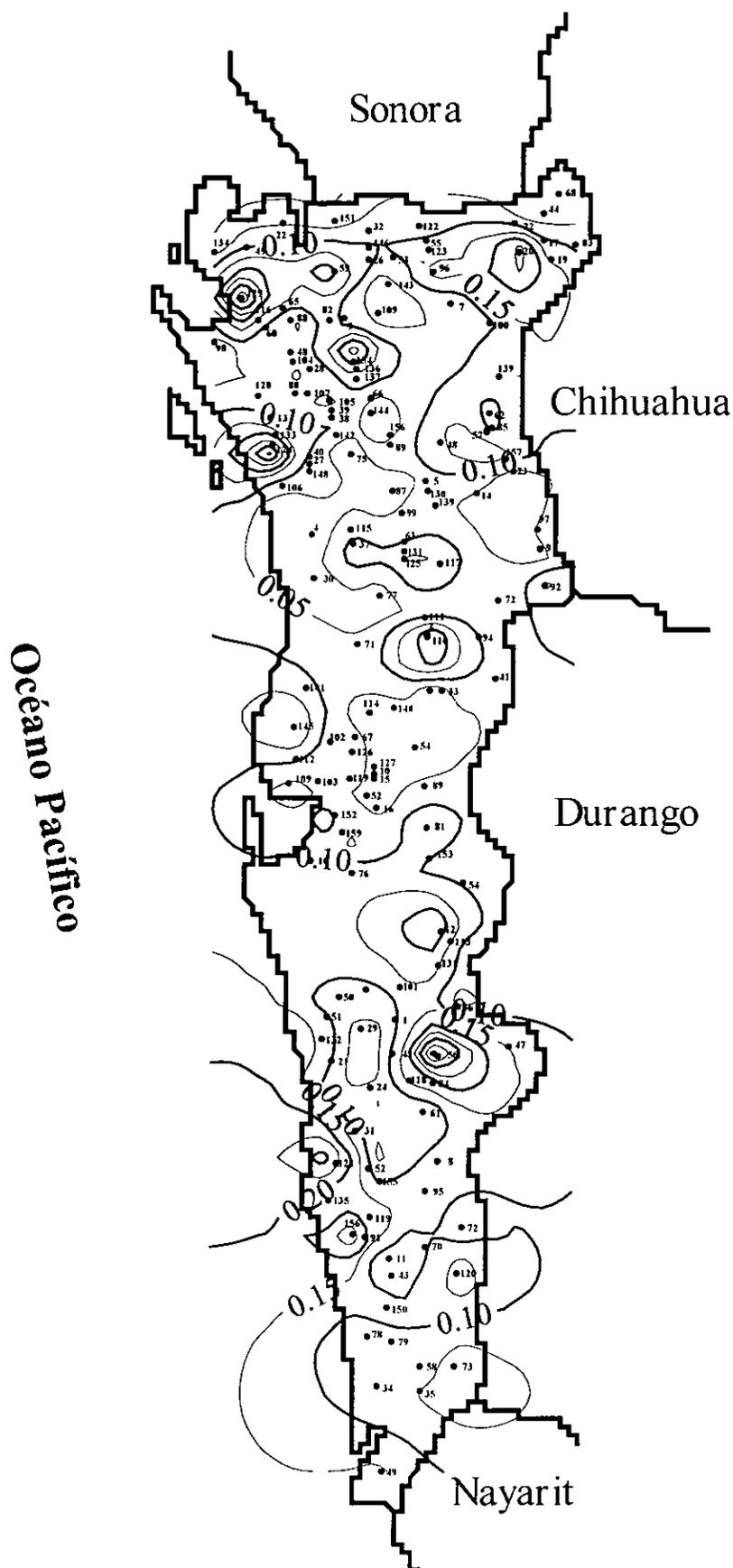


Fig. 26. Probabilidades asociadas con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media.

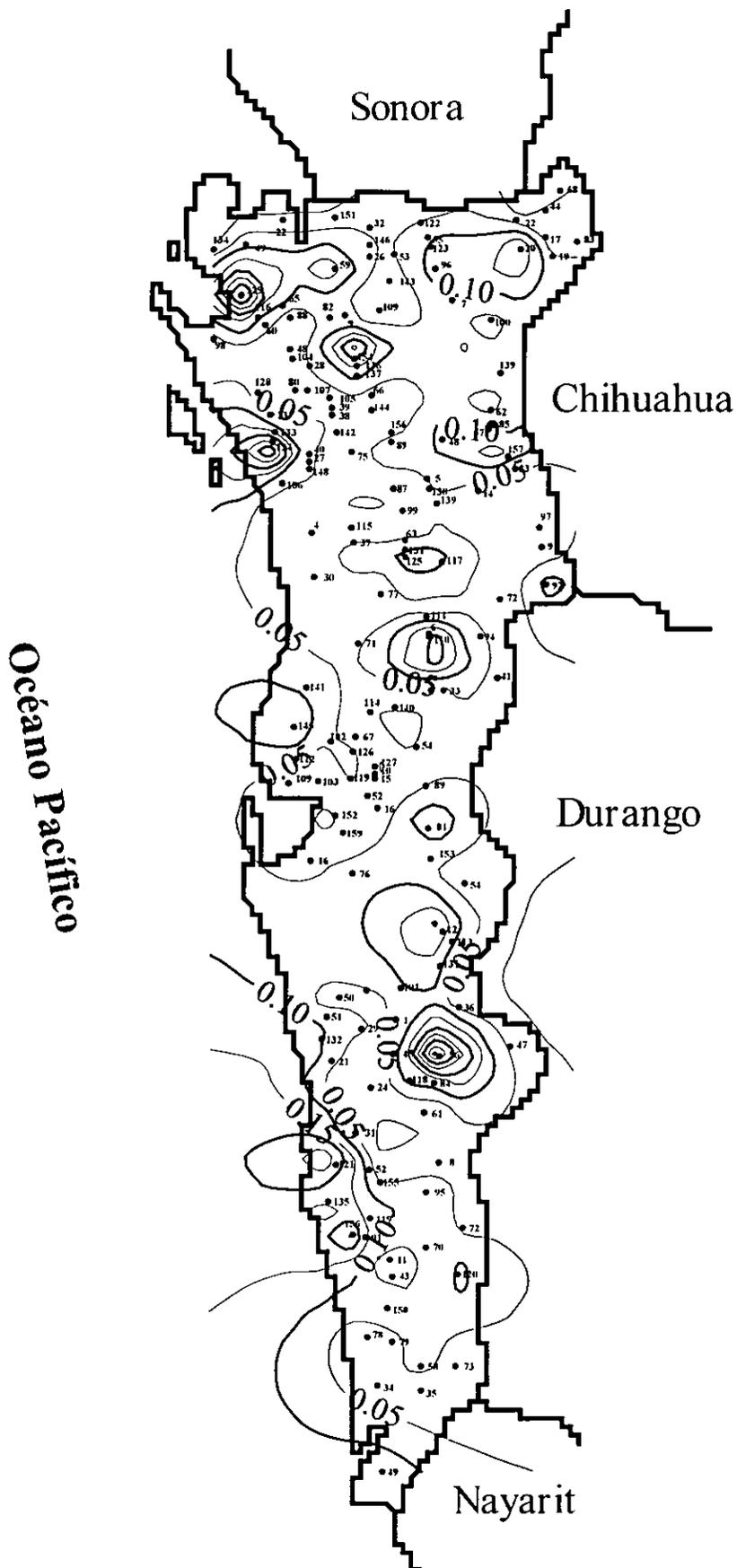


Fig. 27. Probabilidades asociadas con las sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media

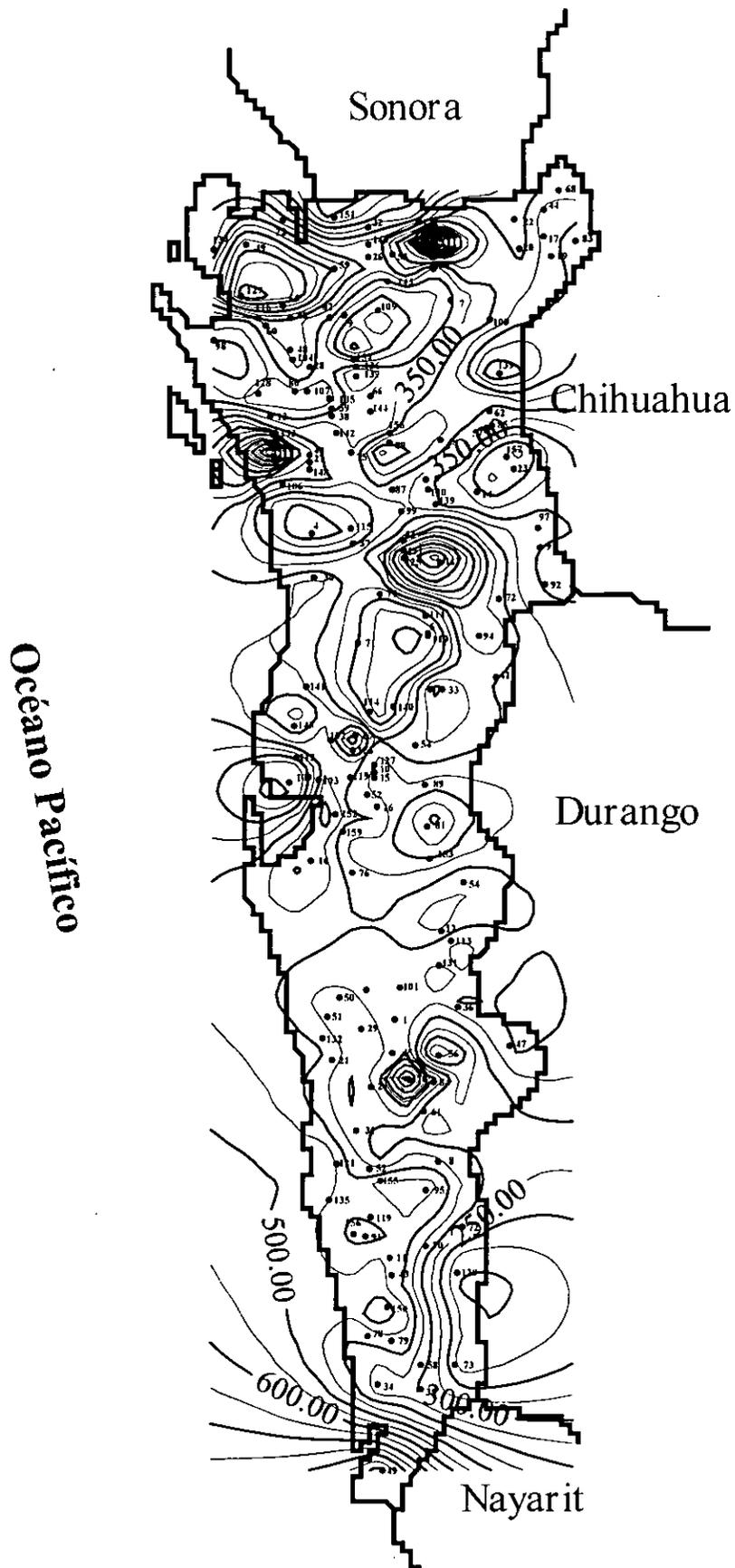


Fig. 28. Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año cuando el nivel de truncamiento es la media

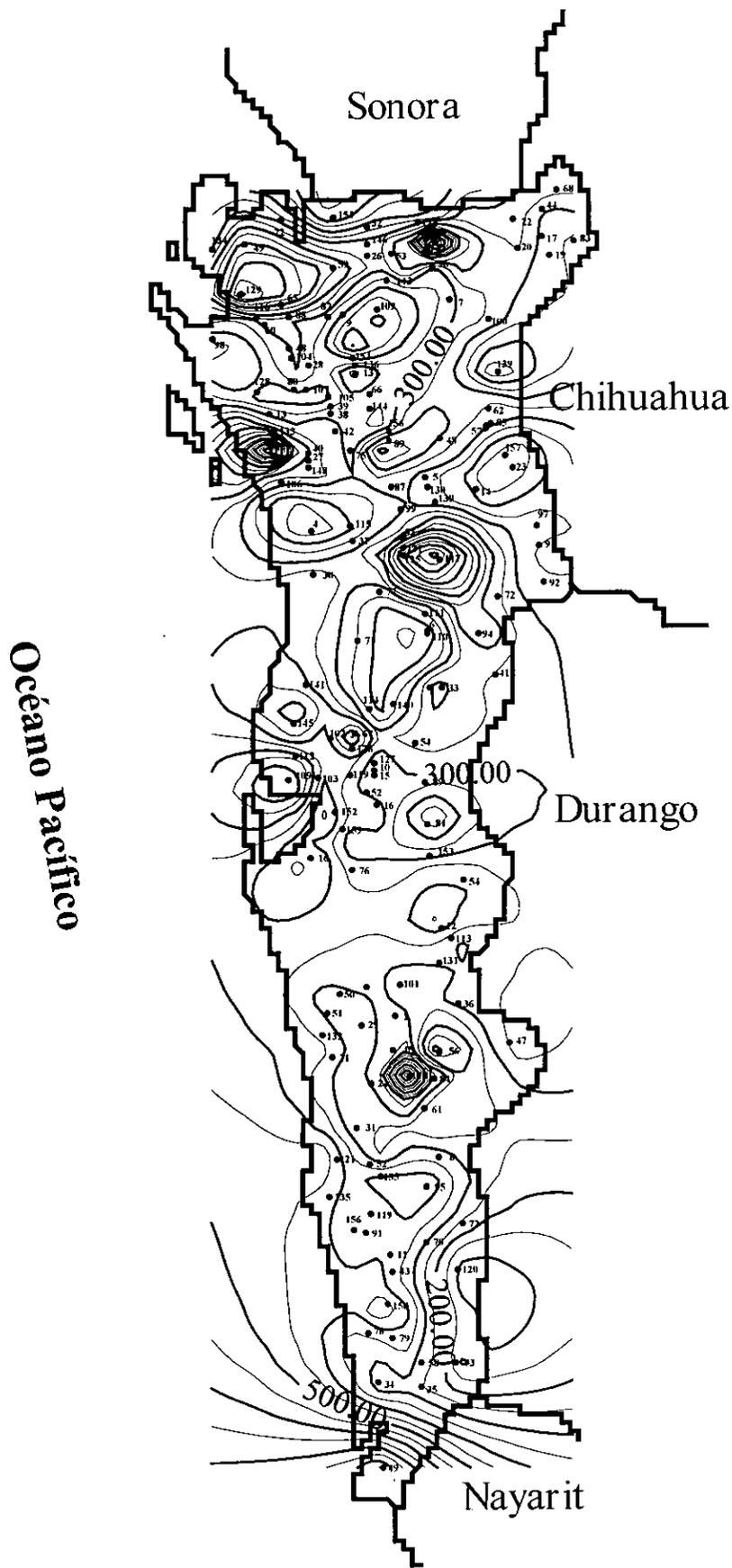


Fig. 29. Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media

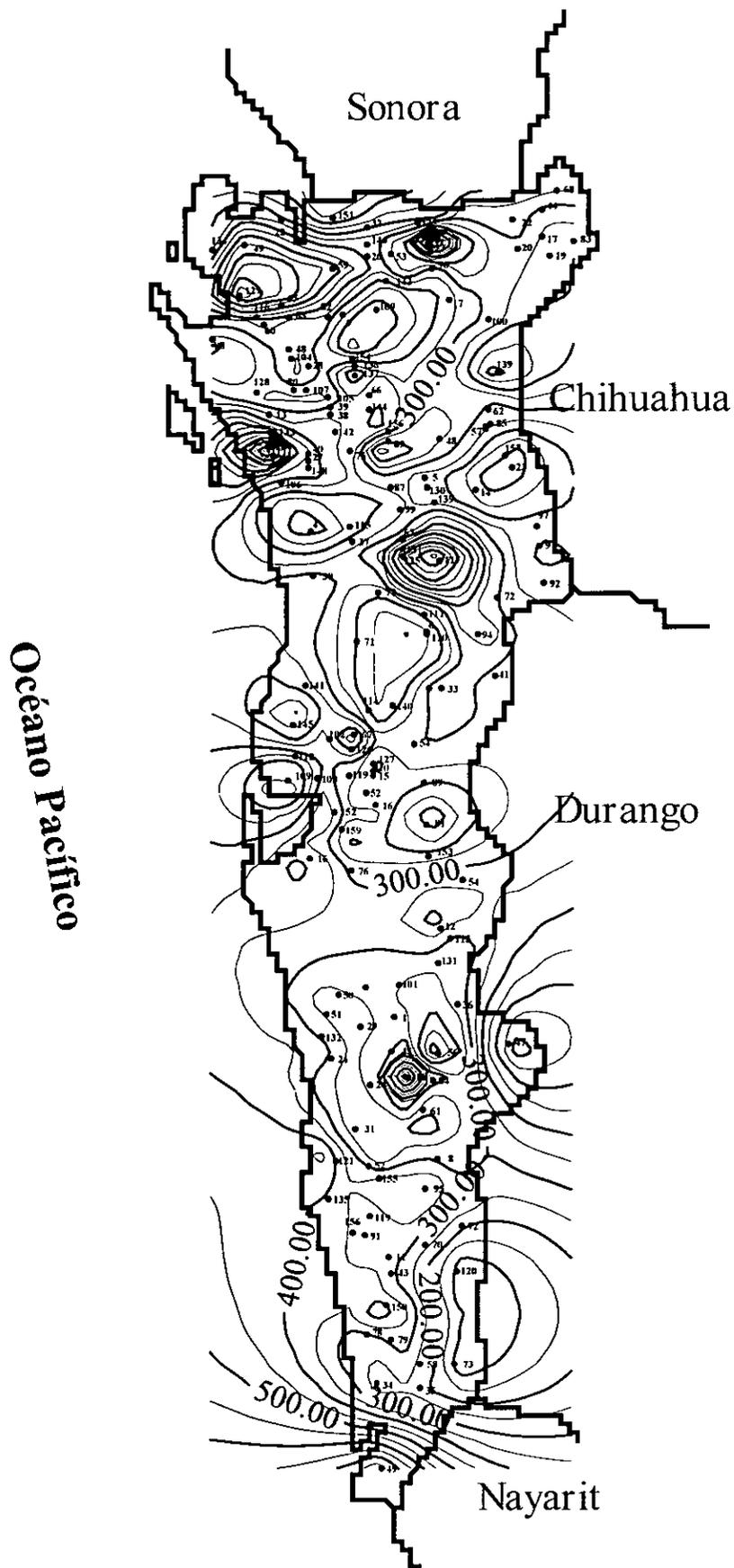


Fig. 30. Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media

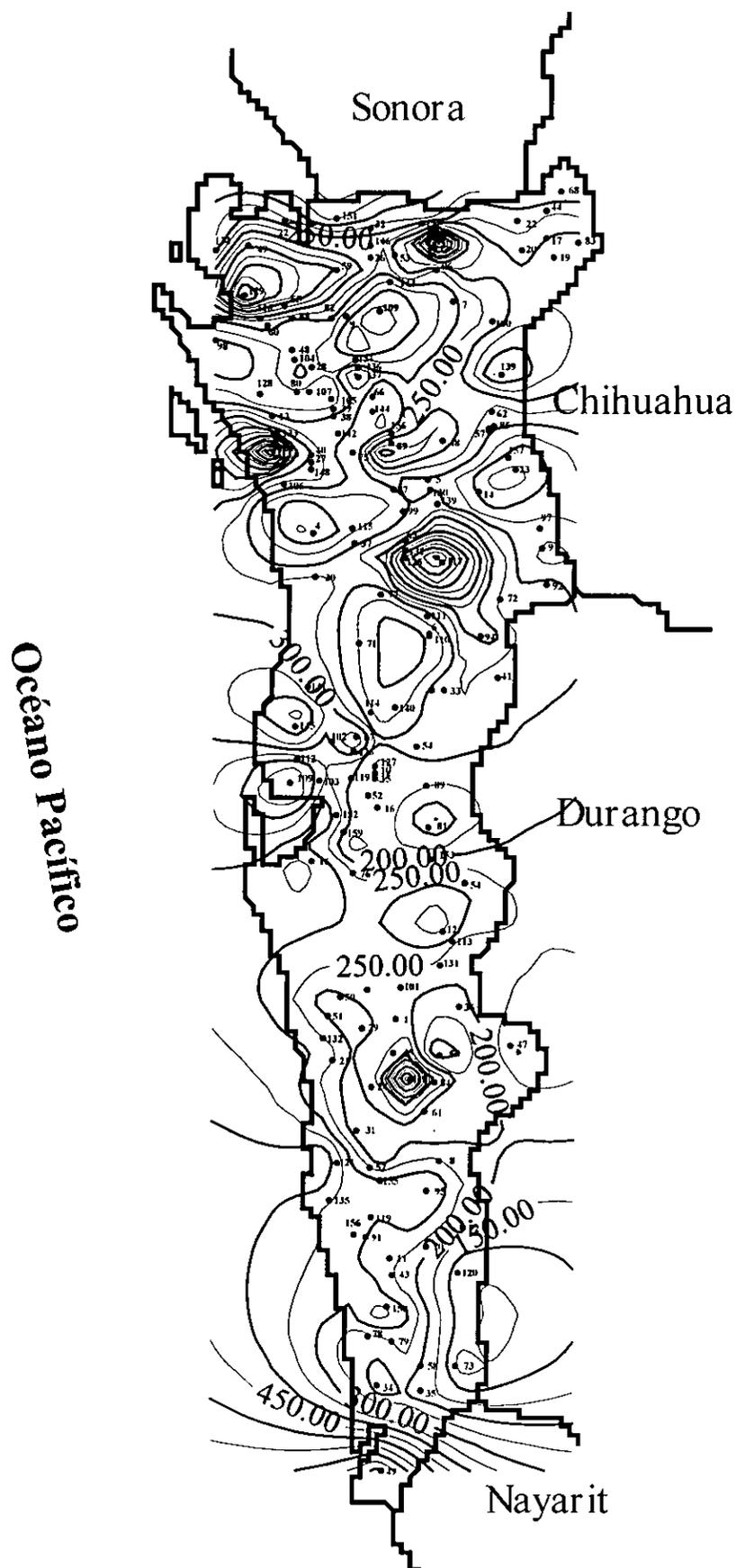


Fig. 31. Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media

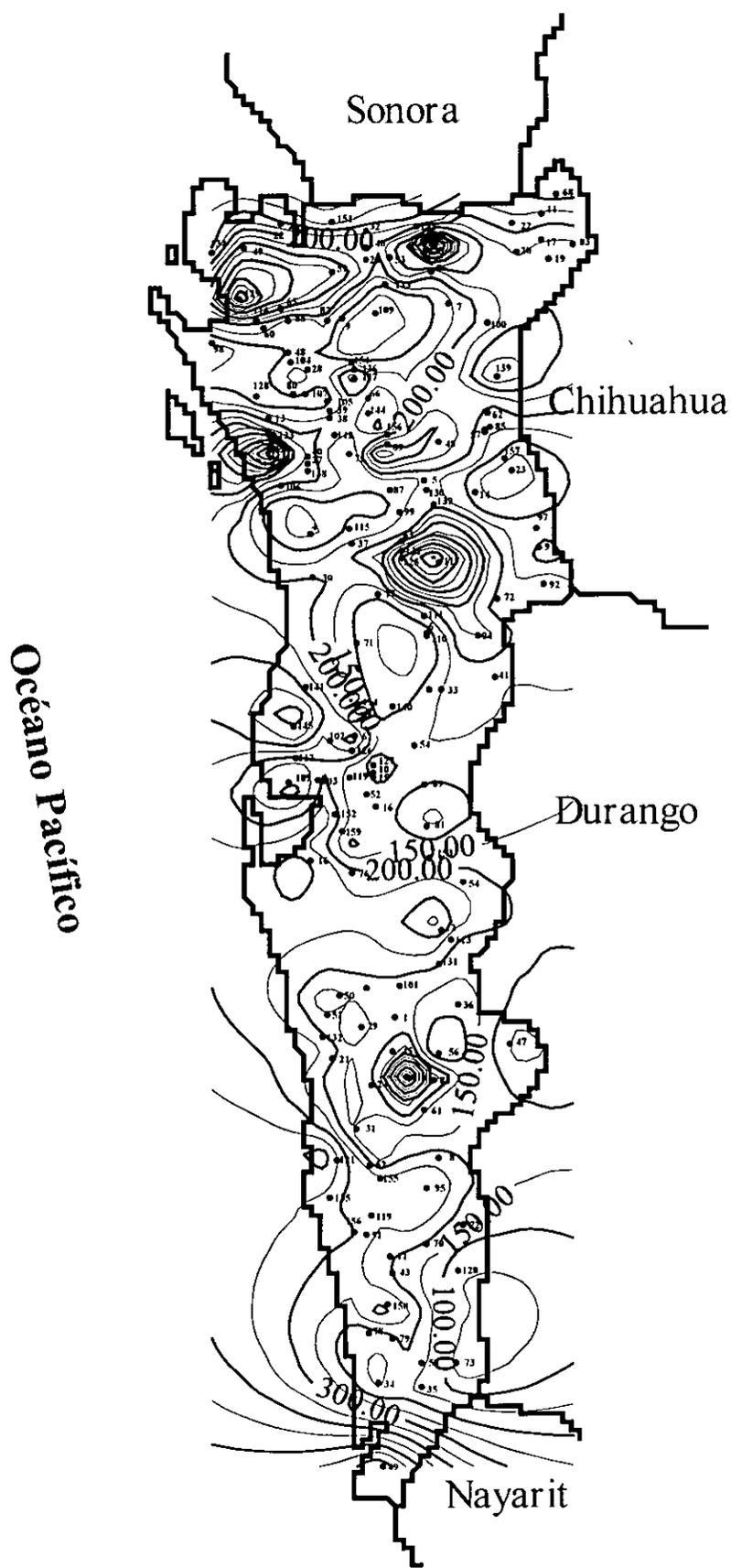


Fig. 32. Deficiencia máxima de agua en milímetros para sequías de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media

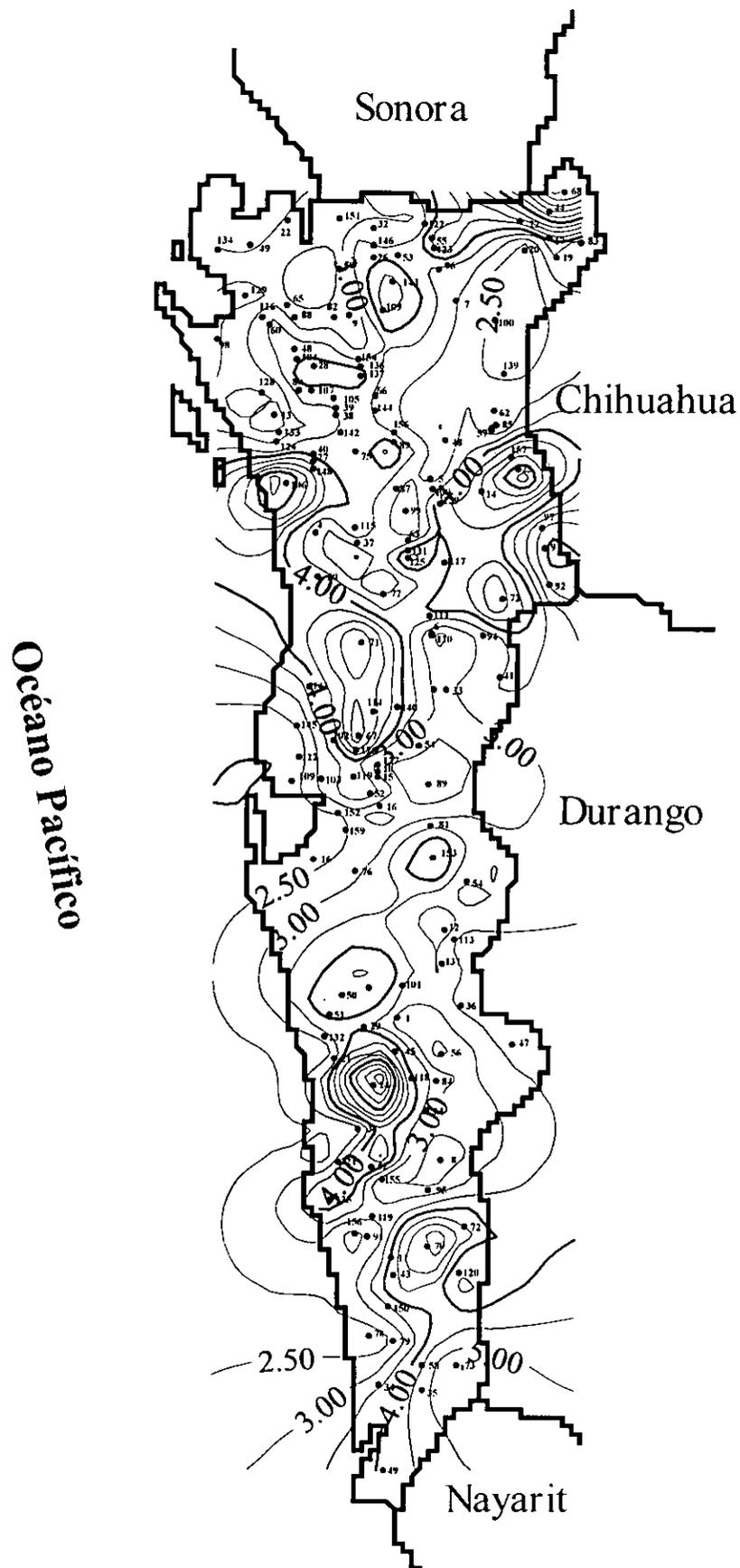


Fig. 33. Períodos de retorno asociados con la sequía de un año cuando el nivel de truncamiento es la media muestral

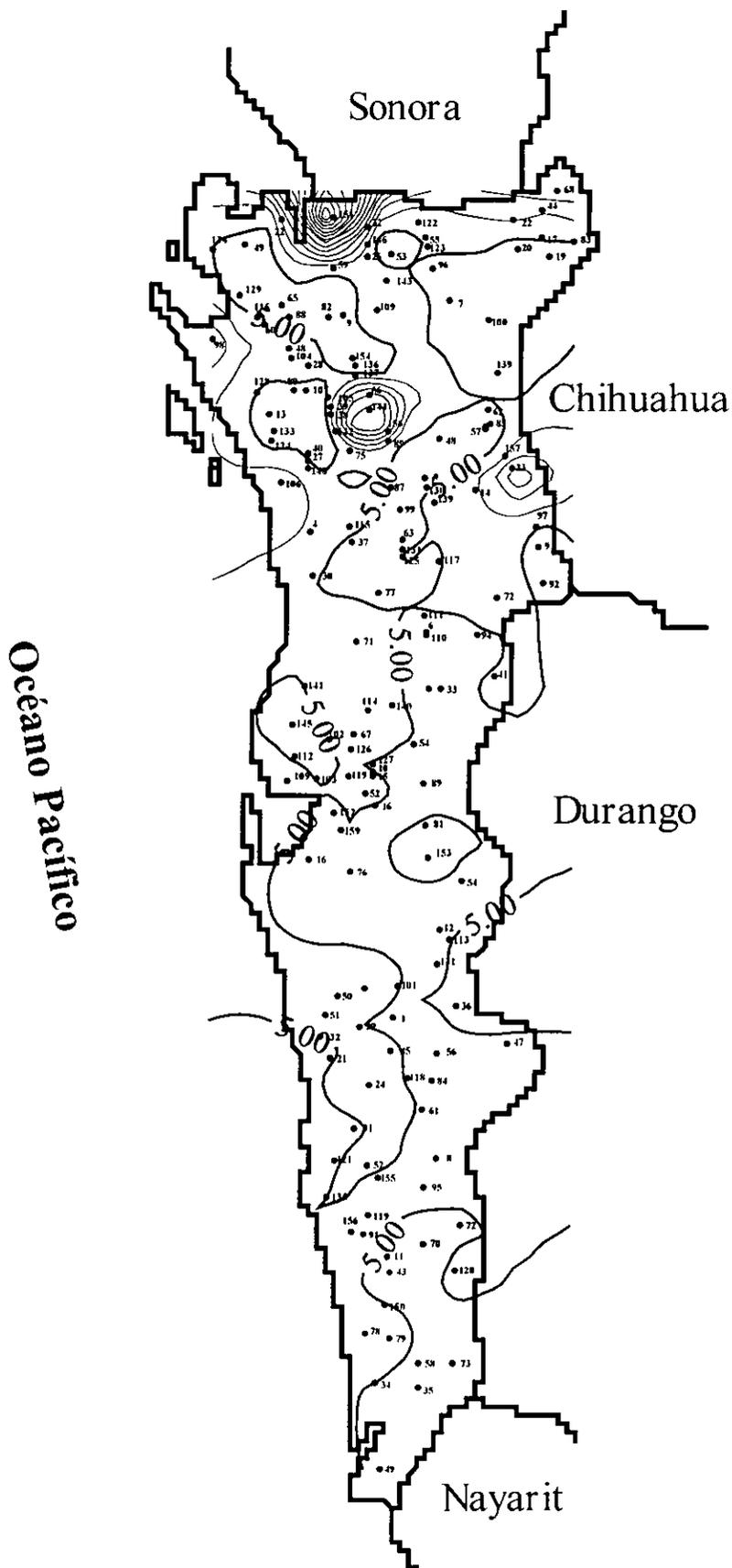


Fig. 34. Períodos de retorno asociados con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media

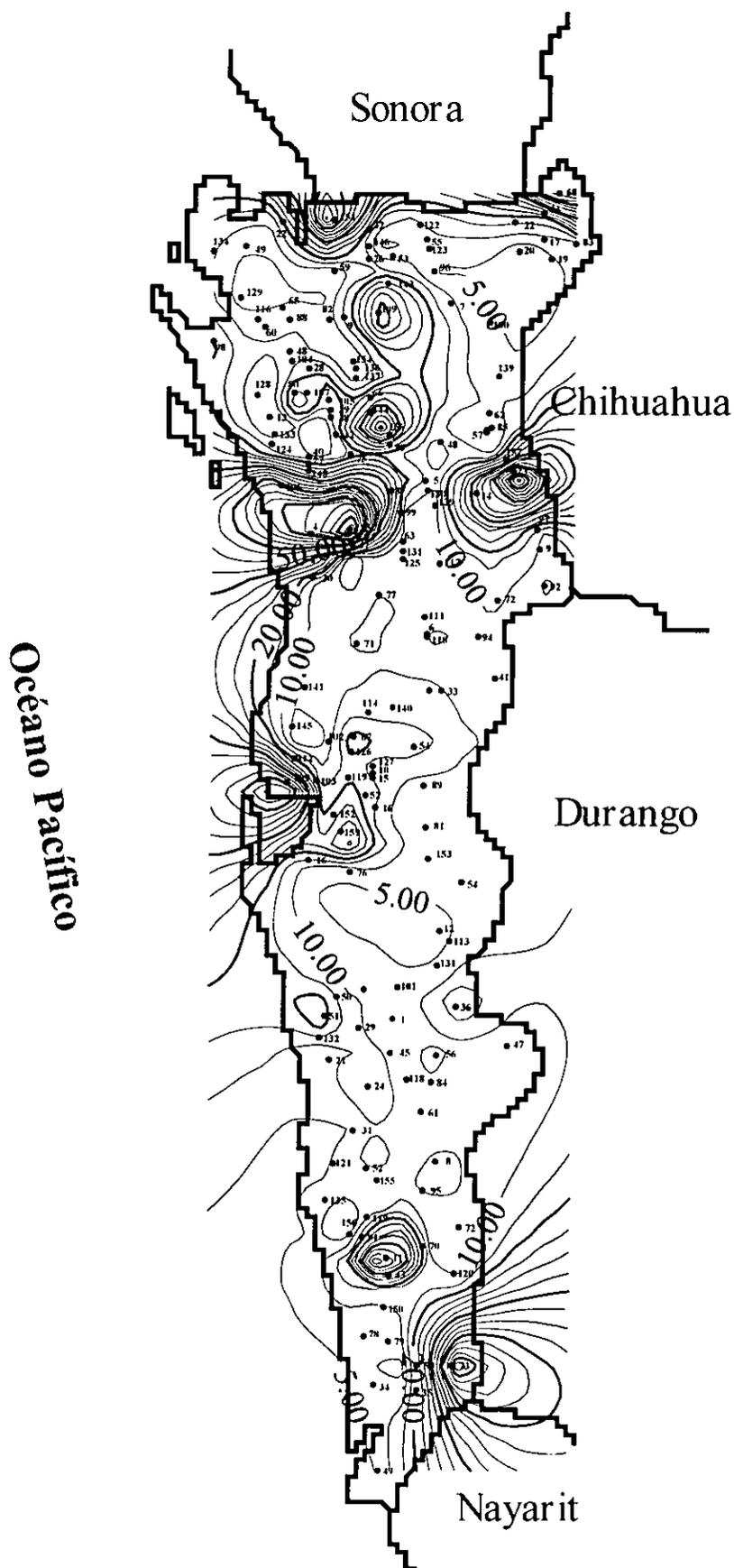


Fig. 35. Períodos de retorno asociados con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media

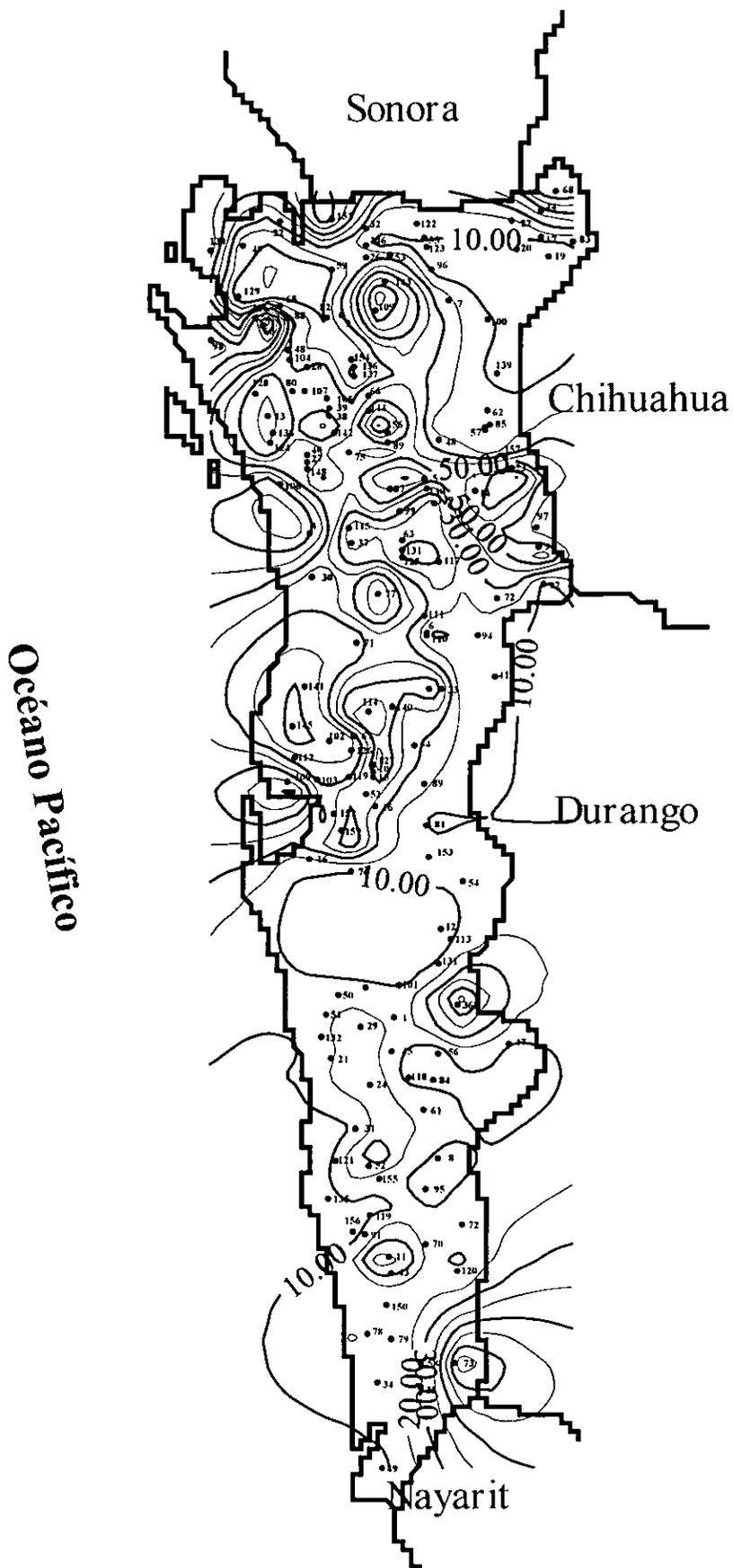


Fig. 36. Períodos de retorno asociados con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media

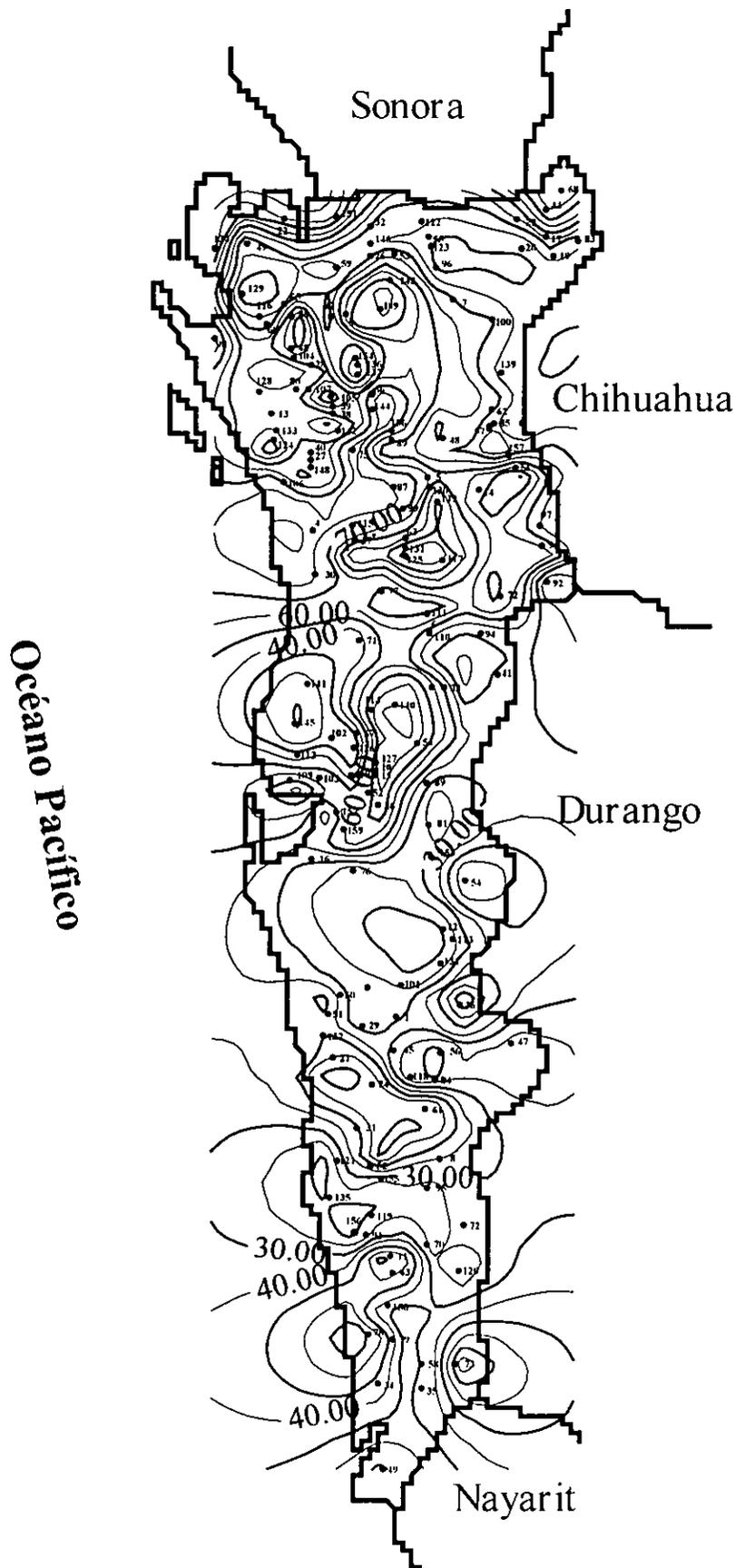


Fig. 37. Períodos de retorno asociados con la sequía de un año, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media

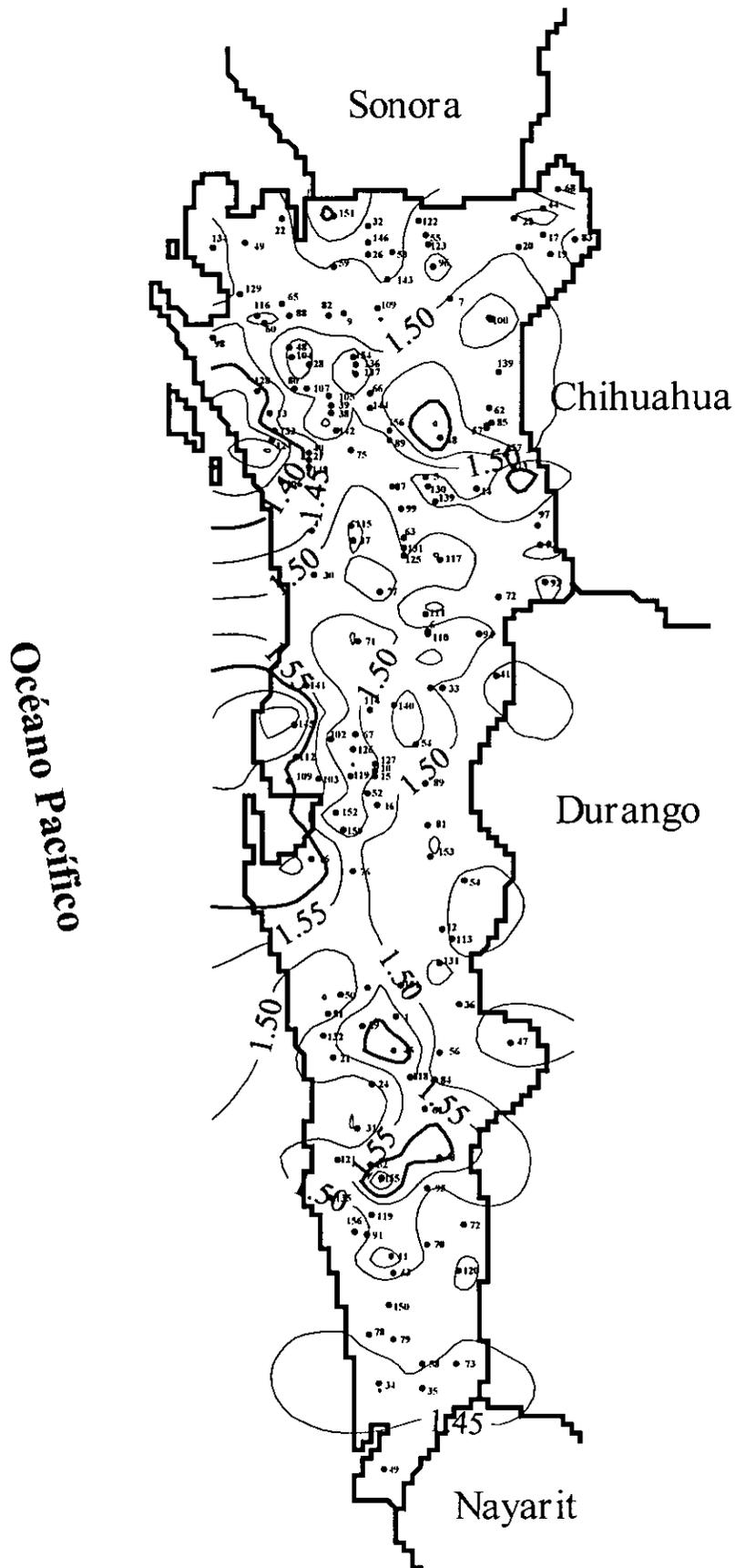


Fig. 38. Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es la media muestral

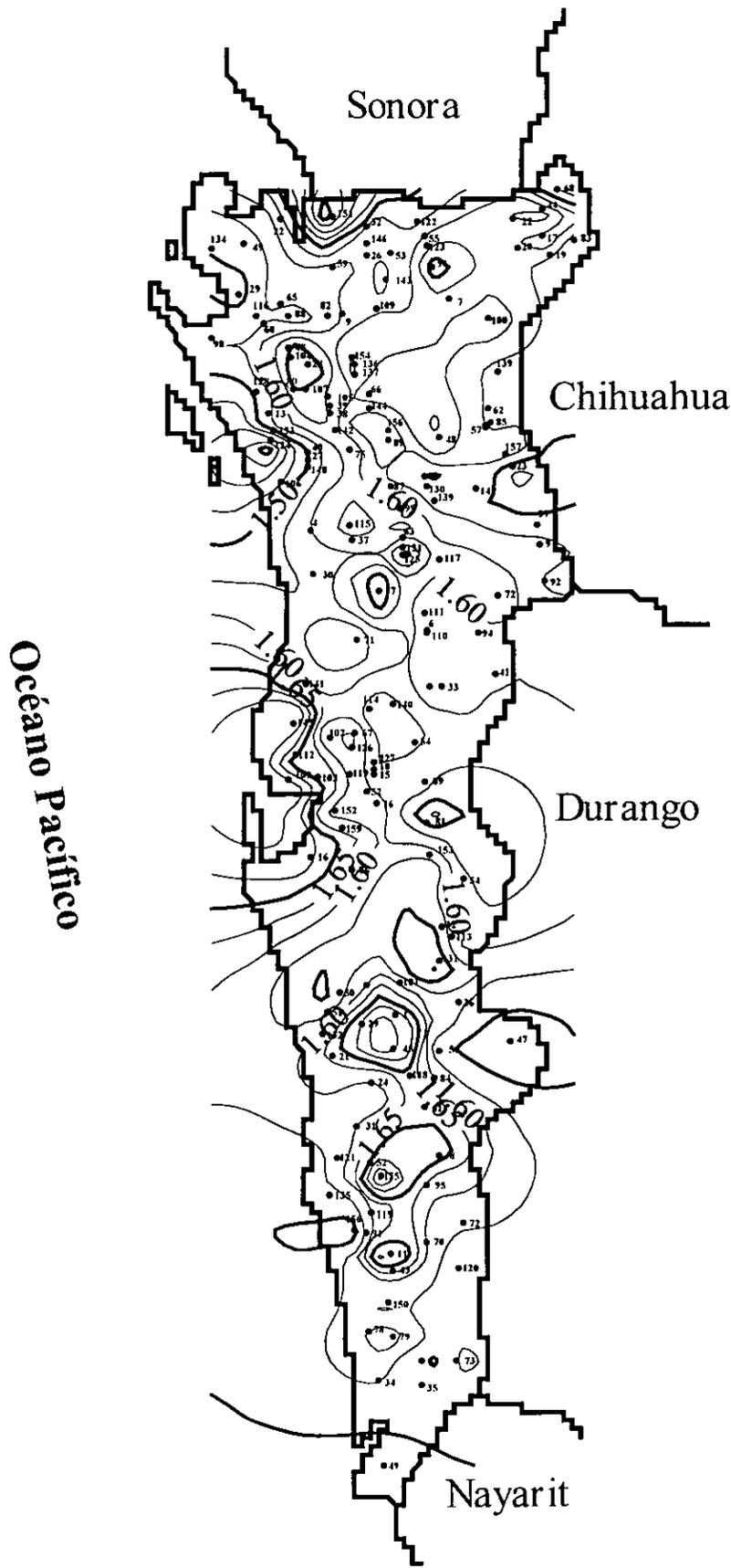


Fig. 39. Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 90% de la media

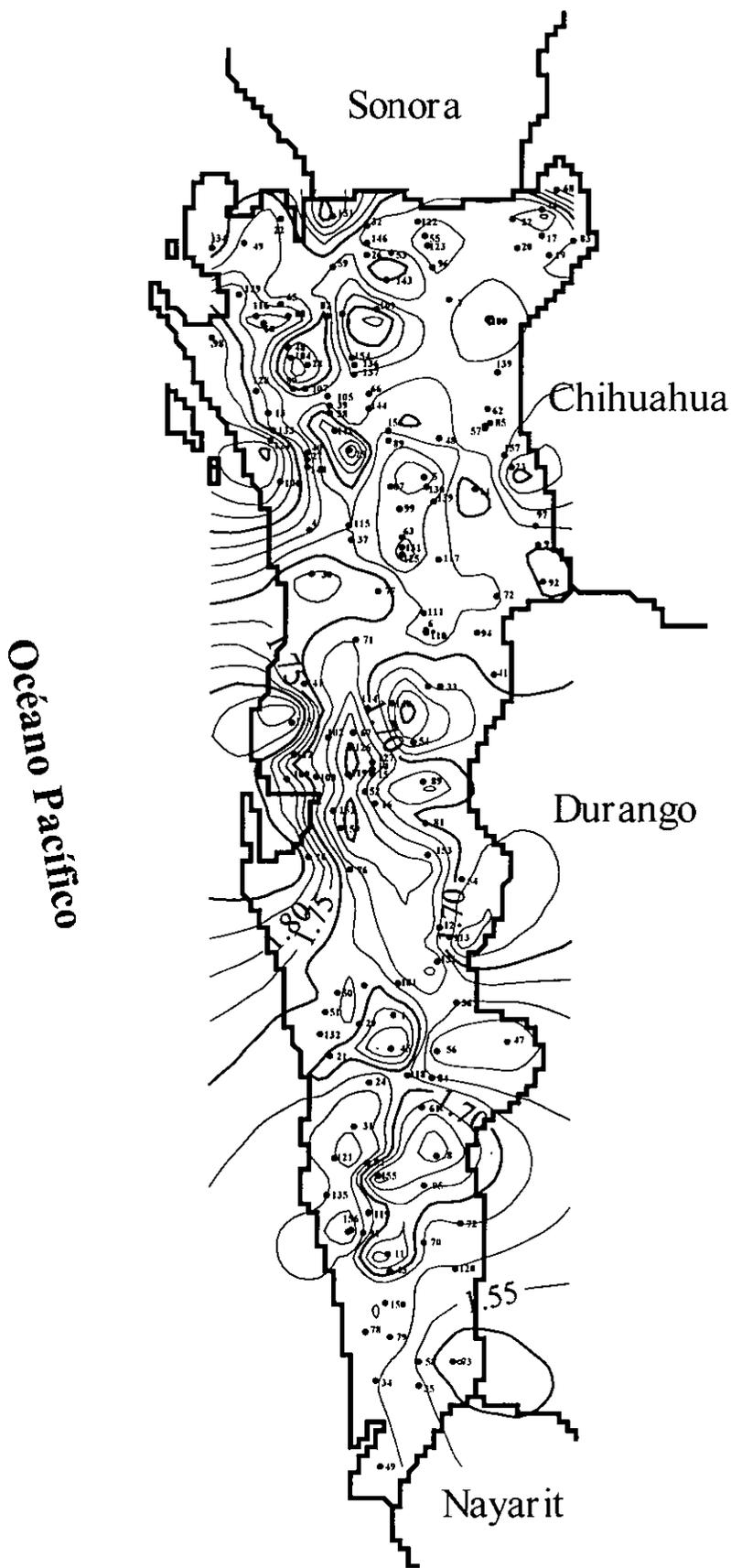


Fig. 40. Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 80% de la media

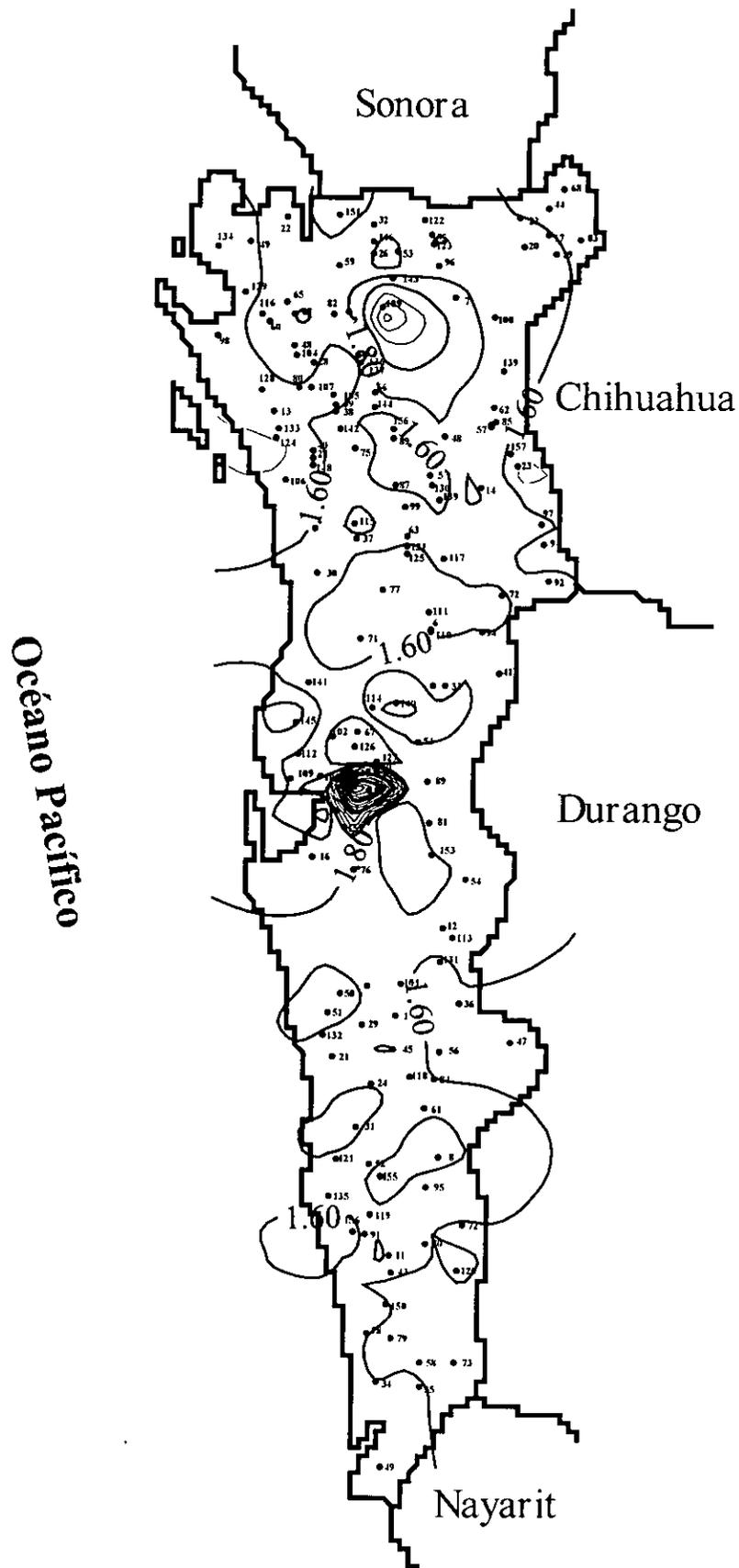


Fig. 41. Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 70% de la media

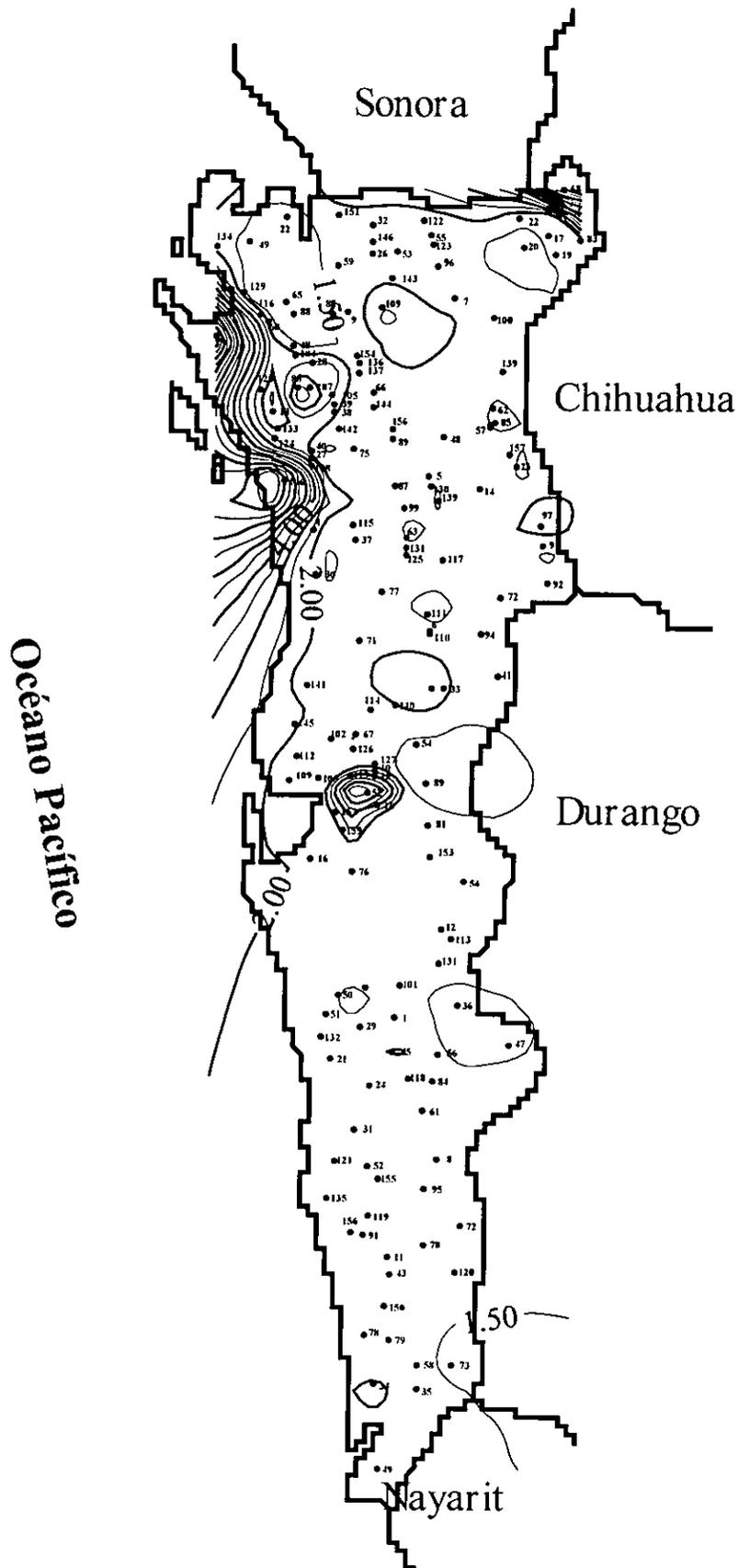


Fig. 42. Períodos de retorno asociados con la deficiencia de agua, cuando el nivel de truncamiento es el 60% de la media

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estado de Sinaloa tiene una población total de 2' 204, 054 habitantes, de los cuales el 50.01% son mujeres y el restante 49.99% hombres. Esta entidad representa demográficamente con el 2.72% de la población total de la República Mexicana

La población económicamente activa se encuentra ocupada principalmente en el sector agrícola, el cual se constituye como la base de la economía del estado; siguiendo en orden de importancia el comercio, construcción, pesca y turismo.

El abastecimiento de agua potable se ve afectado por la proliferación y dispersión de los núcleos población, pues mientras que la población urbana representa el 64.08% del total y se concentra en 86 localidades, la población rural presenta el 35.92% y se distribuye en 5,162 comunidades.

La gama de climas existentes en el estado se encuentra regida por varios elementos destacando entre ellos, la temperatura, precipitación y evaporación. Los climas varían de muy seco-muy cálido a cálido-subhúmedo con temperaturas medias anuales que oscilan de 24° a 14°C y precipitaciones medias anuales que van de 200 mm hasta 1500 mm siendo las precipitaciones medias máximas entre los meses de julio a octubre, mismas que representan el 84% de la precipitación total.

El estado de Sinaloa queda comprendido dentro de las Regiones Hidrológicas 10, Sinaloa y 11, Presidio-San Pedro. El volumen medio anual precipitado en Sinaloa se estimó en 41,092.504 millones de m<sup>3</sup> de los cuales escurren 5,258.027 millones de m<sup>3</sup>.

La aportación de agua superficial que recibe la entidad, proviene de los estados de. Sonora, Chihuahua, Durango y Nayarit y es del orden de los 10 152.932 millones de m<sup>3</sup> anuales.

El agua no se presenta ni en la cantidad, ni en el lugar requerido; en el área de mayor superficie apta para riego, el agua es escasa, mientras que en los lugares donde es abundante, su distribución a nivel parcelario es deficiente.

El agua para uso doméstico se asigna de manera ineficiente e inequitativa, mientras que en el área urbana, los usuarios la aprovechan en usos poco prioritarios y en cantidades excesivas (550 l/hab/día), en las zonas rurales es escasa o carecen por completo de ella.

El 98% del volumen total de agua que dispone Sinaloa es destinada para el sector agrícola, se irriga una superficie total de 742 482 de hectáreas.

En el sector urbano e industrial también se manifiesta la carencia de agua, efecto que se agudiza con la pérdida de ésta a través de los sistemas de distribución, debido básicamente a la falta de mantenimiento.

La metodología presentada en este trabajo suministra una técnica para estudiar los procesos de precipitación anual en cualquier región. Los test estadísticos aplicados en este estudio son únicamente medidas objetivas para identificar las estructuras de las series de tiempo de procesos de precipitación anual, que es el primer paso en cualquier análisis de frecuencias de sequías.

Las muestras de precipitación anual calculadas para Sinaloa presentan diferentes características en las subregiones encontradas. El rechazo de la prueba de no estacionariedad en cinco estaciones, dificultan llegar a una conclusión sobre la estructura del proceso de precipitación en esos lugares. Los demás procesos de precipitación resultaron ser normales e independientes por lo que el proceso AR(1) describe adecuadamente la independencia observada en las series.

Las frecuencias de sequías se calcularon mediante un proceso estadístico aplicado a datos de precipitación estacionario. Las gráficas de frecuencias de sequías producidas en este estudio pueden ser utilizadas en planeación de recursos hidráulicos en el estado de Sinaloa.

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluyen los siguientes aspectos:

- La ubicación de las estaciones climatológicas en el estado, muestran demasiada concentración en los municipios de Culiacán, El Fuerte y Guasave. Ya que en conjunto poseen el 36.25% del total del estado.
- Los meses de mayor precipitación son junio, julio, agosto y septiembre y se observó que los valores aumentan del Norte al Sur del estado y se incrementan desde la costa a la sierra.
- Se agruparon las estaciones climatológicas de acuerdo al coeficiente de variación, lo que permitió generar ocho regiones de precipitación homogénea. Las regiones se definieron con base en los polígonos de Thiessen y se adoptó un rango de 0.09 para los valores del citado coeficiente. En este aspecto, se determinó que el 95% de las estaciones varían entre los valores de 0.14 y 0.71.
- Al aplicar las pruebas de normalidad, independencia, estacionariedad y confirmación del modelo autorregresivo, resultó que únicamente 155 estaciones aceptaban el modelo autorregresivo AR(1). Sin embargo, dada la homogeneidad de los datos de precipitación original y a las distancias relativamente cercas entre las estaciones, el método se aplicó a la totalidad de ellas.
- Las gráficas de probabilidades y períodos de retorno de las sequías asociadas con la duración, deficiencia e intensidad se obtuvieron mediante la aplicación de la teoría *Run-Length* aplicadas a series de tiempo y con cinco niveles diferentes de truncamiento. En lo particular las gráficas pueden utilizarse para planear los recursos hidráulicos de una región. Asimismo instrumentar acciones preventivas en caso de presentarse un fenómeno de sequía.
- De acuerdo a los resultados obtenidos se encontró que las sequías más importantes presentan duraciones de uno a tres años. Así como también la mayoría de ellas se

localizan en la parte norte del estado y más específicamente en los municipios de Sinaloa, Choix, El Fuerte y Ahome.

- Las isolíneas marcadas en los planos del estado de Sinaloa, ubican con mayor precisión las regiones con valores de la deficiencia de agua para duraciones de sequía de un año. Lo anterior permitirá utilizarlas para hacer un análisis regional de sequías y establecer las medidas de mitigación correspondientes.

En cuanto a las recomendaciones, se presentan a continuación:

- Continuar con la investigación en la aplicación de los modelos autorregresivos, pero asociándole nuevos conceptos como el de sequía más grande. Así como implementar nuevas técnicas que redunden en la reafirmación del modelo generador de lluvias seleccionado.
- Implementar un método estadístico para llenar los datos faltantes en los registros originales de manera que se tengan muestras mayores de 17 elementos, ya que cantidades menores no pueden aplicarse en pruebas de estacionariedad o dependencia.

**BIBLIOGRAFÍA**

- 1 ALLEY, W. M. 1984. The Palmer Drought Severity Index: limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 1100 - 1109
- 2 ANDERSON, R. L. 1941. Distribution of the Serial Correlation Coefficient. *Ann, Math. Stat.* 13, 1.
- 3 ANDERSON, Theodore Wilbur. *The Statistical Analysis of Time Series*. New York Wiley, U.S.A. 1964. 704 p.
- 4 APARICIO, Mijares Fco. Javier. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. 2da reimpresión. Edit. Limusa. 1993. México. 301 p.
- 5 BOX and Müller 1958. . Cit. en *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. 2da. Edición. J. D. Salas, J. D. Delleur, V. Yevjevich and W. L. Lane. Water Resources Publication 1980, U.S.A. 484 p.
- 6 BOX, G.E.P. and Jenkins, G.M. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-day, San Francisco, 553p.
- 7 BRAS, Rafael et al. *Random Functions and Hydrology*. 1ra. edición. Editorial Addison-Wesley Publishing Company. © 1985. 559 p.
- 8 BRAVAR, D.I. and Kavvas J.W. *Factors Influencing The Ocurrance of Drought*. Water Supply. Paper 1580-B U.S. Geological Survey. Washington D.C.
- 9 CAMPOS, Aranda Daniel. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Vol. 1. 1ra. reimpresión. Edit. Universitaria Potosina. 1987. México. 164 p.
- 10 C.F.E. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Manual de Obras Civiles. Serie Hidrotécnia*. Vol A.1.6. Análisis Estadístico. Edit. C.F.E. México 1982. 106 p.
- 11 CLARKE, Robin. *Water, The International Crisis*. 1ra. edición. Edit. The MIT Press. 1991. England. 193 p.
- 12 C.N.A. *Presas del Estado de Sinaloa*. Boletín Hidrológico no 36. Comisión Nacional del Agua. Culiacán Sin. 1991.
- 13 COX, David Roxbee. *The Statistical Analysis of Serie of eventos*. Chapman and Hall, Canadá, 1967, 285p.

- 14 DELLEUR, W. Jacques, Atmospheric Deposition, Oxford Shire, United Kingdom. International Association of Hydrological Sciences , 1976.
- 15 D.G.G.-I.N.E.G.I.-S.P.P. Cartas hidrológicas de agua superficial, escala 1:250,000: 12-6, G12-9, G13-4, G13-7, G13-10 y F13-5.
- 16 D.G.G. - I.N.E.G.I. - S.P.P. Cartas Topográficas escala 1:250,000 G12-6, G12-9, G12-12, G13-4, G13-7, G13-10, G13-11, F13-1, F13-2, F13-4-7, F13-5.
- 17 DOWNI, N. M. et al. Métodos Estadísticos Aplicados. 5ta. edición. Edit. Harla. México 1986. 380 p.
- 18 ELTAHIR A. B. Elfatih. Drought Frequency Analysis of Annual Rainfall Series in Central and Western Sudan. Hydrological Sciences Journal 37. 3. U.S.A.
- 19 GARCÍA, Enriqueta. Clasificación Climática de México. Ed. U. N. A. M. México 1973.
- 20 GIBBS, W. J. and J. V. Maher, 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bureau of Meteorology Bulletin no. 48 Commonwealth of Australia, Melbourne.
- 21 GOBIERNO DEL ESTADO DE SINALOA. Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. 1ra. edición. Edit. Dirección de Estudios Económicos y Estadística. 1996. México. 326 p.
- 22 GOBIERNO DEL ESTADO DE SINALOA. Síntesis Monográfica del Estado de Sinaloa. Edit. Dirección de Estudios Económicos y Estadística, 1993 México 216 p.
- 23 GOMMES, R. and F. Petrassi, 1994. Rainfall Variability and Drought in Sub-Saharan Africa since 1960. Agrometeorology Series Working Paper no. 9 Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- 24 GUERRERO-SALAZAR, Pedro and Vujica Yevjevich. Analysis of drought characteristics by the theory of runs. Hydrologic series. Hydrology Papers. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. septiembre 1975. 44 p.
- 25 HAAN, T. Charles. Statistical Methods in Hydrology. 1ra. edición. Edit. Iowa State University Press. 1977. U.S.A. 378 P.
- 26 HANNON, E. H. Modified Markov Probability Models. Monthly Weather Review, 93, 527-532, 1960.
- 27 HARRISON, H. A. Bayesian Focussing of Time Series Analysis. Proc 3<sup>rd</sup>. Annual Conf. Amer. Water Resources. 1976. 512 p.

- 28 HIRSH and Taylor. Cit. en Microcomputer Application in Statistical Hydrology, 1ra. Edición. Prentice Hall, 1993. U.S.A.
- 29 HUBERT, J. Morel-Seytoux and José D. Salas and Thomas G. Sanders. Modeling Hidrologic Processes. 1ra. edición. Edit. Litho Crafters. U.S.A. 1979. 780 P.
- 30 HURST, H.E. et al Methods of Using Long-Term Storage in Reservoirs. Transaction American Society of Civil Engineers 1969, 116, 890 p.
- 31 I.N.E.G.I. Estudio Hidrológico del Estado de Sinaloa. 1ra. edición. Edit. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1995. México. 92 p.
- 32 I.N.E.G.I.-U.N.A.M. Geología de la República Mexicana, 1ra. edición, México D.F. 1984
- 33 I.N.E.G.I. XI, Censo General de Población y Vivienda, Resultados Definitivos. México 1991.
- 34 I.N.E.G.I. XIV Censo Industrial, XI Censo Comercial y XI Censo de Servicios Sinaloa. Edit. I.N.E.G.I. México D.F. 1995. 187 p.
- 35 I.N.E.G.I. Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. 1ra. Edic. Edit. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México 1996, 236 p.
- 36 JHONSTON. A. I. Mathematical Assesment of Synthetic Hydrology, WRR, Vol. 3. No 5 1972.
- 37 KALMAN, Rudolf Emil, Topics in Mathematical System Theory. New York, Mc. Graw Hill, 1961, 358 p.
- 38 KARL, T.R. and R. W. Knight, 1985 Atlas of Monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931 - 1983) for the Contiguous United States. Historical Climatology Series 3 - 7, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- 39 KAVVAS. J. W. et al Statistical Theory. Collier Mc Millan, Ltd. 1975 Toronto Ontario, Canada.
- 40 KITE, G.W. Frecuency and Risk analyses in Hidrology. 2da edición. Edit. Water Resources Publication. U.S.A. 1977. 197 p.
- 41 KOTTEGODA, N. T. Stochastic Water Resources Technology. 1ra edición. Edit. The McMillan Press LTD. Hong Kong 1980. 383 p.
- 42 LAWLY. E.T. Dynamic Stochastic Models From Empirical Data, Academic Press. New York, 1975.

- 43 LE HOU&EACUTE, Rou, H. N., G. F. Popov, and L. See, 1993. Agrobioclimatic Classification of Africa. Agrometeorology Series Working Paper No. 6, Food and Agriculture Organization, Rome Italy.
- 44 LLOYD, E. H. Stochastic Reservoir Theory in Advances in Hydrosience, Volume 4, Academic Press, New York 1979. 435 p.
- 45 LOZOYA, Corrales Julio. Métodos Matemáticos Aplicados a la Hidrología. Series del Instituto de Ingeniería No. D-27, marzo 1988. Edit. Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. México 1988. 53 p.
- 46 MAIDMENT, R. David. Handbook of Hidrology. 2da. edición. Edit. Mc. Graw Hill. U.S.A. 1993. 448 p.
- 47 MC. CUEN, Richard H. Microcomputer Aplications in Statistical Hidrology. Ira. edición. Edit. Prentice Hall. 1993. U.S.A. 508 P.
- 48 MCKEE, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Preprints, 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology, 17 - 22 January Anaheim, CA.
- 49 MICROSOFT CORPORATION. Programming in Basic version 4.5. Edit. Microsoft Corporation. U.S.A. 1987. 459 p.
- 50 O' CONELL, et al. Modified Markov Probability of Sequences of Precipitation events, Monthly Weather Review, 77, 616 p.
- 51 PALMER, W. C. 1965. Meteorological Drought. Research Paper no. 45. U. S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D. C.
- 52 PEIXOTO, Pinto. Climatic Change. W.M.O. Technical Note no. 79-2, Geneva Switzerland.
53. SALAS, J. D. J. W. Delleur, V. Yevjevich and W. L. Lane. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. 2da. edición. Edit. Water Resources Publications. 1980. U.S.A. 484 P.
- 54 SALDARRIAGA, J. and Yevjevich V. Application of Run-Length to Hydrologic series. Hydrology Papers. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. Abril 1970. 56 p.
- 55 SANCHO Y CERVERA, Jaime. Drought Characterization and Impact Mitigation Measures in México. Water Resources Publications. U.S.A. 1983, 417 p.

- 56 S.A.R.H. Boletines de las regiones hidrológicas 10 y 11. Edit. S.A.R.H. México D.F. 1964-1975.2 S.A.R.H. Sistema Hidráulico Intercalado del Noroeste, Hidrología y Geohidrología. México D.F. 1987.
- 57 S.A.R.H. Estudios de Prospección Hidrológica para el Estado de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa México. 1989.
- 58 SNEDECOR and Cochran 1967. Cit. en Applied Modeling of Hydrologic Time Series. 2da. Edición. J. D. Salas, J. D. Delleur, V. Yevjevich and W. L. Lane. Water Resources Publication 1980, U.S.A. 484 p.
- 59 S.R.H. Proyectos de Zonas de Riego. 1ra. edición. Edit. S. R. H. México, D.F. 1980. 773 p.
- 60 THOMAS, H. A. And Fiering M. B. 1962. Mathematical Synthesis of Streamflow Sequences for the Analysis of River Basins by Simulation. In A. Mass et al. (Editores). Design of Water - Resource Systems Mc Millan and Co. Ltd. London 549 p.
- 61 WHITE, D. H. And B. O' Meagher, 1995. Coping with Exceptional Drought in Australia. Drought Network New 7 (2): 13 - 17
- 62 WILLEKE, G., J. R. M. Hosking, J. R. Wallis, and N. B. Guttman, 1994. The National Drought Atlas. Institute for Water Resources Report 94 -NDS- 4, U. S. Army Corps. of Engineers.
- 63 YEVJEVICH, Vujica M. 1964. Fluctuations of Wet and Dry Years. Part I. Colorado State University. Hydrology Paper no 1. Fort Collins. Colorado, U.S.A.
- 64 YEVJEVICH, Vujica M. 1967. An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Drought. Hydrology Paper no. 23. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. 18 p.
- 65 YEVJEVICH, Vujica. M. 1979. Structural Analysis of Hydrologic Time Series. Hydrology Paper 56. Colorado State University. Fort Collins Colorado.
- 66 YEVJEVICH, Vujica, Luis da Conha and Evan Vlachos. Coping With Drought. Edit. Water Resources Publications. U.S.A. 1983. 417 p.
- 67 YEVJEVICH, Vujica. Stochastic Processes in Hydrology. 1ra. edición. Edit. Litho Crafters. U.S.A. 1972. 276 p.

- 68 YULE 1972 and Walker 1931. . Cit. en Applied Modeling of Hydrologic Time Series. 2da. Edición. J. D. Salas, J. D. Delleur, V. Yevjevich and W. L. Lane. Water Resources Publication 1980, U.S.A. 484 p.