



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

PRONÓSTICO DEL ESCURRIMIENTO MEDIANTE TÉCNICAS REGIONALES
DE PRECIPITACIÓN PARA UN MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS, Y
VERIFICACIÓN DEL FENÓMENO ENSO EN LA CUENCA RÍO ESCONDIDO.

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

PRESENTA:
KELLY SOREYI DULCE MONCAYO

TUTOR PRINCIPAL
DOCTORA MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR PRINCIPAL
DOCTOR RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO DE 2020



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Doctor Fuentes Mariles Oscar Arturo
Secretario: Doctor Domínguez Mora Ramón
1 er. Vocal: Doctora Arganis Juárez Maritza Liliana
2 do. Vocal: Doctor Pozos Estrada Óscar
3 er. Vocal: Doctor Mendoza Resendiz Alejandro

Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

DOCTORA MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

FIRMA

TUTOR DE TESIS:

DOCTOR RAMÓN DOMÍGUEZ MORA

FIRMA

Dedicatoria

A las personas que más amo, mis padres Lilia Teresa y Hely Fabio.

Mis hermanos Yuri y Freddy.

Mis sobrinos Abigail, Alejandro y Sebastián.

Y mi apoyo Paulo Alejandro.

Agradecimientos

A Jesús Nazareno y a la Virgen de Guadalupe por permitirme culminar un nuevo logro.

A la Doctora Maritza Liliana Arganis Juárez por toda su colaboración, por compartirme su conocimiento y principalmente por su comprensión y bonita forma de ser.

Al Doctor Ramón Domínguez Mora por su gran apoyo, por compartirme su conocimiento y por permitirme conocerle como persona.

Al Instituto de Ingeniería por permitirme formar parte de su equipo de trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo económico del que fui beneficiaria durante los dos años de estudios de posgrado.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1 Objetivo general.....	13
3.1.1 Objetivos específicos	13
4. DEFINICIONES Y ANTECEDENTES	14
4.1 El ciclo hidrológico	14
4.2 Precipitación	16
4.3 Relación Lluvia – Escorrentía	16
4.4 Modelación Lluvia – Esgurrimiento de parámetros distribuidos	17
4.5 Estimación del Hidrograma de crecientes con Modelación determinística y precipitación derivada de radares meteorológicos	20
4.6 El Niño – Oscilación del Sur (ENSO).....	22
4.6.1 Índice Niño Oceánico (ONI)	25
4.6.2 Índice Oscilación del sur (SOI).....	25
5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
5.1 Descripción del área de estudio.....	27
5.2 Factor de Reducción por Área (FRA)	30
5.3 Regionalización de lluvias	31
5.4 Modelo para Pronóstico del Esgurrimiento (MPE)	33
5.4.1 Modelo de precipitación	33
5.4.2 Modelo de producción del esgurrimiento	35

5.4.3	Pérdidas por evapotranspiración	37
5.4.4	Modelo de transferencia de escurrimiento	38
5.5	Recopilación de la información	41
5.5.1	Tiempo de concentración	41
5.5.2	Coefficiente de atenuación por almacenamiento k	41
5.5.3	Archivo de celdas	42
5.5.4	Archivo de lluvias	42
5.5.5	Archivo de caudales	44
5.5.6	Tipo y uso de suelo	45
5.6	Influencia del fenómeno ENSO en la precipitación del área de estudio	47
5.6.1	Dispersión de datos y regresión lineal simple	48
5.6.2	Análisis de correlación gráfica	48
5.6.3	Variación interanual – correlación cruzada	49
5.6.4	Variación estacional – correlación lineal simple	50
5.6.5	Precipitación regional bajo fases del ENSO	50
6.	APLICACIÓN Y RESULTADOS	51
6.1	Calibración del modelo	51
6.2	Tormentas estadísticas	53
6.2.1	Lluvia media de las precipitaciones diarias máximas anuales correspondiente a cada punto de interés	53
6.2.2	Precipitaciones diarias máximas anuales asociadas a diferentes periodos de retorno	54
6.2.3	Precipitación con duración de 1 hora	55
6.2.4	Precipitación con duración menor a 1 día	57
6.2.5	Conversión de lluvia puntual a lluvia distribuida	58

6.2.6	Obtención de las tormentas estadísticas de diseño.....	58
6.3	Estimación de los escurrimientos para distintos periodos de retorno en la cuenca río Escondido.....	70
6.3.1	Escenario 1: factor de olvido $f_x = 1$	70
6.3.2	Escenario 2: factor de olvido $f_x < 1$	73
6.4	Influencia del ENSO en la hidroclimatología de la región.....	77
6.4.1	Dispersión de datos y regresión lineal simple	77
6.4.2	Resultados correlación gráfica.....	80
6.4.3	Resultados variación interanual – correlación cruzada.....	87
6.4.4	Resultados variación estacional – correlación lineal simple	91
6.4.5	Resultados del análisis de la precipitación regional bajo fases del ENSO	95
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	101
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
	ANEXO A.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1.	Parámetros de calibración subcuencas Boquerón, Santo Domingo y Acala – 2010.	18
Tabla 4.2.	Parámetros de calibración Chicoasén.	19
Tabla 4.3.	Eventos El Niño y La Niña registrados entre 1952 y 2018 [21]......	25
Tabla 4.4.	Clasificación de los eventos según el valor del índice SOI por el criterio del Western Regional Climate [20]......	26
Tabla 5.1.	Información general estaciones climatológicas y EMAS.....	29
Tabla 5.2.	Características fisiográficas de la cuenca.....	30
Tabla 5.3.	Factores regionales por periodo de retorno, Coahuila, México [25]......	32
Tabla 5.4.	Relaciones entre las precipitaciones medias máximas asociadas a diferentes duraciones y las correspondientes a un día, Coahuila, México [25].	32

Tabla 5.5. Información de los registros de lluvia elegibles, para verificación de la influencia del fenómeno ENSO.	48
Tabla 6.1. Tabla resumen, calibración inicial.	52
Tabla 6.2. Lluvia media de las precipitaciones diarias máximas anuales.	54
Tabla 6.3. Lluvia diaria máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno.	55
Tabla 6.4. Lluvia en mm con duración de 1 hora para diferentes periodos de retorno.	56
Tabla 6.5. Lluvia en mm para intervalos de 240 minutos durante un día – Tr:2 años.	57
Tabla 6.6. Incrementos de lluvia en mm para intervalos de 240 minutos – Tr:2 años.	58
Tabla 6.7. Aplicación del FRA a los incrementos de lluvia en mm para intervalos de 240 minutos – Tr:2 años.	58
Tabla 6.8. Parámetros de pérdidas utilizados para cada periodo de retorno con $f_x = 1$	70
Tabla 6.9. Parámetros hidrológicos para cada periodo de retorno con $f_x = 1$	71
Tabla 6.10. Coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno con $f_x = 1$	72
Tabla 6.11. Parámetros de pérdidas utilizados para cada periodo de retorno con $f_x < 1$	74
Tabla 6.12. Parámetros hidrológicos para cada periodo de retorno con $f_x < 1$	74
Tabla 6.13. Coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno con $f_x < 1$	76
Tabla 6.14. Estadísticos para cada registro de lluvia (estandarizada).	79
Tabla 6.15. Estadísticos para cada registro de lluvia (estandarizada).	79
Tabla 6.16. Correlación entre las series trimestrales de la precipitación en la zona y el índice ONI.	91
Tabla 6.17. Correlación entre las series trimestrales de la precipitación en la zona y el índice SOI.	92
Tabla 7.1. Variación de los resultados del MPE entre los dos escenarios (escenario 2 – escenario 1).	102
Tabla 7.2. Variación del coeficiente de escurrimiento entre los dos escenarios.	102
Tabla 7.3. Coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno bajo los dos escenarios.	103
Tabla 7.4. Caudales pico para los diferentes periodos de retorno.	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. El ciclo hidrológico [9]. 14

Figura 4.2. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017 [12]. 15

Figura 4.3. Cuenca Chicoasén y subcuencas Sto. Domingo, Boquerón y Acala..... 18

Figura 4.4. Hidrogramas subcuenca Boquerón, periodo 20 de septiembre a 10 de octubre de 2010. MPE. ... 18

Figura 4.5. Hidrogramas subcuenca Santo Domingo, periodo 20 de septiembre a 10 de octubre de 2010. MPE. 19

Figura 4.6. Resultado – evento 10 de junio de 2003 [14]. 21

Figura 4.7. Resultado – evento 29 de septiembre de 2006 [14]. 21

Figura 4.8. Resultados validación – evento 05 de abril de 2004 [14]. 22

Figura 4.9. Esquema de la temperatura superficial del mar y de la precipitación tropical en el Océano Pacífico ecuatorial: (a) condición normal, (b) condición El Niño y (c) condición La Niña [18]. 23

Figura 4.10. Regiones El Niño – Oscilación del Sur [19]. 24

Figura 4.11. Ubicación de las localidades en las que se mide la presión atmosférica para el índice SOI. El signo de la diferencia entre los registros de Tahití y Darwin (Australia) indica la presencia de El Niño o La Niña [20]. 26

Figura 5.1. Ubicación general municipio Piedras Negras. 28

Figura 5.2. Estaciones climatológicas y EMAS disponibles. 28

Figura 5.3. Cuenca río Escondido y registros de lluvia seleccionados para la modelación. 30

Figura 5.4. Balance hidrológico en una celda (P: precipitación, EVP: evapotranspiración, ESD: escorrentía). 35

Figura 5.5. Modelo conceptual de escurrimiento directo de Clark modificado para parámetros distribuidos [14]. 39

Figura 5.6. Caudal máximo Villa de Fuente – julio 6 de 2010..... 43

Figura 5.7. Tormentas de diseño 3 al 7 de julio de 2010 estaciones: (a) 5074 Zaragoza (DGE) y (b) 5043 Allende II (DGE)..... 44

Figura 5.8. Caudal de diseño estación Villa de Fuente..... 44

Figura 5.9. Tipo de suelo en la cuenca río Escondido.....	45
Figura 5.10. Uso de suelo en la cuenca río Escondido.....	46
Figura 5.11. Estaciones climatológicas para el análisis del fenómeno ENSO.....	47
Figura 6.1. Parámetros de calibración inicial.....	51
Figura 6.2. Caudal observado y caudal calculado – calibración inicial.....	53
Figura 6.3. Localización de los puntos de interés.....	54
Figura 6.4. Factores de conectividad [35].....	56
Figura 6.5. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 2 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4. .	59
Figura 6.6. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 2 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.....	60
Figura 6.7. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 5 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3, (d) punto 4, (e) punto 5, (f) punto 6, (g) punto 7 y (h) punto 8.....	61
Figura 6.8. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 5 años: (a) punto 9 y (b) punto 10.....	62
Figura 6.9. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 10 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.	62
Figura 6.10. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 10 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.....	63
Figura 6.11. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 20 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3, (d) punto 4, (e) punto 5, (f) punto 6, (g) punto 7 y (h) punto 8.....	64
Figura 6.12. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 20 años: (a) punto 9 y (b) punto 10.....	65
Figura 6.13. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 50 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.	65
Figura 6.14. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 50 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.....	66
Figura 6.15. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 100 años: (a) punto 1, (b) punto 1, (c) punto 3, (d) punto 4, (e) punto 5, (f) punto 6, (g) punto 7 y (h) punto 8.....	67
Figura 6.16. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 100 años: (a) punto 9 y (b) punto 10.....	68

Figura 6.17. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 500 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.	68
Figura 6.18. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 500 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.	69
Figura 6.19. Caudal directo calculado para diferentes Tr: (a) 2 años, (b) 5 años, (c) 10 años y (d) 20 años con $f_x = 1$	71
Figura 6.20. Caudal directo calculado para diferentes Tr: (a) 50 años, (b) 100 años y (c) 500 años con $f_x = 1$	72
Figura 6.21. Caudal directo calculado para diferentes Tr: (a) 2 años, (b) 5 años, (c) 10 años y (d) 20 años con $f_x < 1$	75
Figura 6.22. Caudal directo calculado para diferentes Tr: (a) 50 años, (b) 100 años y (c) 500 años con $f_x < 1$	76
Figura 6.23. Dispersión y regresión lineal simple: (a) 5001 Agua Nueva, (b) 5002 Allende (SMN), (c) 5008 Conchos y (d) 5021 Nueva Rosita	77
Figura 6.24. Dispersión y regresión lineal simple: (a) 5033 Sabinas (DGE), (b) 5074 Zaragoza (DGE), (c) 5043 Allende II (DGE), (d) 5063 E.T.A. 110 Allende, (e) 5066 Sabinas (SMN), (f) 5069 Muzquiz (SMN) y (g) 5156 Palau.....	78
Figura 6.25. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5001 Agua Nueva.	80
Figura 6.26. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5002 Allende (SMN).	81
Figura 6.27. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5008 Conchos.....	82
Figura 6.28. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5021 Nueva Rosita.....	83
Figura 6.29. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5033 Sabinas (DGE).....	83
Figura 6.30. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5074 Zaragoza (DGE).....	84
Figura 6.31. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5043 Allende II (DGE).....	85

Figura 6.32. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5063 E.T.A Allende.....	85
Figura 6.33. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5066 Sabinas (SMN).	86
Figura 6.34. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5069 Muzquiz (SNM).	86
Figura 6.35. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - estación 5156 Palau.....	87
Figura 6.36. Correlogramas cruzados para la precipitación mensual estandarizada vs los índices ONI y SOI: (a) 5001 Agua Dulce, (b) 5002 Allende (SNM), (c) 5008 Conchos y (d) 5021 Nueva Rosita.....	88
Figura 6.37. Correlogramas cruzados para la precipitación mensual estandarizada vs los índices ONI y SOI del ENSO: (a) 5033 Sabinas (DGE), (b) 5043 Allende II (DGE), (c) 5074 Zaragoza (DGE) y (d) 5063 E.T.A. Allende.....	89
Figura 6.38. Correlogramas cruzados para la precipitación mensual estandarizada vs los índices ONI y SOI del ENSO: (a) 5066 Sabinas (SMN), (b) 5069 Muzquiz (SMN) y (c) 5156 Palau.....	90
Figura 6.39. Distribución espacial del coeficiente de correlación lineal entre el índice ONI y la precipitación (trimestral).....	93
Figura 6.40. Distribución espacial del coeficiente de correlación lineal entre el índice SOI y la precipitación (trimestral).....	94
Figura 6.41. Estación 5001 Agua Nueva: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	95
Figura 6.42. Estación 5002 Allende (SMN): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	96
Figura 6.43. Estación 5008 Conchos: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	96
Figura 6.44. Estación 5021 Nueva Rosita: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	97
Figura 6.45. Estación 5033 Sabinas (DGE): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	97
Figura 6.46. Estación 5074 Zaragoza (DGE): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	97

Figura 6.47. Estación 5043 Allende II (DGE): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	98
Figura 6.48. Estación 5063 E.T.A. 110 Allende: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	98
Figura 6.49. Estación 5066 Sabinas (SMN): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	99
Figura 6.50. Estación 5069 Muzquiz (SMN): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.....	99
Figura 6.51. Estación 5156 Palau: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.	99

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Coeficientes de escurrimiento en función del periodo de retorno [36].	73
--	----

1. INTRODUCCIÓN

La población mexicana está expuesta al impacto de diversos fenómenos naturales perjudiciales, tales como inundaciones, sequías, tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; ondas cálidas, ondas gélidas; ciclones tropicales, heladas, tornados, entre otros [1].

En particular, las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más comunes en México, una inundación es el evento que debido a la precipitación (lluvia, nieve o granizo extremo), oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura; los efectos negativos de las inundaciones, se deben en gran medida a la actividad humana, por la deforestación y la ubicación de viviendas en zonas bajas cercanas a los ríos y costas [2]; una estimación de las víctimas fatales en el país a consecuencia de fenómenos hidrometeorológicos reporta un promedio cercano a los 140 individuos fallecidos anualmente [3].

Con la finalidad de contribuir en el pronóstico de los escurrimientos en una de las ciudades mexicanas más vulnerable a sufrir los fenómenos de inundación, se calibró el Modelo para Pronóstico de Escurrimiento (MPE) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [4]. El área de estudio se eligió considerando la ubicación de zonas identificadas con alto y muy alto índice de peligro a la ocurrencia de inundaciones según el Atlas Nacional de Riesgo, se eligió el municipio de Piedras Negras con índice de peligro «alto» localizado al noreste del estado de Coahuila.

A través del tiempo el clima presenta ciclos o variaciones de diversa duración, en diferentes años los valores de las variables climatológicas (precipitación, temperatura del aire, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal; la secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías (la diferencia resultante entre el valor de la variable climatológica y su valor promedio). Los procesos naturales que influyen en la variabilidad de la hidroclimatología de una región, pueden ser fenómenos macroclimáticos de comportamiento global como el fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ENSO).

El presente trabajo está compuesto de ocho capítulos, el primero corresponde a la introducción, el segundo al planteamiento del problema donde se justifica el desarrollo de la investigación, en el tercero se presenta la exposición de los objetivos (general y específicos).

El cuarto apartado incluye algunas definiciones y aspectos relevantes de investigaciones antecedentes en relación con el área de interés y con la metodología de trabajo, este acercamiento a información secundaria permitió llevar a cabo con mayor propiedad los temas planteados en esta investigación.

Además, se revisaron otros estudios entre los que destacaron los artículos titulados: «El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México» [5], «El Niño y La Niña, sus efectos en los Escurrimientos en la República Mexicana» [6] desarrollado por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y un estudio llamado «Las inundaciones de Piedras Negras, Coahuila, de abril de 2004» [7] que permitió identificar la magnitud de daños del evento extremo ocurrido.

El quinto capítulo está conformado por la metodología de trabajo, incluye temas desde la identificación y descripción del área de estudio, estimación del Factor de Reducción por Área (FRA), regionalización de lluvias, modelación con el MPE y los elementos que requiere el software para su correcto funcionamiento, posteriormente se detalla el proceso de verificación de la influencia del ENSO en la lluvia de la región.

El sexto capítulo hace referencia a todos los resultados obtenidos tras realizar los cálculos y procesamientos de la información disponible. En el séptimo apartado se presenta el análisis de resultados y las conclusiones. Finalmente, la sección ocho contiene las referencias bibliográficas utilizadas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Piedras Negras está calificado con un índice de peligro a sufrir inundaciones «alto» según el Atlas Nacional de Riesgo de la República Mexicana; Piedras Negras se ha enfrentado a varias inundaciones devastadoras a lo largo del tiempo, una de las más catastróficas ocurrida en abril de 2004. Las precipitaciones registradas durante los días 4 y 5 de abril de 2004 en el norte del estado de Coahuila, ocasionaron desbordamientos del río Escondido e inundaciones provocando daños a varios municipios; principalmente al de Piedras Negras en la colonia de Villa de Fuente, ocasionando la muerte de 38 personas y 7 desaparecidas, afectando la infraestructura urbana y las viviendas de la población, estimándose de manera preliminar daños totales de hasta 150 millones de pesos [7].

Con base en lo anterior se evidencia la necesidad de contar con un modelo lluvia – escurrimiento en la cuenca río Escondido, que permita pronosticar caudales de diseño para diferentes periodos de retorno en tiempo oportuno y de esta manera sea posible tomar las medidas de mitigación acorde al plan de contingencia de la región.

En la misma directriz, al conocer si existe influencia del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur sobre la precipitación del área de interés, es posible identificar entonces si algún evento extremo (inundaciones o sequías) tiene relación o no con dicho fenómeno de variabilidad climática, en este sentido se podrían realizar predicciones a largo plazo de la operación de presas, estimación de caudales ambientales, manejo del agua de los ríos, etc., considerando las tres condiciones hidrológicas (húmeda, normal y seca).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Estimar para la cuenca río Escondido el escurrimiento para 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años periodo de retorno; además verificar la influencia del fenómeno ENSO en la precipitación registrada en el área de interés, considerando disminuciones de lluvia bajo condición El Niño e incrementos bajo condición La Niña.

3.1.1 Objetivos específicos

- Calibrar el Modelo para Pronóstico de Escurrimiento MPE, para la cuenca Río Escondido.
- Estimar tormentas estadísticas para 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años período de retorno mediante técnicas regionales de precipitación.
- Clasificar y correlacionar la lluvia con los índices de variabilidad climática ONI (Índice Niño Oceánico) y SOI (índice Oscilación del Sur).

4. DEFINICIONES Y ANTECEDENTES

Este capítulo engloba conceptos y procedimientos, que son la base para alcanzar los objetivos planteados, además se presentan los resultados de una investigación para la misma área de estudio (cuenca del río Escondido) donde se estima el hidrograma de avenidas utilizando precipitación derivada de radar.

4.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico (Figura 4.1) es el proceso continuo de la circulación del agua, en sus diversos estados en la esfera terrestre. Sucede bajo la influencia de la radiación solar, la acción de la gravedad y la dinámica de la atmósfera, la litósfera y la biósfera. Las diferentes fases del ciclo son el marco de referencia para el estudio del estado y del comportamiento del agua [8].

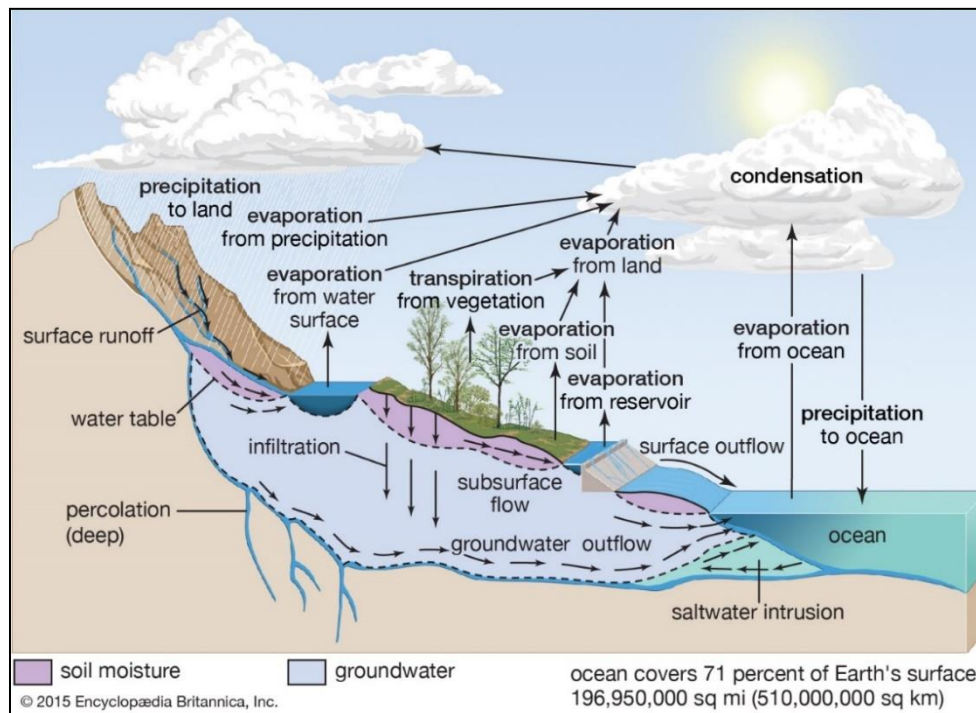


Figura 4.1. El ciclo hidrológico [9].

El agua se evapora desde el océano hacia la atmósfera en grandes cantidades y en menor grado desde el continente, una proporción muy importante es la evapotranspiración que es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración de las plantas [10], el agua se transporta y se eleva hasta que se condensa y precipita por acción de la gravedad, una parte es interceptada por la vegetación o por otras

superficies y luego se evapora nuevamente, la otra entra en contacto directo con el suelo o con las extensiones de agua libre. Aquella que cae al suelo puede alimentar la red hidrográfica directamente (escorrentía superficial), almacenarse en algunas partes de la superficie (almacenamiento superficial) [11] o filtrar a través del suelo formando capas de agua subterránea, este proceso es la percolación; tarde o temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación.

Anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. La Figura 4.2 muestra los componentes y valores que conforman el cálculo del agua renovable [12].

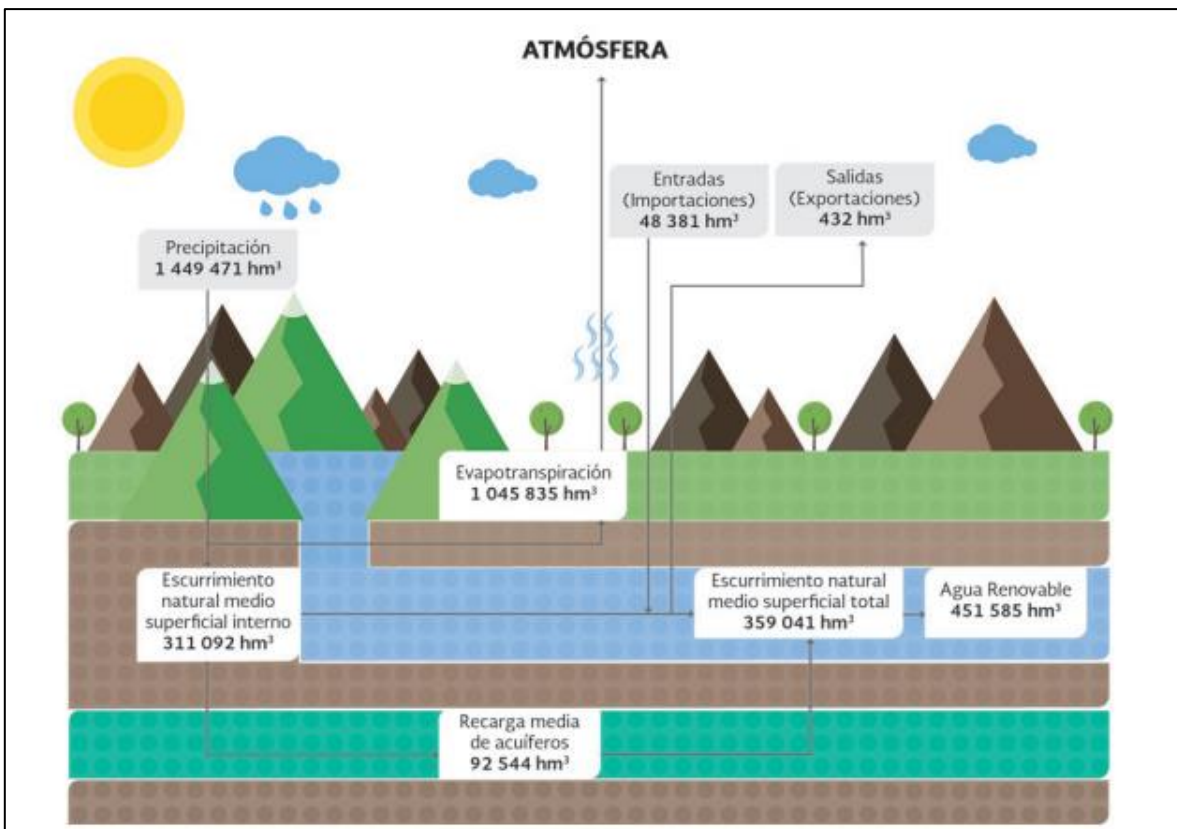


Figura 4.2. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017 [12].

4.2 Precipitación

Se denomina precipitación al agua que llega a la superficie terrestre proveniente de la atmósfera, es un componente fundamental del ciclo hidrológico y es la fuente primaria del agua superficial en la tierra; con sus mediciones se tiene el punto de partida de la mayor parte de los estudios relativos al uso y control del agua; es importante estudiar dos aspectos fundamentales de la precipitación: la manera en que se produce y la manera en que se mide, y diversos criterios para el análisis, síntesis, corrección y tratamiento de los datos [13].

En la República Mexicana existen varios organismos de administración de las estaciones hidrometeorológicas, como el Banco Nacional de datos de Aguas Superficiales (BANDAS) donde se tiene el registro de las estaciones hidrométricas y presas; el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) administra la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM) que registra información de las variables precipitación, temperatura, evaporación entre otras; y la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) las cuales dan seguimiento a los eventos hidrometeorológicos extremos.

La escasez de datos de lluvia es una problemática importante particularmente en la modelación hidrológica, la confiabilidad de los resultados de un modelo depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de la información de entrada; esta situación limita la toma de decisiones para administrar los recursos hídricos y dificulta el desarrollo de sistemas de alerta temprana para el control de inundaciones o el diseño de obras hidráulicas [14]. En esta investigación se hizo uso de información de lluvia registrada por estaciones pluviométricas (PM) que permiten realizar mediciones de precipitación acumulada cada 24 horas; también se utilizó información de estaciones meteorológicas automáticas que recopilan y monitorean algunas variables para generar archivos del promedio cada 10 minutos, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 o 3 por estación.

4.3 Relación Lluvia – Escorrentía

La estimación del gasto o caudal es importante para el diseño y operación de diferentes obras hidráulicas, la elaboración de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), la prevención de inundaciones, etc.; sin embargo, es común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el o los sitios de interés. Por lo que se recurre a determinar el caudal a través de la precipitación.

Para intervalos de tiempo del orden de horas, la relación precipitación – escorrentía no es fácil de hallar, pero para intervalos de tiempo más largos se pueden hallar correlaciones estrechas entre estas dos variables [11][15].

En los modelos hidráulicos de parámetros distribuidos se divide el área de estudio (cuenca) en celdas (generalmente áreas cuadradas o pixeles), cada una con sus características específicas, la producción del escurrimiento se estima para cada una de las celdas y el gasto generado en cada una de ellas se hace transitar por la cuenca hasta los sitios de interés.

A continuación, se enlistan algunos de los métodos más representativos [4].

- **HEC – HMS y el TR – 20:** se utilizan para generar hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de esquemas de control de flujo.
- **SWMM:** se adapta a los análisis y las aplicaciones de diseño que involucran determinaciones simultáneas de cantidad y calidad de agua.
- **TOPMODEL:** está bastante ligado al análisis y procesamiento de la información digital del terreno, está definido como un modelo conceptual de área de contribución variable.
- **MPE:** permite modelar el escurrimiento considerando las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante un intervalo de tiempo de una tormenta a otra.

4.4 Modelación Lluvia – Escurrimiento de parámetros distribuidos

En este estudio [16] se analizó la subcuenca Chicoasén que forma parte de la cuenca del río Grijalva. Sobre este río se encuentra el Sistema Hidroeléctrico más importante de México conformado por los embalses de las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas.

La cuenca Chicoasén cuenta con tres estaciones de medición de gasto: Boquerón, Santo Domingo y Acala, por lo que se subdividió en tres subcuencas para un mejor estudio (Figura 4.3).

La modelación lluvia a escurrimiento se realizó con el software MPE; a modo de ejemplo se presentan en la Tabla 4.1 los parámetros de calibración para un evento de lluvia ocurrido en el año 2010.

En la Figura 4.4 se presenta el hidrograma observado y estimado para la subcuenca Boquerón y en la Figura 4.5 para la subcuenca Santo Domingo.

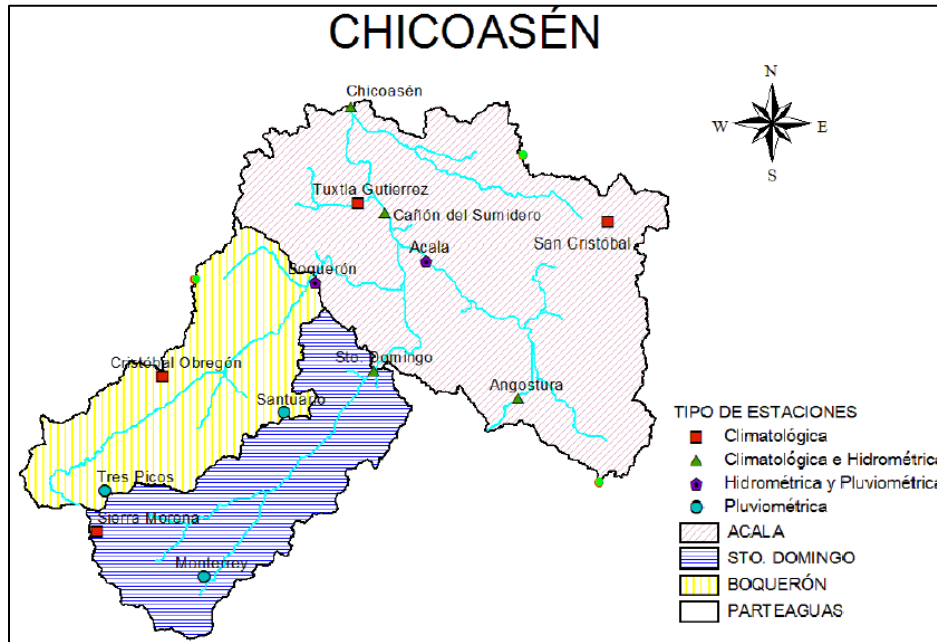


Figura 4.3. Cuenca Chicoasén y subcuencas Sto. Domingo, Boquerón y Acala.

Tabla 4.1. Parámetros de calibración subcuencas Boquerón, Santo Domingo y Acala – 2010.

Parámetros de calibración	Subcuencas	
	Boquerón	Sto. Domingo
Parámetros de pérdida		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.20	0.20
Factor de escala de retención potencial (f_s)	1.20	1.20
Factor de olvido (f_x)	0.99	0.97
Parámetros de forma		
T_c (tiempo de concentración) [h]	17	10
K (coeficiente de almacenamiento) [h]	15	7

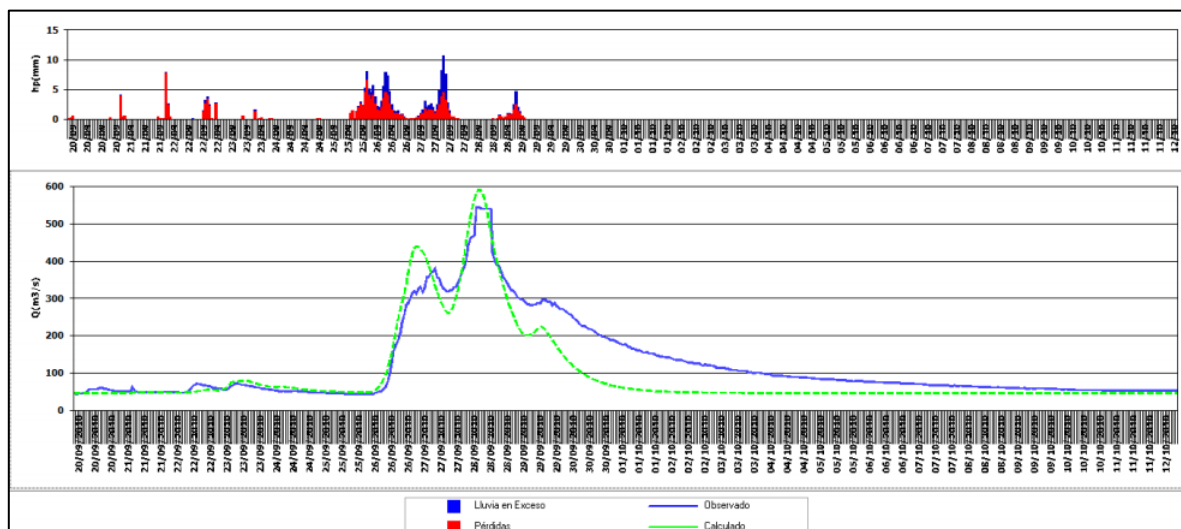


Figura 4.4. Hidrogramas subcuenca Boquerón, periodo 20 de septiembre a 10 de octubre de 2010. MPE.

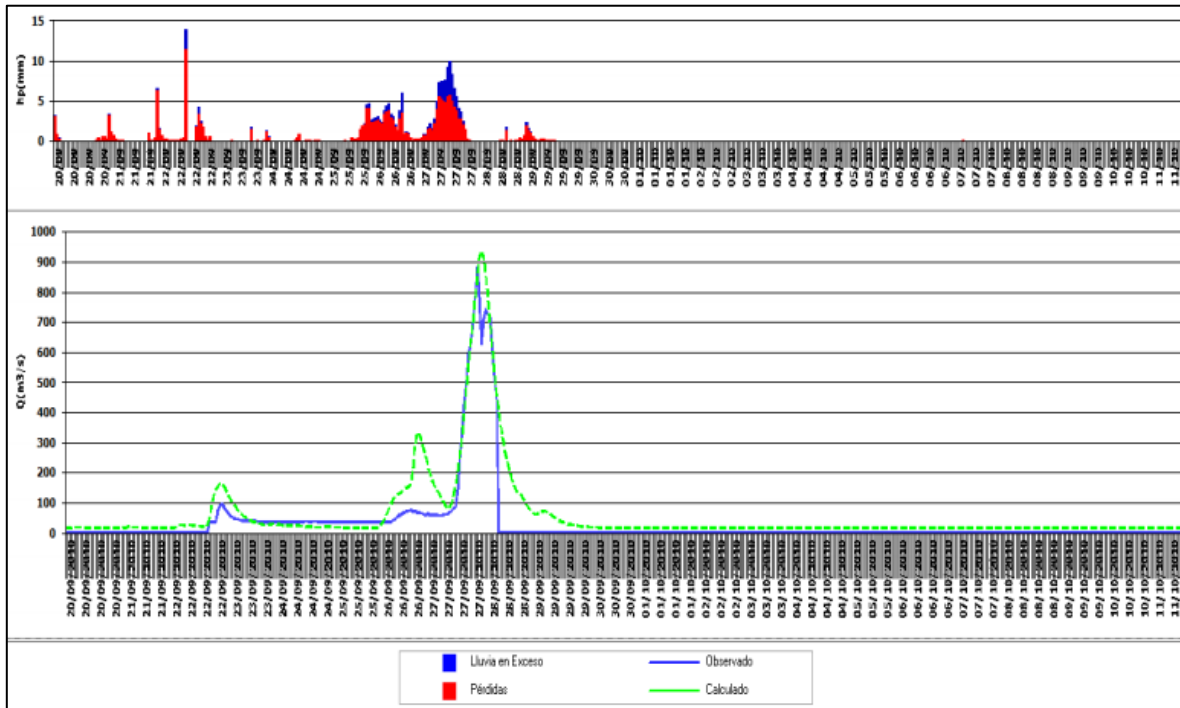


Figura 4.5. Hidrogramas subcuena Santo Domingo, periodo 20 de septiembre a 10 de octubre de 2010. MPE.

Tanto para Boquerón como para Santo Domingo se observa que el caudal calculado presenta una distribución temporal similar respecto al caudal observado, aunque en algunos intervalos de tiempo se aprecian incrementos del valor calculado, estos se compensan con otros intervalos donde hay ciertas disminuciones, siendo más notorio para la cuenca Boquerón.

Con los parámetros finales de Boquerón y Santo Domingo, se obtuvieron los valores de la cuenca propia Chicoasén, pues Acala no se pudo calibrar porque recibe las extracciones de la presa Angostura, por tanto, a los escurrimientos pronosticados es preciso adicionarle dichas extracciones.

Tabla 4.2. Parámetros de calibración Chicoasén.

Parámetros de calibración	Chicoasén	
	Época estiaje	Época invierno
Parámetros de pérdida		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.20	0.20
Factor de escala de retención potencial (f_s)	1.80	1.20
Factor de olvido (f_x)	0.97	0.98
Parámetros de forma		
Tc [h]	28	28
K [h]	22	22

Se obtuvieron mejores resultados cuando las avenidas fueron mayores y cuando la medición de las lluvias se realizó con un mayor número de estaciones, en tanto se puede decir que el MPE es realmente útil y confiable para predecir la respuesta hidrológica de una cuenca.

4.5 Estimación del Hidrograma de crecientes con Modelación determinística y precipitación derivada de radares meteorológicos

En este estudio realizado en el año 2013 [14], se evaluó la simulación hidrológica de la cuenca río Escondido en la estación hidrométrica 24290 Villa de Fuente. El modelo hidrológico HEC-HMS fue utilizado para simular los caudales pico con datos de precipitación estimada por el radar NEXRAD ubicado en la base militar Laughlin, Texas; la modelación de la función de producción del escurrimiento se basó en el método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN).

La calibración se realizó con los eventos ocurridos el 10 de junio de 2003 y el 29 de septiembre de 2006, para la validación se consideró el evento extraordinario ocurrido el 5 de abril de 2004; se consideró el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe como criterio numérico de validez del ajuste.

En la Figura 4.6 se presenta la simulación hidrológica para el evento ocurrido el 10 de junio de 2003, el caudal pico simulado fue de $194.6 \text{ m}^3/\text{s}$ casi igual al gasto pico observado de $194.0 \text{ m}^3/\text{s}$, con un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.96. Por otro lado, en la Figura 4.7 se observa el resultado del evento ocurrido el 29 de septiembre de 2006, con un caudal pico simulado de $32.5 \text{ m}^3/\text{s}$ igual al gasto pico observado, y un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.97. Finalmente, en la Figura 4.8 se observa el evento extremo del 5 de abril del 2004.

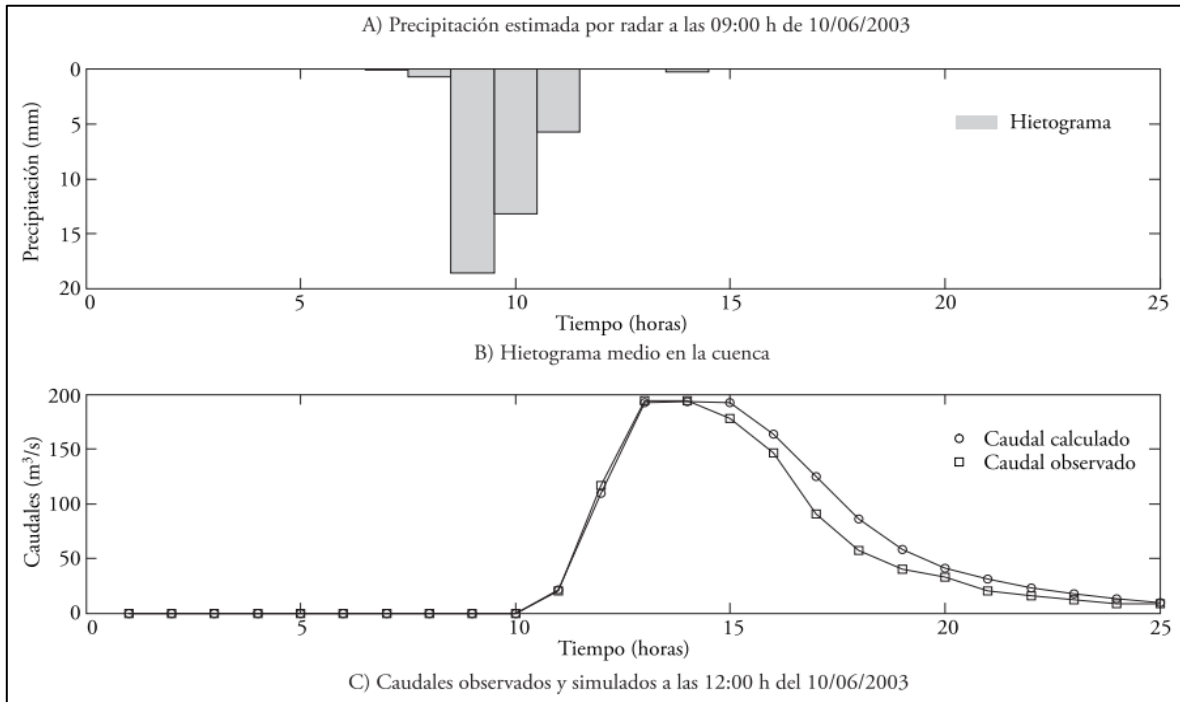


Figura 4.6. Resultado – evento 10 de junio de 2003 [14].

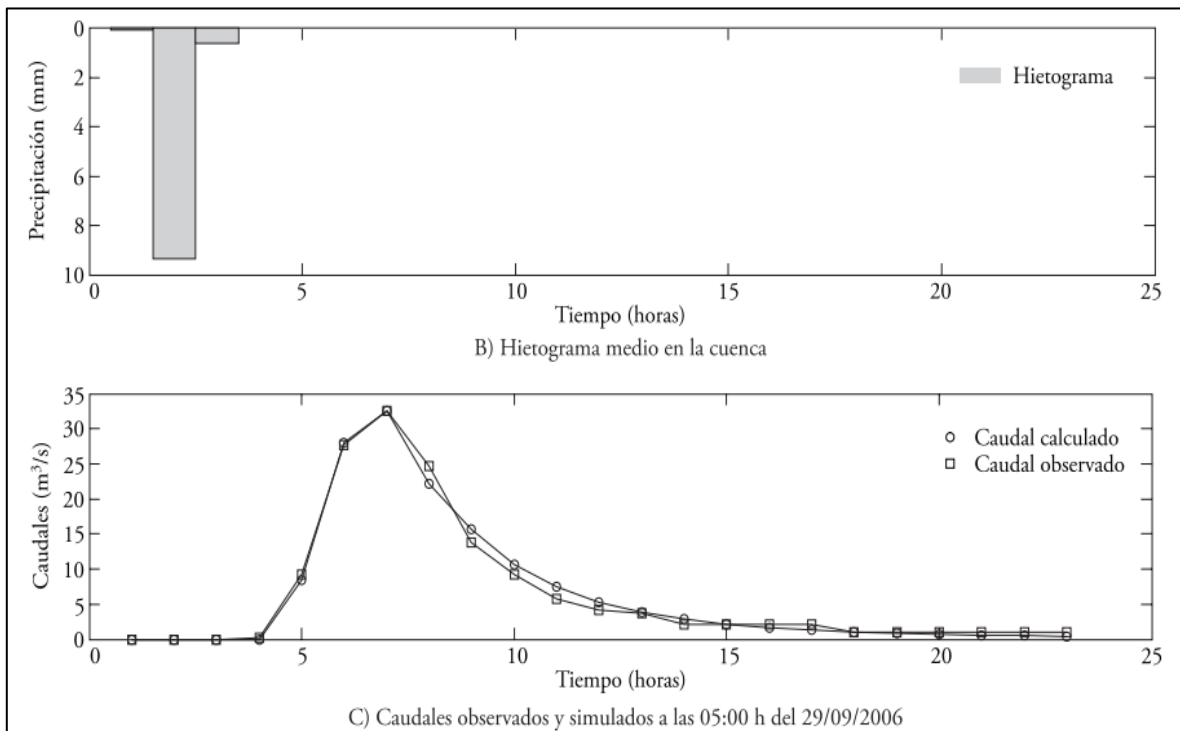


Figura 4.7. Resultado – evento 29 de septiembre de 2006 [14].

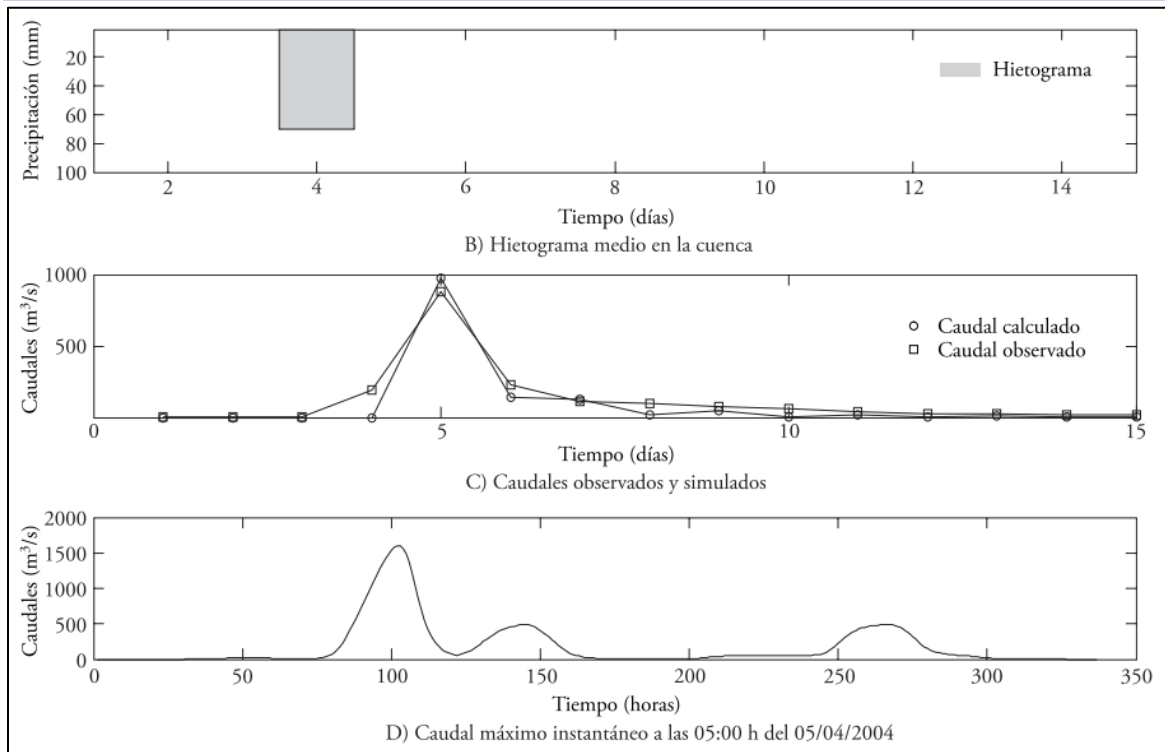


Figura 4.8. Resultados validación – evento 05 de abril de 2004 [14].

Respecto al evento extremo del 5 de abril del 2004, el gasto medio diario observado fue 883.0 m³/s mientras el caudal medio diario calculado fue 949.4 m³/s, lo que significa un error de 2.3 %. Cabe aclarar que en la Figura 4.8 (C) la escala del tiempo es diaria porque no se contó con caudales horarios. La Figura 4.8 (D) representa el hidrograma calculado a paso horario y se aprecia un pico instantáneo de 1,605 m³/s.

Los resultados de las simulaciones fueron buenos, por lo que el uso de precipitación estimada por radar para la aplicación en modelos hidrológicos es una fuente de información alternativa de datos de lluvia, principalmente en zonas donde no existe información meteorológica o donde se requiere conocer la variabilidad de la precipitación en tiempo y espacio [14].

4.6 El Niño – Oscilación del Sur (ENSO)

El Niño – Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) es un fenómeno natural océano – atmósfera de variabilidad climática, que implica cambios en la temperatura de las aguas del Pacífico Tropical en su parte central y oriental.

Este patrón climático presenta una fase cálida, donde la temperatura superficial del mar en la zona mencionada se incrementa entre 1 y 3 °C respecto a la temperatura normal, esta fase es conocida como El Niño y tiene una recurrencia promedio de entre 3 y 4 años.

La fase La Niña es la contraparte a El Niño y expresa una disminución de la temperatura entre 1 y 3 °C respecto a la temperatura normal con una recurrencia promedio de 6 y 8 años, La Niña muestra en general una componente de oscilación cuasi-bienal, pero también presenta una variabilidad estacional, dado que el fenómeno típicamente comienza entre marzo y mayo (primavera del hemisferio Norte) y alcanza su máximo desarrollo hacia diciembre [17].

Si bien El Niño y La Niña se asocian a las anomalías de la temperatura a lo largo del Pacífico tropical, también se relacionan con cambios en los patrones de viento, presión y precipitación.

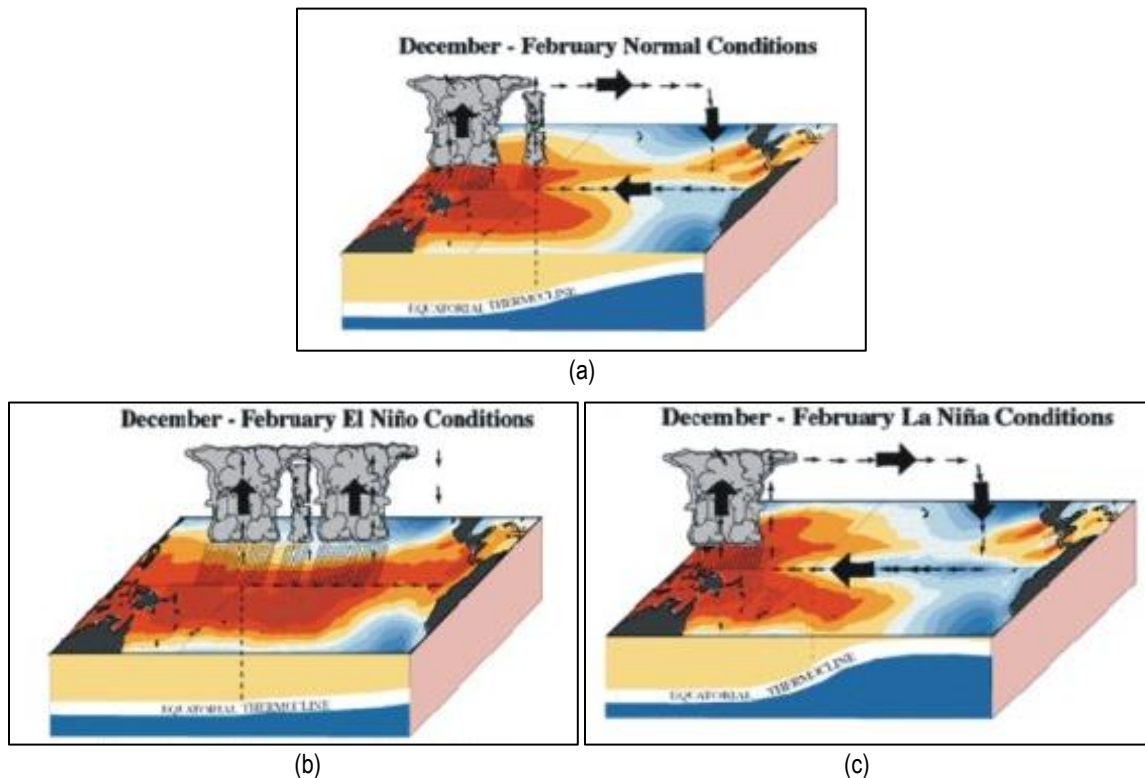


Figura 4.9. Esquema de la temperatura superficial del mar y de la precipitación tropical en el Océano Pacífico ecuatorial: (a) condición normal, (b) condición El Niño y (c) condición La Niña [18].

En la Figura 4.9 (a) condición normal: se observa que el agua más caliente se encuentra en el Pacífico occidental, al igual que la mayor precipitación. Los vientos siguen el recorrido de este a oeste a través del Pacífico (estos vientos se llaman, en inglés, "easterlies"). Por otro lado, en Figura 4.9 (b) condición El Niño: los vientos del este se debilitan, las temperaturas superficiales del mar medio más cálidas cubren el Pacífico tropical

central y del este, y la región de mayor precipitación se mueve también hacia esta dirección. Mientras que en la Figura 4.9 (c) condición La Niña: se podría considerar como un realce de condiciones normales; durante estos acontecimientos, los vientos del este se consolidan, está más fría el agua del océano que se extiende hacia el oeste al Pacífico central, y la zona que registra un calentamiento de las temperaturas medias de la superficie del mar, en el Pacífico occidental, están acompañadas generalmente por mayores precipitaciones.

Durante fase El Niño, la presión del nivel del mar tiende a ser más baja en el Pacífico del este y más alta en el Pacífico occidental mientras que lo contrario tiende a ocurrir durante La Niña. Este alternarse en la presión atmosférica entre el Pacífico tropical del este y occidental se llama Oscilación del Sur. Una medida estándar de la oscilación meridional es la diferencia en la presión a nivel del mar entre Tahití y Darwin [18].

Para una mayor comprensión de cómo se desarrollan los eventos El Niño/La Niña a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial, se han definido cuatro regiones de acción (Figura 4.10). De Oeste a Este estas regiones son: Niño 4, Niño 3, Niño 3.4 y región Niño 1+2 [19].

Las regiones Niño 4 y 3 se encuentran ubicadas en el lado occidental del Pacífico y se caracterizan por presentar las máximas anomalías de temperatura superficial del mar. La región Niño 3.4 es una subregión comprendida entre las regiones Niño 4 y 3 y representa un buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el índice de Oscilación del Sur. La región Niño 1+2 incluye las costas de Perú y Ecuador incluidas las Islas Galápagos, esta región representa un indicador de los cambios inducidos por el ENSO en los patrones de variabilidad de la costa Pacífica de América del Sur [19].

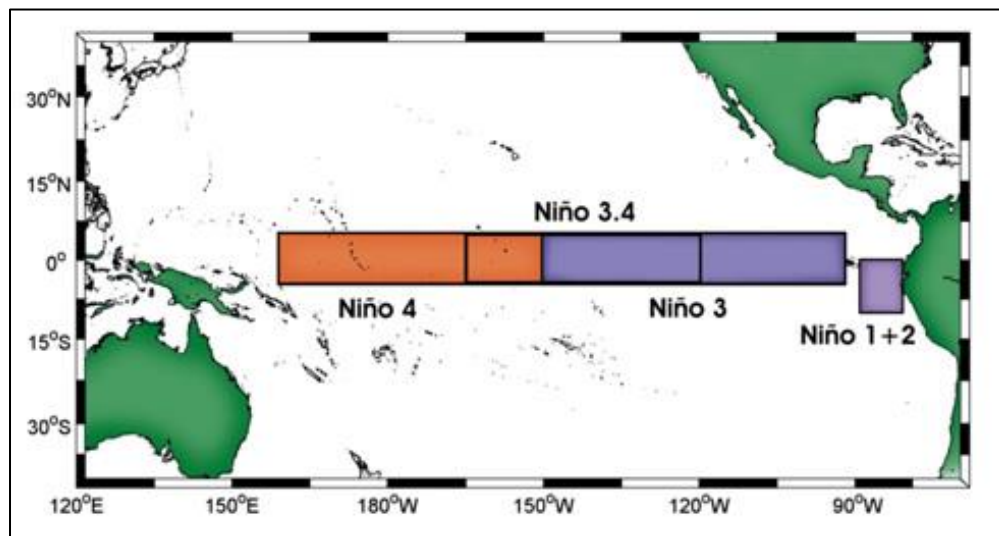


Figura 4.10. Regiones El Niño – Oscilación del Sur [19].

4.6.1 Índice Niño Oceánico (ONI)

Es una serie de tiempo de las anomalías de la temperatura superficial marina calculadas a partir de mediciones in situ efectuadas en la región El Niño 3.4 (5°N-5°S, 170°W-120°W). El periodo base abarca de 1971 al 2000 y los datos se obtienen con el método de medias móviles aplicado a periodos de tres meses [20].

En la Tabla 4.3 se presentan los años de eventos El Niño y La Niña según la clasificación del índice ONI.

Tabla 4.3. Eventos El Niño y La Niña registrados entre 1952 y 2018 [21].

El Niño				La Niña		
Débil	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
2018-19				2017-18		

El ONI es el índice estándar que utiliza la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) para identificar eventos El Niño (cálido) y La Niña (frío) en el Pacífico tropical. Los eventos por encima de la anomalía + 0.5°C se caracterizan con El Niño y menor igual a -0.5°C con La Niña. El Umbral se divide en eventos débiles con una anomalía de temperatura de la superficie del mar (SST) de 0.5 a 0.9, moderado de 1.0 a 1.4, fuerte de 1.5 a 1.9 y muy fuerte mayor e igual a 2, un evento se clasifica si se ha excedido el umbral durante al menos 3 periodos consecutivos [21].

4.6.2 Índice Oscilación del sur (SOI)

Este valor es un indicador de la diferencia de presión entre Tahití y Darwin (Figura 4.11) que se presenta debido al efecto de subibaja en el Pacífico Ecuatorial. Con frecuencia la magnitud de esta oscilación está relacionada con el desarrollo e intensidad de los eventos de El Niño y La Niña.

Los valores negativos de la diferencia de presión sin normalizar menores a -8 indican los episodios El Niño, en tanto que los valores positivos mayores a 8 son típicos de La Niña; sin embargo, cuando los datos son normalizados los valores límite son -0.5 y 0.5 (Tabla 4.4) [20].

Tabla 4.4. Clasificación de los eventos según el valor del índice SOI por el criterio del Western Regional Climate [20].

Clave	Intensidad del evento	SOI	Clasificación evento
IEN	Fuertemente negativo	≤ -1.0	El Niño Intenso
MEN	Moderadamente negativo	≤ -0.5	El Niño Moderado
N	Normal	-0.5 y 0.5	Normal
MLN	Moderadamente positivo	$\geq +0.5$	La Niña Moderada
ILN	Fuertemente positivo	$\geq +1.0$	La Niña Intensa

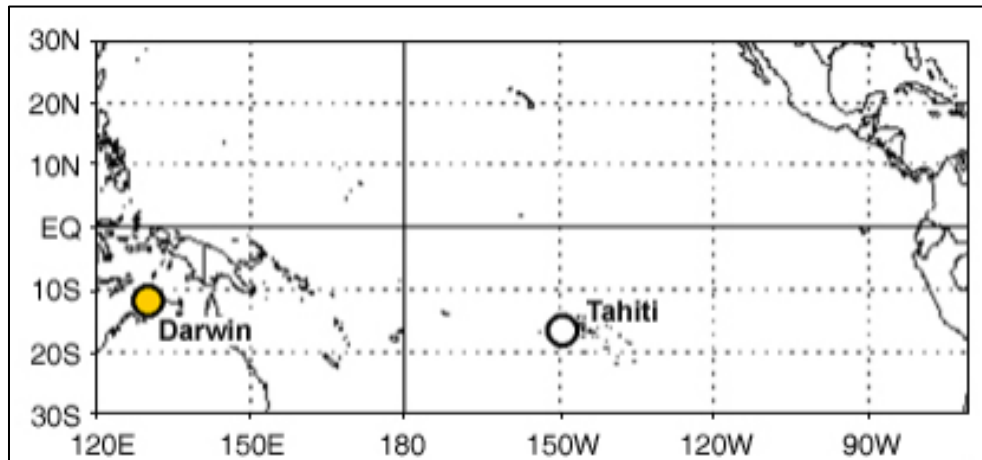


Figura 4.11. Ubicación de las localidades en las que se mide la presión atmosférica para el índice SOI. El signo de la diferencia entre los registros de Tahití y Darwin (Australia) indica la presencia de El Niño o La Niña [20].

5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Descripción del área de estudio

Coahuila de Zaragoza se encuentra localizado al norte de la República Mexicana entre las coordenadas $103^{\circ}57'36''W$ a $99^{\circ}50'35.16''W$ y $24^{\circ}32'33.72''N$ a $29^{\circ}52'48''N$, colinda al norte, al oeste y al este con los Estados Unidos de América, con Durango y Chihuahua al oeste, con Nuevo León al sur y al este, con Zacatecas y Durango al sur [22] [23].

El municipio de Piedras Negras se localiza al noreste del estado de Coahuila a una altura de 250 metros sobre el nivel del mar, dentro de la Región Hidrológica 24 Bravo – Conchos, que a su vez forma parte de la Región Hidrológica Administrativa (RHA) VI denominada Río Bravo; limita al norte con el municipio de Jiménez, al sur con Nava y Zaragoza, al este con los Estados Unidos de América y al oeste con Zaragoza (Figura 5.1).

El río Bravo fluye del norte hacia el noreste formando la línea divisoria entre los EE.UU y Piedras Negras; el río San Rodrigo proviene del este del municipio de Zaragoza y desemboca en el Bravo por el noreste de Piedras Negras, por el sur llega el río San Antonio que viene de Zaragoza para desembocar por el sureste en el río Bravo [23]; el río Escondido nace en la Sierra El Burro al noroeste de la ciudad de Piedras Negras y también desemboca en el en el río Bravo.

Debido a la escasa información hidrometeorológica al norte de México, se trazó un polígono de rastreo que envuelve 15 pluviómetros y 3 estaciones meteorológicas automáticas, esta zona abarca parte de algunos municipios ubicados en la franja norte del Estado de Coahuila, entre los que se distinguen Zaragoza y Piedras Negras, al sur San Juan de Sabinas y Sabinas, al este Villa Unión y Nava, y en la parte central los municipios de Morelos y Allende.

A continuación, en la Figura 5.1 se presenta la ubicación de Piedras Negras, en la Figura 5.2 se muestran las estaciones previamente identificadas y en la Tabla 5.1 sus respectivas coordenadas.

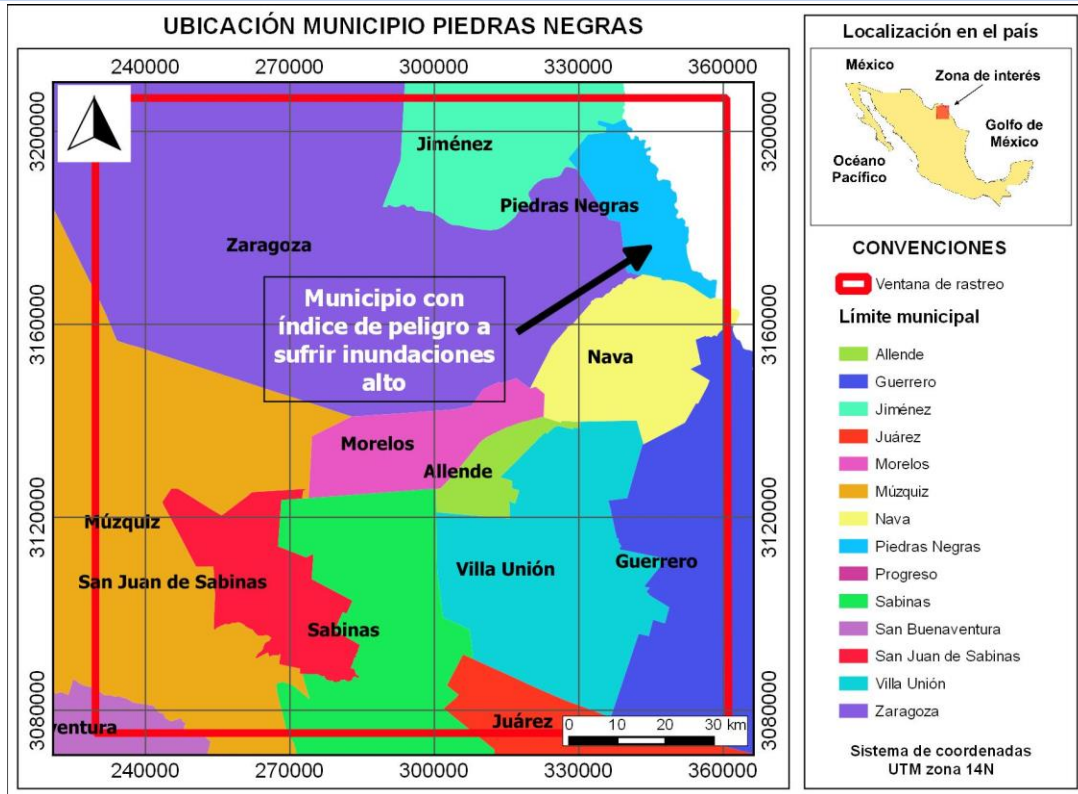


Figura 5.1. Ubicación general municipio Piedras Negras.

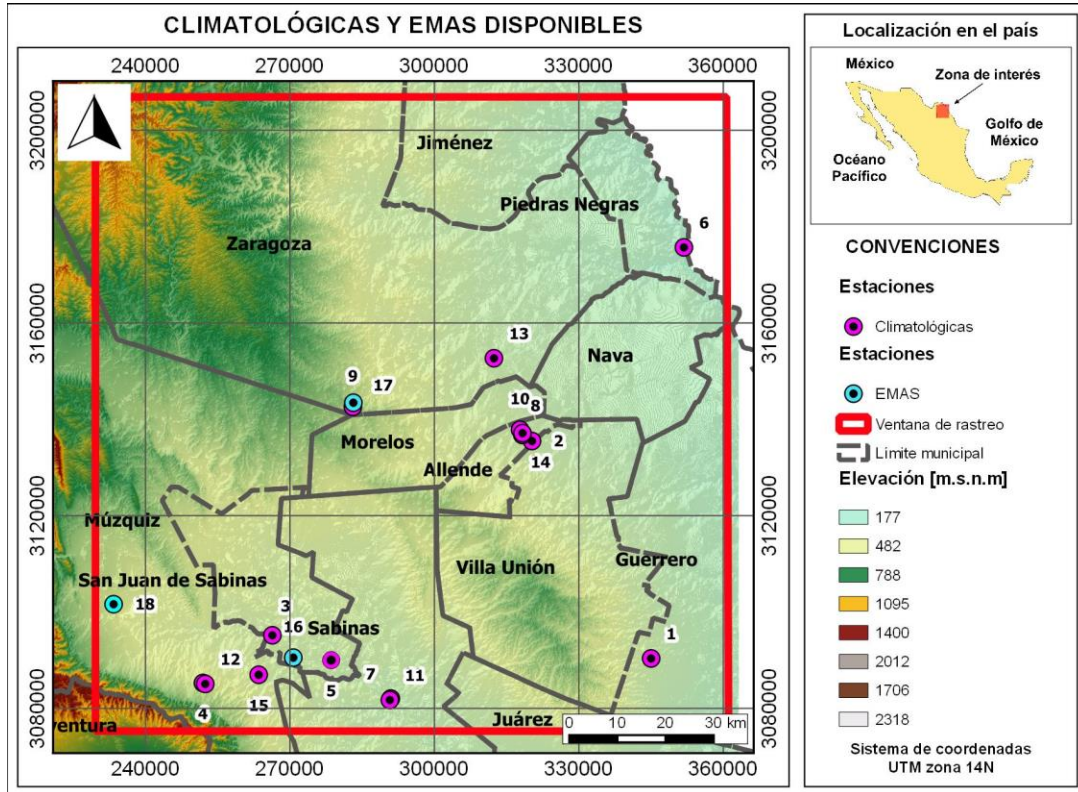


Figura 5.2. Estaciones climatológicas y EMAS disponibles.

Tabla 5.1. Información general estaciones climatológicas y EMAS.

Id	Código	Nombre	Tipo	Entidad (*)	Coordenadas (**)		Altitud [m.s.n.m]
					Longitud	Latitud	
1	5001	Agua Nueva	Climatológica	SMN	345,030	3,090,354	370
2	5002	Allende (SMN)	Climatológica	SMN	320,283	3,135,493	374
3	5008	Conchos	Climatológica	SMN	266,362	3,095,166	380
4	5020	Muzquiz (DGE)	Climatológica	SMN	251,938	3,085,260	450
5	5021	Nueva Rosita	Climatológica	SMN	278,572	3,090,007	369
6	5025	Piedras Negras (OBS)	Climatológica	SMN	351,843	3,175,691	250
7	5033	Sabinas (DGE)	Climatológica	SMN	290,961	3,082,026	339
8	5043	Allende II (DGE)	Climatológica	SMN	318,286	3,136,755	380
9	5057	El macho	Climatológica	SMN	283,087	3,142,584	560
10	5063	E.T.A. 110 Allende	Climatológica	SMN	317,813	3,137,840	380
11	5066	Sabinas (SMN)	Climatológica	SMN	290,764	3,081,722	339
12	5069	Muzquiz (SMN)	Climatológica	SMN	252,427	3,085,065	490
13	5074	Zaragoza (DGE)	Climatológica	SMN	312,384	3,152,674	360
14	5075	Allende I (DGE)	Climatológica	SMN	318,319	3,137,124	380
15	5156	Palau	Climatológica	SMN	263,522	3,086,968	430
16	--	Nueva Rosita	EMA	SMN	270,704	3,090,524	366
17	--	Santa Cecilia	EMA	SMN	283,185	3,143,444	595
18	--	Morelos – Muzquiz	EMA	SMN	233,386	3,101,613	492

(*) SMN: Servicio Meteorológico Nacional.

(**) Sistema de coordenadas UTM zona 14.

Las **estaciones pluviométricas con una longitud** de registro mayor o igual a 20 años fueron clasificadas según los índices ONI y SOI, con el objetivo de verificar la influencia del fenómeno ENSO en la precipitación del área de estudio.

Con ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView 3.2 y con el Modelo de Elevación Digital (DEM) de 15 pixeles de resolución, disponible en la página de INEGI [24], se trazó la cuenca río Escondido y se seleccionaron las estaciones contenidas en esta o en su defecto las más cercanas.

La cuenca se localiza en una región semidesértica drenando un área de 3,021 km² hasta la estación hidrométrica Villa de Fuente. La corriente principal se origina a una altitud de 1,000 msnm y recorre una distancia de 155 km hasta alcanzar una altitud de 245 m donde se ubica la estación hidrométrica. En esta región, las lluvias son de tipo convectivo, asociadas con frentes fríos y ocasionalmente con eventos ciclónicos [14].

A continuación, en la Figura 5.3 se presentan las estaciones seleccionadas para la modelación y en la Tabla 5.2 se observan algunas de las características fisiográficas de la cuenca.

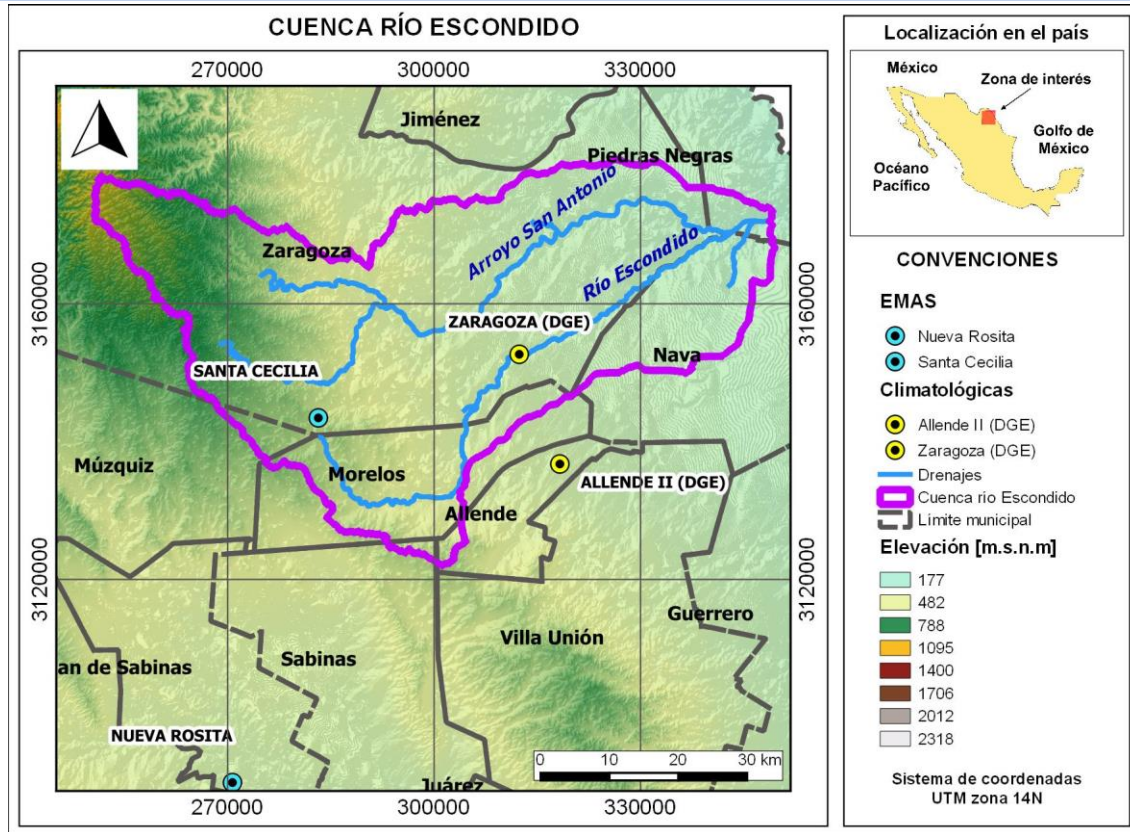


Figura 5.3. Cuenca río Escondido y registros de lluvia seleccionados para la modelación.

Tabla 5.2. Características fisiográficas de la cuenca.

Característica	Valor
Área [km ²]	3,021
Perímetro [km]	418.00
Longitud del cauce principal [km]	176.17
Pendiente del cauce principal [m/m]	0.005
X centroide [m]	301,298
Y centroide [m]	3,157,194

5.2 Factor de Reducción por Área (FRA)

Para la aplicación de modelos Lluvia – Esgurrimiento es necesario conocer la tormenta de diseño presentada en la cuenca de estudio; sabiendo que en un área determinada las lluvias no se presentan en forma simultánea, el factor de reducción por área es un coeficiente que sirve para convertir precipitaciones puntuales con una duración y período de retorno a precipitaciones distribuidas en áreas para la misma duración y periodo de retorno.

El factor de reducción por área permite estimar la magnitud de la altura de lluvia en una área a partir de la precipitación conocida en un sitio (P_p) mediante la siguiente expresión [25]:

$$P_a = FRA \cdot P_p \quad 5.1$$

Donde P_a es la precipitación distribuida en un área en mm y P_p es la precipitación puntual en mm.

Existen varios estudios en los que se ha obtenido el FRA para algunas zonas de la República Mexicana, infortunadamente ninguno corresponde a la región hidrológica 24, en este sentido, se utilizó la regresión logarítmica obtenida para el estado de Durango, por su cercanía al estado de Coahuila y similitud en la magnitud de precipitación media máxima anual; dicho factor se obtuvo con la siguiente expresión [25]:

$$FRA = -0.045 \cdot \ln(A) + 0.9808 \quad 5.2$$

Para la cuenca río Escondido se tiene:

$$FRA = -0.045 \cdot \ln(3,021) + 0.9808 \quad 5.3$$

$$FRA = 0.62 \quad 5.4$$

Donde A es el área de la cuenca en km².

5.3 Regionalización de llluvias

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México realizó en el año 2017 un «estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana», cuyo objetivo fue proporcionar resultados y herramientas para estimar gastos de diseño asociados a distintos periodos de retorno; su tomo II titulado «Análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2,000 estaciones pluviométricas» permite estimar hietogramas de diseño para distintos intervalos de tiempo y distintas duraciones totales de una tormenta para toda cuenca de México [25].

En dicho análisis se llevó a cabo un estudio regional a partir de la información de 2,381 (longitud de registro de por lo menos 20 años) pluviómetros para estimar precipitaciones de diseño asociadas a distintos periodos de retorno con duraciones menores que un día, para esto se retomaron los resultados de Baeza [26] y Mendoza [27], quienes usaron la información recopilada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (STC), datos de los boletines de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos, así como las Estaciones Meteorológicas Automáticas. La información se manejó regionalmente utilizando el concepto de conectividad [25].

Para el análisis se conformaron 66 regiones diferenciadas de acuerdo con el relieve del terreno y la forma en la que los fenómenos hidrometeorológicos extremos las afectan.

Se definieron regiones homogéneas desde el punto de vista de las precipitaciones máximas anuales. Para comprobar la hipótesis de homogeneidad se utilizó la prueba de Fisher y una comparación entre la distribución de los coeficientes de variación de una región considerada como homogénea y la que se obtiene al generar muestras aleatorias de una misma población.

Posteriormente, a cada muestra se le ajustó una función de distribución de probabilidad y se estimaron los valores asociados a distintos periodos de retorno; para calcular la precipitación de diseño basta con multiplicar el factor regional según el periodo de retorno deseado por la lluvia media del punto deseado.

En la siguiente tabla se presentan los factores regionales para el estado de Coahuila.

Tabla 5.3. Factores regionales por periodo de retorno, Coahuila, México [25].

Estado	Región	Función de distribución	Tr 2 años	Tr 10 años	Tr 50 años	Tr 100 años
Coahuila	Coahuila	Gumbel mixta	0.89	1.59	2.66	3.00

Con alguna frecuencia, cuando los estudios se realizan para cuencas grandes se requiere contar con tormentas de diseño de varios días. Por ello, se realizó el análisis de los datos históricos de las precipitaciones medias máximas anuales asociadas a duraciones de 2 a 30 días consecutivos, para Coahuila se muestran los resultados en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Relaciones entre las precipitaciones medias máximas asociadas a diferentes duraciones y las correspondientes a un día, Coahuila, México [25].

Estado	Región	2d/1d	3d/1d	4d/1d	5d/1d	8d/1d	10d/1d	20d/1d	30d/1d
Coahuila	Coahuila	0.63	0.46	0.37	0.31	0.22	0.19	0.12	0.09

Para obtener la precipitación de diseño para duraciones mayores que un día, basta con usar la siguiente ecuación de recurrencia:

$$D \cdot P_1 = \frac{\sum_1^n P_n}{n} \quad 5.5$$

Donde P_1 es la precipitación de diseño para un día, P_n es la precipitación asociada a duraciones de 2 a 30 días consecutivos, n es el número de días del hietograma de interés, y D son las relaciones entre las precipitaciones medias máximas asociadas a diferentes duraciones y las correspondientes a un día:

Para obtener entonces, la precipitación de diseño para duraciones de 2 a 5 días se tiene que:

$$P_2 = \frac{2D}{1D} \cdot P_1 \cdot 2 - P_1 \quad 5.6$$

$$P_3 = \frac{3D}{1D} \cdot P_1 \cdot 3 - P_1 - P_2 \quad 5.7$$

$$P_4 = \frac{4D}{1D} \cdot P_1 \cdot 4 - P_1 - P_2 - P_3 \quad 5.8$$

$$P_5 = \frac{5D}{1D} \cdot P_1 \cdot 5 - P_1 - P_2 - P_3 - P_4 \quad 5.9$$

5.4 Modelo para Pronóstico del Esgurrimiento (MPE)

Un modelo adecuado permite hacer una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca y puede ser utilizado en el diseño de obras para controlar inundaciones o para pronosticarlas oportunamente. Con base en él se pueden operar, además, obras ya construidas o emitir alarmas para movilizar a la población de una zona en riesgo, cuando sea necesario.

El Modelo para Pronóstico del Esgurrimiento [28] se desarrolló en lenguaje de programación Visual Basic, con el objeto de pronosticar los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de parámetros distribuidos. El método para la producción del escurrimiento está basado en el método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN), con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia; la transferencia de la escorrentía se hace con el método de Clark modificado.

Para modelar el proceso de transformación de la lluvia en escorrentía, se estudian dos partes:

- Con los modelos de producción se estima que parte de la lluvia se transforma en escurrimiento y que parte se transforma en pérdidas.
- Con los modelos de transferencia se estima cómo el escurrimiento se desplaza a través de las distintas partes de la cuenca hasta llegar al sitio de interés.

5.4.1 Modelo de precipitación

La lluvia distribuida en la cuenca se obtiene interpolando los registros pluviográficos o de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) con el método de Shepard, el cual es parecido al del inverso de la

distancia, pero introduce procedimientos de mínimos cuadrados y se obtienen factores de peso correspondientes a cada estación.

La función $h_p: z = h_p(x, y)$ para $(x, y) \in B$, donde B es una región arbitrara del plano (x, y) , se interpola para los puntos (x_j, y_j) dados por la función:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N w_j(x, y) \cdot h_{pj} \quad 5.10$$

Donde el fator de peso de cada estación se determina como:

$$w_j(x, y) = \frac{\frac{1}{r_j^\mu}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^\mu}}, \quad 0 < \mu < \infty \quad 5.11$$

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}, \quad j = 0, 1, \dots, N \quad 5.12$$

Donde:

$\phi(x, y)$: punto por interpolar

N : número de estaciones de lluvia

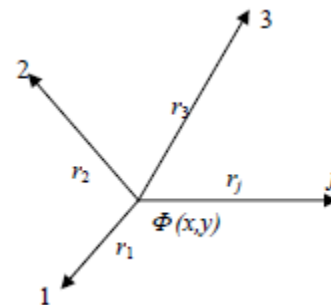
w_j : factor de peso en la estación j

h_{pj} : lluvia en la estación j

$r_j(x, y)$: distancia desde el punto (x, y) a la estación j

μ : coeficiente de calibración

Se recomienda que $2 \leq \mu \leq 6$



A la ecuación (5.10) se le llama método global o general de Shepard, debido a que considera todos los puntos N . En algunas ocasiones es necesario limitar el número de datos por interpolar. Shepard ha indicado una modificación para el cálculo de $w_j(x, y)$, la cual utiliza solamente los puntos (x_j, y_j) , de un círculo de radio R alrededor del punto (x, y) . A este procedimiento se le llama método local de Shepard, donde w se determina con los parámetros de Franke-Little:

$$\xi_j(x, y) = \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x, y) < R \\ 0 & \text{para } r_j(x, y) \geq R \end{cases} \quad 5.13$$

Donde:

R : distancia máxima a considerar para hacer la interpolación

$r_j(x, y)$: distancia desde el punto (x, y) a la estación j

La ecuación para determinar el factor de peso w resulta:

$$w_j(x, y) = \frac{\xi_j^\mu(x, y)}{\sum_{i=0}^N \xi_i^\mu(x, y)} \quad 5.14$$

5.4.2 Modelo de producción del escurrimiento

El método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) se basa en la ecuación del balance hídrico (Figura 5.4) y en dos hipótesis fundamentales: la primera hipótesis establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima, la segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial.

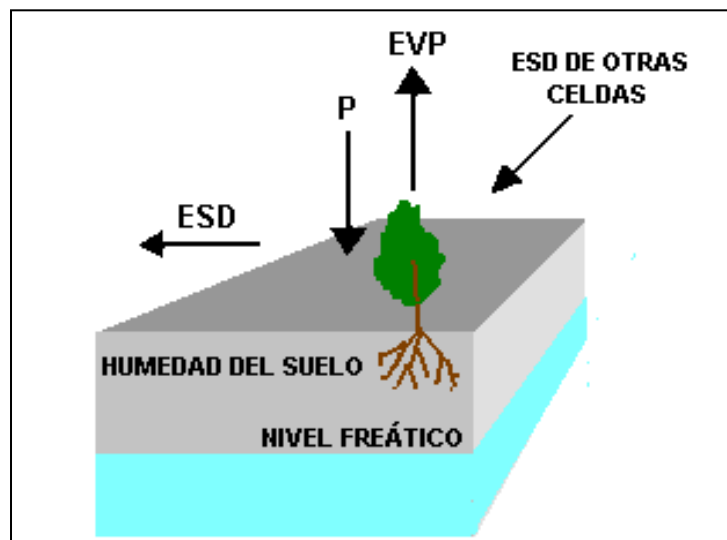


Figura 5.4. Balance hidrológico en una celda (P: precipitación, EVP: evapotranspiración, ESD: escorrentía).

La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son respectivamente:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad 5.15$$

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad 5.16$$

$$I_a = \lambda \cdot S \quad 5.17$$

Donde:

P : precipitación total

I_a : infiltración inicial

F_a : infiltración acumulada

P_e : precipitación efectiva

S : infiltración potencial máxima

La versión actual del método supone que $I_a = 0.2S$ para aplicaciones prácticas.

La forma más extendida del método se determina a partir de la combinación de las ecuaciones (5.15), (5.16) y (5.17), resultando:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}; \quad I_a \leq P \quad 5.18$$

Sustituyendo $I_a = 0.2S$ en la ecuación (5.18):

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad 5.19$$

El valor de S , en centímetros, está dada por:

$$S = \frac{2540 - (25.4 \cdot CN)}{CN} \quad 5.20$$

Sustituyendo la ecuación (5.20) en la ecuación (5.19), se obtiene:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad 5.21$$

Donde CN es el número de curva, determinado a partir del uso y tipo de suelo, además:

P : precipitación total en cm

I_a : infiltración inicial en cm

F_a : infiltración acumulada en cm

P_e : precipitación efectiva en cm

S : infiltración potencial máxima en cm

5.4.3 Pérdidas por evapotranspiración

Para considerar el secado del suelo después de una lluvia, se agregó en el cálculo de la precipitación un parámetro que se denominó factor de olvido, el cual hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo.

Con el factor de olvido se consideran las pérdidas por evapotranspiración que se presentan después de cierto tiempo cuando no ocurre otra. De lo contrario, al presentarse un segundo evento de lluvia, el suelo se encontraría saturado y escurriría todo lo que llueve, lo cual no es real. Al usar el factor de olvido, se calcula una precipitación acumulada “neta”.

$$P_{an} = P_1 \cdot f_x^{n-1} + P_2 \cdot f_x^{n-2} + \dots + P_n \cdot f_x^{n-n} \quad 5.22$$

Donde:

P_{an} : precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo n en cm

P_n : precipitación en el intervalo de tiempo n en cm

f_x : factor de olvido, menor de uno

La precipitación acumulada neta sustituye a la acumulada total P en la ecuación (5.21) para estimar la precipitación efectiva. Cuando se requiere calibrar eventos de varios días, se recomienda:

Para menor evapotranspiración, mayor escurrimiento, aumentar el valor de f_x ; para mayor evapotranspiración, menor escurrimiento, disminuir el valor de f_x ; en cualquier caso, $0 \leq f_x \leq 1$.

5.4.4 Modelo de transferencia de escurrimiento

La transferencia de la esorrentía desde cualquier punto de la cuenca hasta su salida se puede modelar por medio de una agregación simple, usando un hidrograma unitario distribuido. El método más popular es el hidrograma unitario distribuido de Clark modificado (Figura 5.5), que consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta la salida, combinando un mapa de isócronas (curvas de igual tiempo de viaje) con la regulación en un embalse lineal.

Este método requiere la estimación de tres parámetros para determinar el hidrograma de la cuenca: el histograma tiempo – área, el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de atenuación por almacenamiento (Ca).

El tiempo de concentración T_c se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto hidráulicamente más remoto. La ecuación empleada por el modelo MPE es la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \cdot \left(\frac{L^{0.770}}{S^{0.385}} \right) \quad 5.23$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración en h

L : longitud del cauce principal en m

S : pendiente del cauce principal

El coeficiente de atenuación por almacenamiento, Ca , es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural. Para usos prácticos:

$$Ca = 0.6 \cdot T_c \quad 5.24$$

Siendo:

Ca : el coeficiente de almacenamiento en h

T_c : tiempo de concentración en h

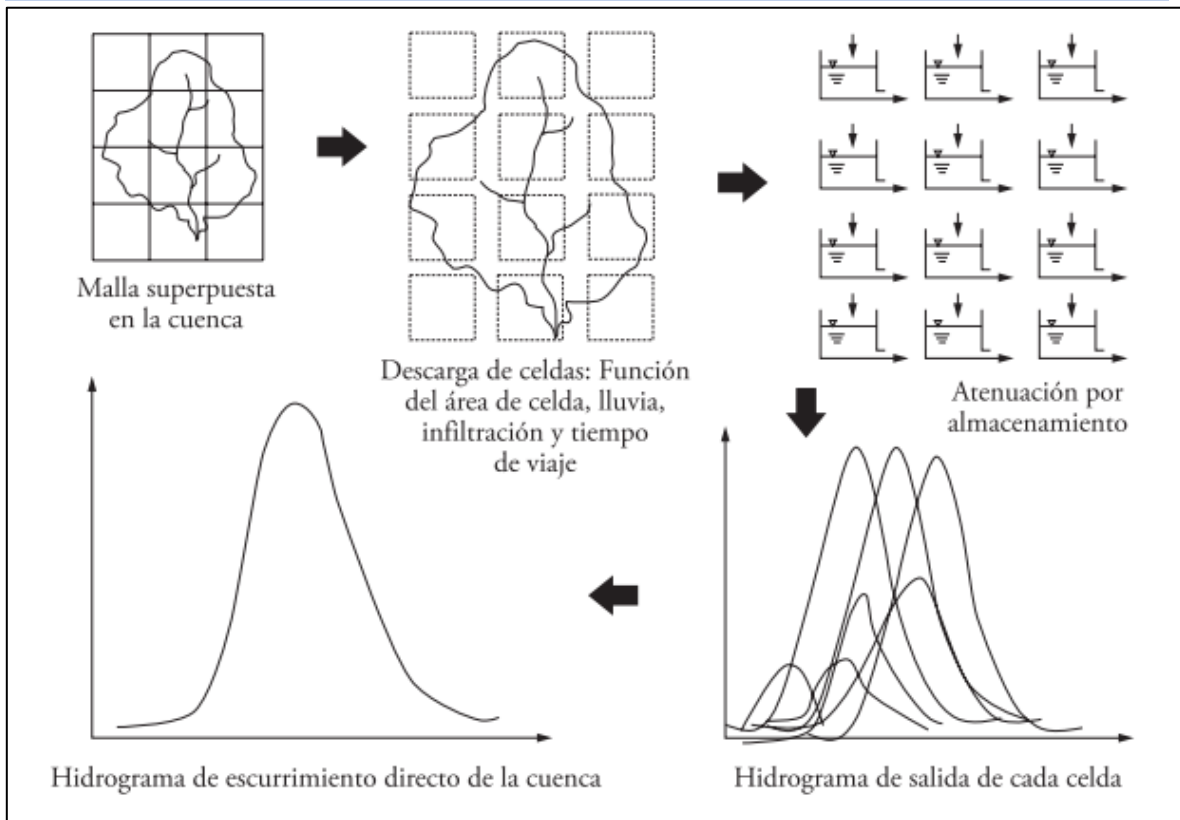


Figura 5.5. Modelo conceptual de escurrimiento directo de Clark modificado para parámetros distribuidos [14].

Al escurrimiento transitado se le aplica el método de Muskingum, para considerar el tiempo de retraso por almacenamiento:

$$S_{prisma} = k \cdot O \quad 5.25$$

$$S_{cuña} = k \cdot x \cdot (I - O) \quad 5.26$$

$$S = k \cdot [x \cdot I + (1 - x) \cdot O] \quad 5.27$$

Donde:

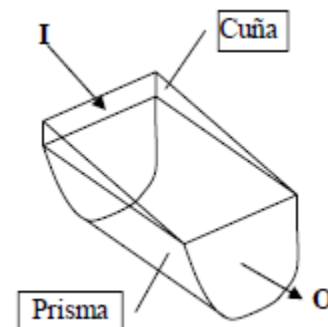
S : almacenamiento en el tramo considerado

I : caudal de entrada en ese tramo

O : caudal de salida de ese tramo

k, x : constantes, para ese tramo del cauce

Aplicado a dos intervalos de tiempo se tiene:



$$S_1 = k \cdot [x \cdot I_1 + (1 - x) \cdot O_1] \quad 5.28$$

$$S_2 = k \cdot [x \cdot I_2 + (1 - x) \cdot O_2] \quad 5.29$$

$$O_2 = C_0 \cdot I_2 + C_1 \cdot I_1 + C_2 \cdot O_1 \quad 5.30$$

$$C_0 = \left(\frac{-k \cdot x + 0.5\Delta t}{k - k \cdot x - 0.5\Delta t} \right) \quad 5.31$$

$$C_1 = \left(\frac{k \cdot x + 0.5\Delta t}{k - k \cdot x - 0.5\Delta t} \right) \quad 5.32$$

$$C_2 = \left(\frac{k - k \cdot x - 0.5\Delta t}{k - k \cdot x + 0.5\Delta t} \right) \quad 5.33$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad 5.34$$

Despreciando el almacenamiento en cuña $x = 0$, resulta:

$$C_0 = C_1 = \left(\frac{0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad 5.35$$

$$C_2 = \left(\frac{k - 0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad 5.36$$

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad 5.37$$

El histograma tiempo – área representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la misma, en un tiempo dado. Esta área se obtiene mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca. Lo anterior se complementa sea estimando el escurrimiento en las laderas y el tiempo de viaje de la corriente principal o simplemente suponiendo una velocidad de viaje constante, dada por la relación entre la distancia del punto más alejado de la salida de la cuenca entre el tiempo de concentración.

Una vez determinado el tiempo de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca, el área de esta se divide en zonas de igual tiempo de viaje (isócronas). Al relacionar las áreas entre isócronas con el intervalo de tiempo correspondiente se obtiene el histograma tiempo – área de la cuenca.

En el SIG ArcView 3.2 se obtuvieron las longitudes de viaje de cada celda, que posteriormente fueron convertidas por el programa MPE en tiempos de viaje para crear las isócronas que requiere el método de Clark modificado para la transferencia del escurrimiento:

$$T_t = T_c \cdot \left(\frac{L_{vN}}{L_{vn}} \right) \quad 5.38$$

Donde:

T_c : tiempo concentración en h

T_t : tiempo de tránsito o tiempo de viaje desde la celda que se analiza en h

L_{vN} : longitud de viaje de la celda más lejana

L_{vn} : longitud de viaje de la celda que analiza

Los modelos hidrológicos deben ser calibrados y verificados antes de utilizarse en análisis y diseños de ingeniería; para cada cuenca en particular es necesario calibrar los parámetros I_a , S y f_x (llamados parámetros de pérdidas) y los parámetros T_c y k (llamados parámetros de forma).

5.5 Recopilación de la información

5.5.1 Tiempo de concentración

Reemplazando en la ecuación (5.23) la pendiente y la longitud del cauce principal para la cuenca río Escondido se obtiene:

$$T_c = 0.000325 \cdot \left(\frac{176,173^{0.77}}{0.005^{0.385}} \right) \quad 5.39$$

$$T_c \approx 27 \text{ horas} \quad 5.40$$

5.5.2 Coeficiente de atenuación por almacenamiento k

Reemplazando el tiempo de concentración obtenido en la ecuación (5.24):

$$k = 0.6 \cdot 27 \text{ horas} \quad 5.41$$

$$k \approx 16 \text{ horas} \quad 5.42$$

El MPE requiere de un intervalo de tiempo Δ_t en minutos para el cálculo del pronóstico del escurrimiento, en este caso se eligió a prueba y error un intervalo Δ_t equivale a 240 minutos.

Son necesarios como insumos de entrada los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla:

- a) Un archivo de celdas con extensión .txt que contiene las coordenadas SHG (Standard Hydrologic Grid), X, Y del centro de la celda, longitud de viaje, área y el número de curva.
- b) Un archivo de lluvia con extensión .txt que contiene el registro de las tormentas de diseño, con información de las coordenadas UTM y los valores de lluvia de cada estación en cada intervalo Δ_t en minutos.
- c) Un archivo de caudal con extensión .txt que contiene la información de los escurrimientos observados durante el evento de la tormenta, los cuales servirán para calibrar el hidrograma calculado.

5.5.3 Archivo de celdas

El archivo de celdas se obtuvo con el software ArcView 3.2 con ayuda de la extensión Hec – GeoHMS, se generó un archivo en forma de malla que contiene las propiedades hidrológicas de la cuenca por celda.

Por otro lado, la determinación del número de curva se llevó a cabo mediante el álgebra de mapas de tipo y uso de suelo del INEGI, considerando el grupo hidrológico al que pertenece el suelo, así como de la cubierta vegetal y la pendiente del terreno.

5.5.4 Archivo de lluvias

Se revisó el registro diario de los dos únicos pluviómetros localizados uno dentro y el otro cerca de la cuenca de estudio, que son: 5074 Zaragoza (DGE) y 5043 Allende II (DGE), se consideró también el caudal pico registrado en la estación hidrométrica Villa de Fuente (salida de la cuenca); mediante inspección visual se determinó que la tormenta de diseño se presenta los días 3, 4, 5, 6 y 7 de julio del 2010, la cual se podría asociar al huracán Alex ocurrido en julio del mismo año.

A continuación, se presenta el comportamiento del gasto en el año 2010 (Figura 5.6).

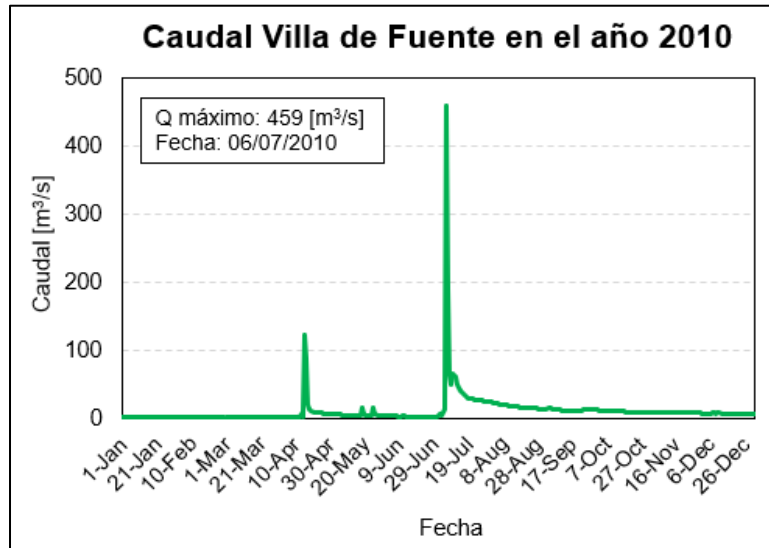


Figura 5.6. Caudal máximo Villa de Fuente – julio 6 de 2010.

La escasez de datos de lluvia es una problemática que enfrentan los hidrólogos, particularmente en la modelación hidrológica de una cuenca, se recurrió entonces al uso de los dos registros más cercanos de estaciones EMAS: Nueva Rosita y Santa Cecilia, cuyos datos están a intervalos de cada 10 minutos. Para obtener la tormenta de diseño se procedió así:

- Se obtuvo la lluvia diaria acumulada cada Δ_t de 240 minutos para los días de tormenta.
- Se determinó la relación de la lluvia horaria con la lluvia acumulada en 24 horas.

$$P_r = \frac{P_i}{P_i^{24}} \quad 5.43$$

Donde:

P_r : relación entre la lluvia horaria y la lluvia acumulada en 24 horas

P_i : es la precipitación horaria para $i = 1, 2, 3, \dots, 24$ horas

P_i^{24} : es la precipitación acumulada en 24 horas.

- Una vez obtenida la relación P_r , se promediaron los valores obtenidos para Santa Cecilia y Nueva Rosita.
- Dicho valor promediado se multiplicó por la precipitación registrada en cada pluviómetro durante los días de la tormenta, de esta manera se obtuvieron los registros horarios para 5074 Zaragoza (DGE) y 5043 Allende II (DGE).
- Finalmente, a Nueva Rosita se le asignaron los valores de 5074 Zaragoza (DGE) y a Santa Cecilia los de 5043 Allende II (DGE); se obtuvieron 4 tormentas de diseño de entrada al modelo MPE.

A continuación, se presentan las tormentas obtenidas para 5074 Zaragoza (DGE) y 5043 Allende II (DGE):

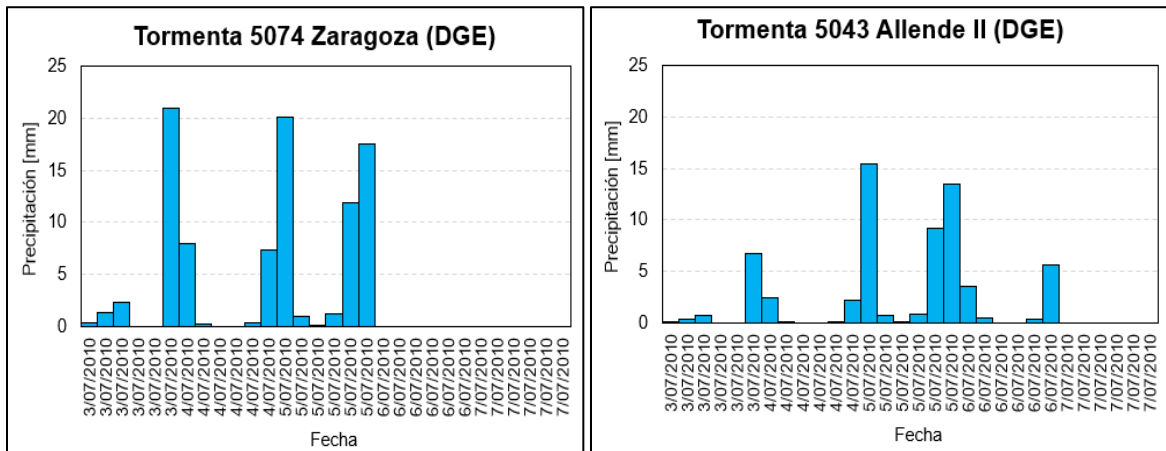


Figura 5.7. Tormentas de diseño 3 al 7 de julio de 2010 estaciones: (a) 5074 Zaragoza (DGE) y (b) 5043 Allende II (DGE).

Cabe señalar que la máxima precipitación acumulada por día ocurre el día 5 de julio (en ambas estaciones), la respuesta de la cuenta se da al día siguiente siendo congruente con el tiempo de concentración de 27 h.

5.5.5 Archivo de caudales

Infortunadamente la estación hidrométrica Villa de Fuente no cuenta con registros a escala horaria sino diaria, en este sentido, se decidió usar el caudal medio diario para cada día de tormenta a intervalos de 240 minutos durante cada 24 horas (Figura 5.8).

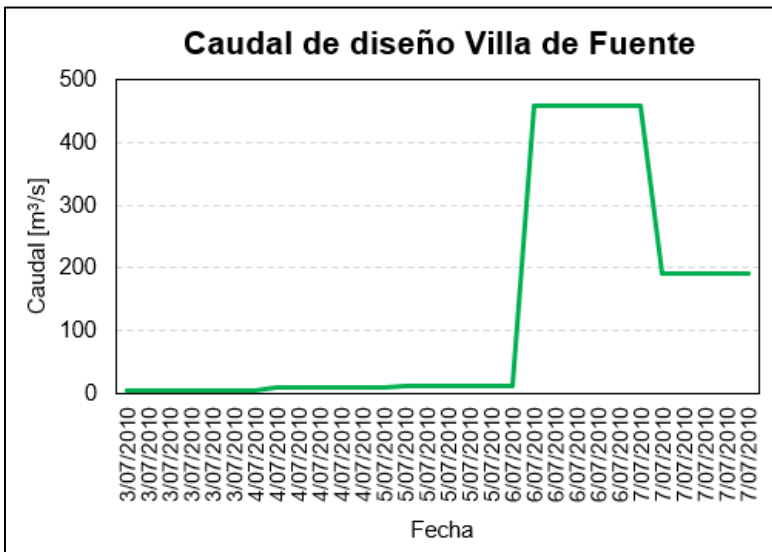


Figura 5.8. Caudal de diseño estación Villa de Fuente.

5.5.6 Tipo y uso de suelo

En la Figura 5.9 se observa el tipo de suelo presente en la cuenca río Escondido:

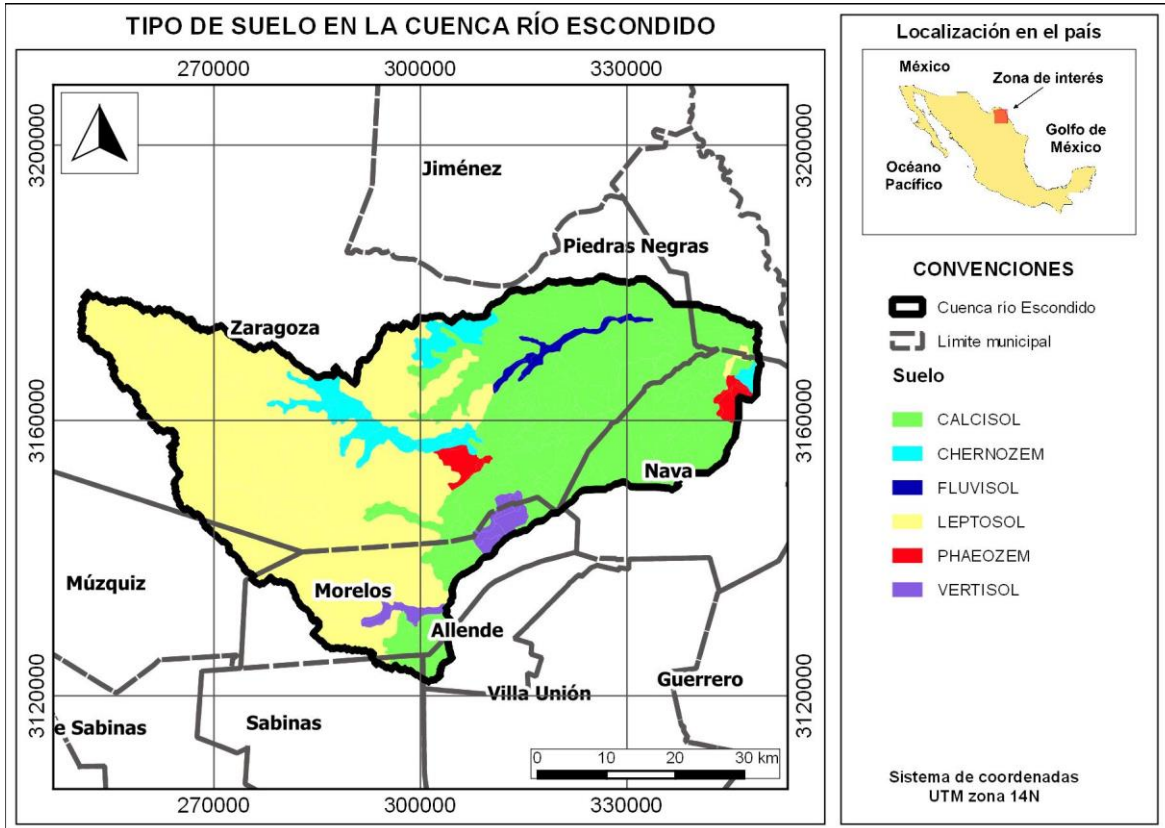


Figura 5.9. Tipo de suelo en la cuenca río Escondido.

Calcisoles: son suelos constituidos por depósitos aluviales, coluviales o eólicos de materiales alterados ricos en bases. Se asocian con un clima árido o semiárido [29].

Chernozem: son suelos con una capa superficial gruesa, negra y rica en materia orgánica. El material original lo constituyen depósitos eólicos principalmente [30].

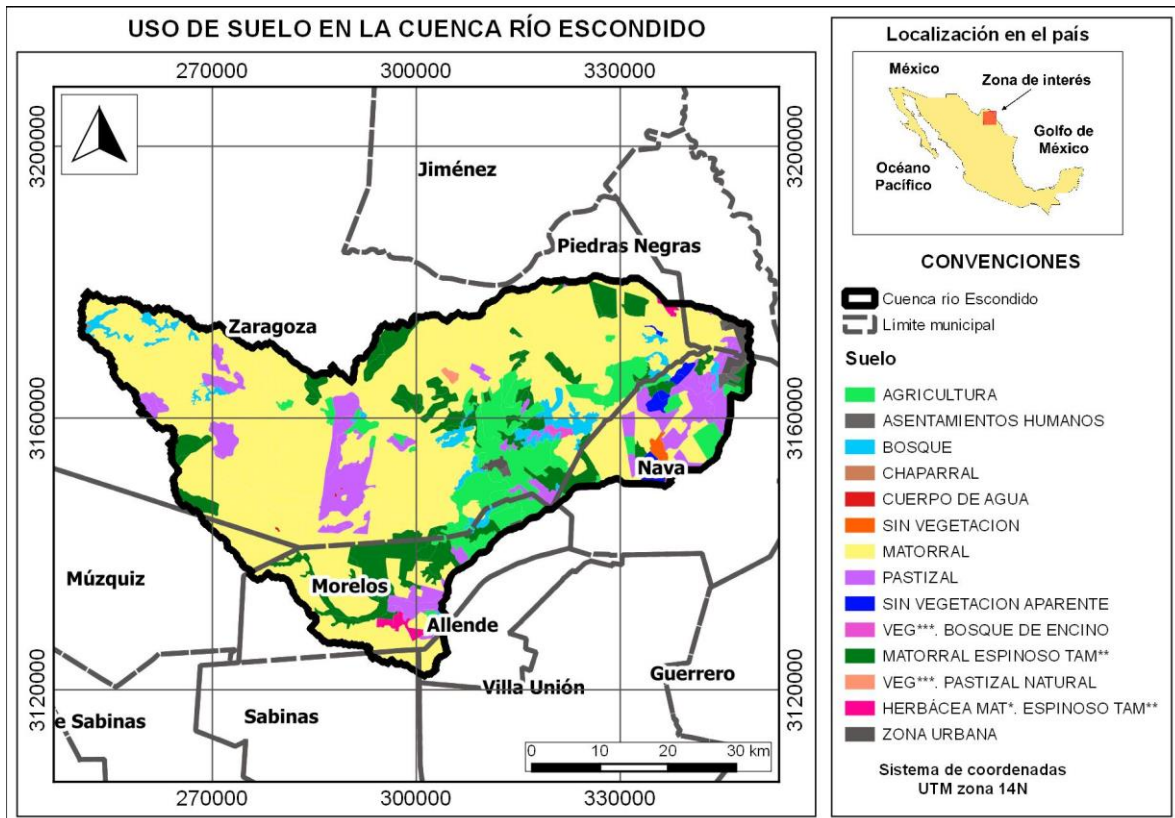
Fluvisoles: son suelos desarrollados sobre depósitos aluviales. El material original lo constituyen depósitos predominantemente recientes de origen fluvial, lacustre o marino [31].

Leptosoles: son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo [29].

Phaeozems: son suelos oscuros y ricos en materia orgánica por lo que son muy utilizados en agricultura temporal [29].

Vertisoles: son suelos que se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en temporada seca [29].

En la Figura 5.10 se observa el uso de suelo en la cuenca del río Escondido, la mayor parte de su superficie está cubierta por matorrales, en menor dimensión agricultura, matorral espinoso de Tamaulipas y pastizales, concordando con los tipos de suelos mencionados.



*** VEG: vegetación, ** TAM: Tamaulipas, * MAT: matorral

Figura 5.10. Uso de suelo en la cuenca río Escondido.

La segunda parte de esta investigación está enfocada en verificar la influencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur en la precipitación registrada a escala global en el área de estudio.

5.6 Influencia del fenómeno ENSO en la precipitación del área de estudio

La variabilidad climática corresponde a todas aquellas variaciones temporales de las condiciones climáticas medias dadas en condiciones predominantes durante un periodo determinado, generadas por procesos naturales internos y/o espaciales en diversas escalas. Los procesos naturales que influyen en la variabilidad de la hidroclimatología de una región, pueden ser fenómenos macroclimáticos de comportamiento global como el fenómeno ENSO, o también fenómenos microclimáticos de escala local que se originan por la interacción y complejidad de sus sistemas abióticos y bióticos (efecto orográfico, retroalimentación suelo – biosfera – atmósfera, entre otros). En la Figura 5.11 se presenta un polígono de rastreo que constituye la ventana a escala regional del área de interés, se seleccionaron las estaciones más cercanas a la cuenca río Escondido y cuya longitud de registro fue mayor o igual a 20 años con el fin de lograr una mejor caracterización, bajo este criterio se realizó una depuración de estaciones de lluvia, siendo elegibles 11 de ellas (Tabla 5.5).

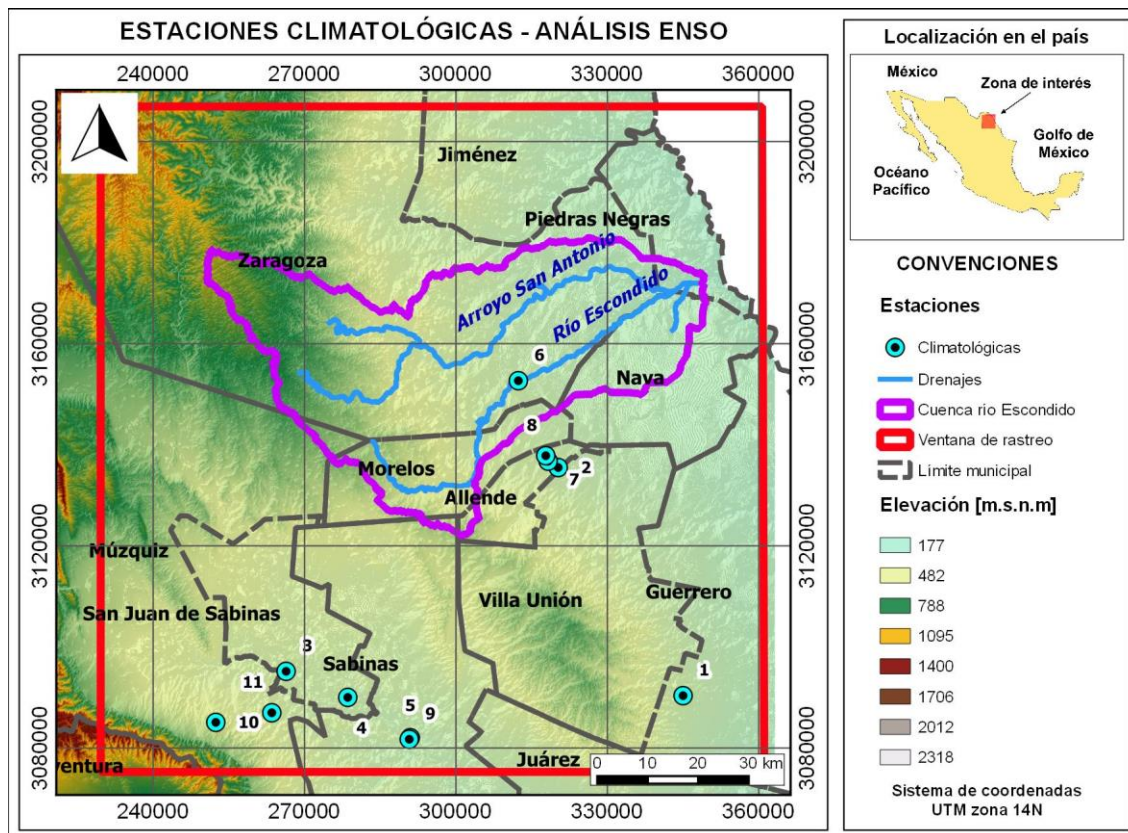


Figura 5.11. Estaciones climatológicas para el análisis del fenómeno ENSO.

Tabla 5.5. Información de los registros de lluvia elegibles, para verificación de la influencia del fenómeno ENSO.

Id	Código	Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin	Longitud de registro [años]	Coordenadas (**)	
						Longitud	Latitud
1	5001	Agua Nueva	1950	1969	20	345,030	3,090,354
2	5002	Allende (SMN)	1950	1986	37	320,283	3,135,493
3	5008	Conchos	1951	1985	35	266,362	3,095,166
4	5021	Nueva Rosita I	1950	1971	22	278,572	3,090,007
5	5033	Sabinas (DGE)	1953	2013	61	290,961	3,082,026
6	5074	Zaragoza (DGE)	1977	2013	37	312,384	3,152,674
7	5043	Allende II (DGE)	1954	2013	60	318,286	3,136,755
8	5063	E.T.A. 110 Allende	1975	2004	30	317,813	3,137,840
9	5066	Sabinas (SMN)	1950	1974	25	290,764	3,081,722
10	5069	Muzquiz (SMN)	1954	1977	24	252,427	3,085,065
11	5156	Palau	1981	2013	33	263,522	3,086,968

(**) Sistema de coordenadas UTM zona 14.

Para identificar la influencia del fenómeno ENSO en la precipitación del área de estudio se realizaron cuatro evaluaciones con relación a los índices macroclimáticos ONI y SOI, que se describen a continuación:

5.6.1 Dispersión de datos y regresión lineal simple

Los gráficos de dispersión se usan para trazar puntos de datos en un eje vertical y uno horizontal, mediante lo que se trata de mostrar cuánto afecta una variable a otra, además de permitir detectar posibles valores atípicos o extremos.

La regresión está dirigida a describir cómo es la relación entre dos variables X e Y, de tal manera que incluso se pueden hacer predicciones sobre los valores de la variable Y (precipitación), a partir de los de X (ONI), cuando la asociación entre ambas variables es fuerte. Esta técnica en su forma más sencilla se llama regresión lineal simple, se trata de una técnica estadística que analiza la relación entre dos variables cuantitativas, tratando de verificar si dicha relación es lineal [32].

5.6.2 Análisis de correlación gráfica

Para el análisis de correlación a escala interanual, la variable de interés debe ser estandarizada, dado que el ciclo anual (bimodal o unimodal), aporta estacionalidad a la serie mostrando dependencia temporal, lo cual es no deseable para los análisis estadísticos de correlación [33].

La precipitación se estandariza al restarle a cada observación de la serie, el valor promedio de la misma y dividir dicho resultado entre la desviación estándar de los datos.

5.6.3 Variación interanual – correlación cruzada

La correlación cruzada, permite identificar asociaciones de dos series temporales de eventos climatológicos en tiempos simultáneos y en períodos desfasados (rezago o lag), para lo cual fue necesario contar con las series estandarizadas de las variables climatológicas de interés. Según la literatura técnica se considera que $\frac{1}{4}$ del número de datos es aceptable como el número total de desfases [34].

El correlograma cruzado muestra las variaciones del coeficiente de correlación con las variaciones del periodo de desfase o lag considerado, en este caso, se determina la correlación cruzada entre los índices macroclimáticos y la lluvia, la cual se va rezagando o desplazando cada mes, mediante la siguiente ecuación.

$$r_{xy(k)} = \frac{\sum[(x_t - \mu_x) \cdot (y_{t+k} - \mu_y)]}{N \cdot S_x \cdot S_y} \quad 5.44$$

Donde:

$r_{xy(k)}$: es la correlación cruzada para un lag o retardo positivo entre las variables x e y

x_t : es el valor de un dato en el tiempo t

μ_x : es la media de la variable x

S_x : es la desviación estándar de la variable x

k : lag o rezago

y_{t+k} : es el valor de un dato en un tiempo posterior k

μ_y : es la media de la variable y

S_y : es la desviación estándar de la variable y

N : es el número de datos

Se determinaron también las bandas de confianza al 95% con el fin de ver que tan significativa o no es la correlación cruzada:

$$Banda Superior = \frac{1.96}{\sqrt{N - k}} \quad 5.45$$

$$Banda Inferior = -\frac{1.96}{\sqrt{N - k}} \quad 5.46$$

Donde N es el número de datos y k es el rezago o lag en meses, al incluir k en el denominador se consigue que N vaya disminuyendo conforme el rezago crece, ampliando entonces la banda de confianza; consistentemente con el coeficiente de correlación que también es mayor.

Se acepta que un coeficiente de correlación cruzada es estadísticamente significativo (estadísticamente diferente a cero) al 95% de confianza, cuando se cumple que:

$$r_{xy(k)} > \frac{1.96}{\sqrt{N - k}} \quad 5.47$$

5.6.4 Variación estacional – correlación lineal simple

En muchas ocasiones, los efectos de La Niña y El Niño, son más fuertes y notorios en ciertas temporadas del año, mientras que en otras, la correlación general puede incluso llegar a invertirse, es por esto que se realizó el análisis de correlación mediante el coeficiente lineal de Pearson a escala intra – anual, seleccionando los trimestres principales: junio, julio, agosto (JJA); septiembre, octubre, noviembre (SON); diciembre, enero, febrero (DEF) y marzo, abril, mayo (MAM) [33].

5.6.5 Precipitación regional bajo fases del ENSO

Los análisis presentados dan cuenta de una correlación entre los registros de precipitación y el fenómeno del ENSO, en esta sección se sugiere la construcción de los ciclos promedios anuales de lluvia para cada estación seleccionada, clasificando los años hidrológicos (comprendidos entre junio del año 0 y mayo del año +1) de acuerdo a las tres (3) fases del ENSO: El Niño, La Niña y la fase Normal y utilizando el índice ONI como indicador de la ocurrencia de este fenómeno [33].

La finalidad de este análisis es reforzar o clarificar la incidencia del fenómeno macroclimático sobre el régimen intra – anual de precipitaciones en la zona de análisis.

6. APLICACIÓN Y RESULTADOS

6.1 Calibración del modelo

Haciendo uso del archivo de celdas, archivo de lluvias y archivo de caudales como parámetros de entrada y con la tormenta definida los días 3, 4, 5, 6 y 7 de julio de 2010, se procedió a ejecutar el software MPE. El punto de partida para la calibración del modelo es la comparación entre el escurrimiento calculado y observado.

PARAMETROS DE CALIBRACIÓN

PARAMETROS DE PERDIDAS

Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)

Factor de Escala de Retención Potencial

Factor de olvido

PARAMETROS DE FORMA

Tiempo de concentración (hr):
 $T_c > \Delta t$

Coeficiente de Almacenamiento (hr):
 $C_a > \Delta t/2$

ESCURRIMIENTO BASE

Escorrimento Constante m³/s

Método de Recesión

Gasto Inicial: m³/s

Cte de Recesión:

Gasto Final: m³/s

Sin Escorrimento Base

Hidrograma Restaurar Cerrar

Figura 6.1. Parámetros de calibración inicial.

Parámetros de pérdidas:

El factor de escala de pérdida inicial (λ) se tomó como se recomienda en la literatura para aplicaciones prácticas; se modificó a prueba y error el factor de escala de retención potencial (f_s) que varía o modifica la retención del suelo y, por tanto, el valor del número de curva, al ir incrementando este valor se está considerando mayor permeabilidad en el terreno y menor volumen de escurrimiento; finalmente el factor de olvido (f_x) toma un valor un poco menor a la unidad, permitiendo mayor evapotranspiración y menor escurrimiento. Lo anterior en función de las características identificadas en la cuenca.

Parámetros de forma:

El tiempo de concentración calculado mediante la ecuación de Kirpich, fue de 27 horas, mientras que el coeficiente de almacenamiento se tomó como se recomienda en la literatura técnica ($0.6 \cdot T_c$), es decir 16 horas aproximadamente.

A continuación, se presenta una tabla con el resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 6.1. Tabla resumen, calibración inicial.

Área cuenca [km ²]	Lluvia			Volumen Escurrido [Mm ³]		Caudal máximo [m ³ /s]	
	Lluvia media [mm]	Pérdidas [mm]	Lluvia en exceso [mm]	Total observado	Total calculado	Observado	Calculado
3,020.495	67.486	47.568	19.918	55,929.312	60,738.529	459.000	381.794

Procurando tomar una postura conservadora ante la aceptación de resultados, se observa en la Tabla 6.1 que el volumen calculado sobrepasa al observado en 4,809.217 Mm³, infortunadamente al no contar con un hidrograma de entrada horario la representación gráfica dista entre sí, se calculó entonces el coeficiente de escurrimiento realizando el cociente entre la lluvia en exceso y la lluvia media, obteniendo un valor de 0.30, que para cuencas no urbanizadas y con la escasa información disponible es adecuado y permite aceptar los resultados iniciales.

Es importante aclarar que esta calibración únicamente sirve de base al momento de estimar los escurrimientos para diferentes periodos de retorno.

A continuación, en la Figura 6.2 se observa el comportamiento gráfico del caudal observado y el caudal calculado.

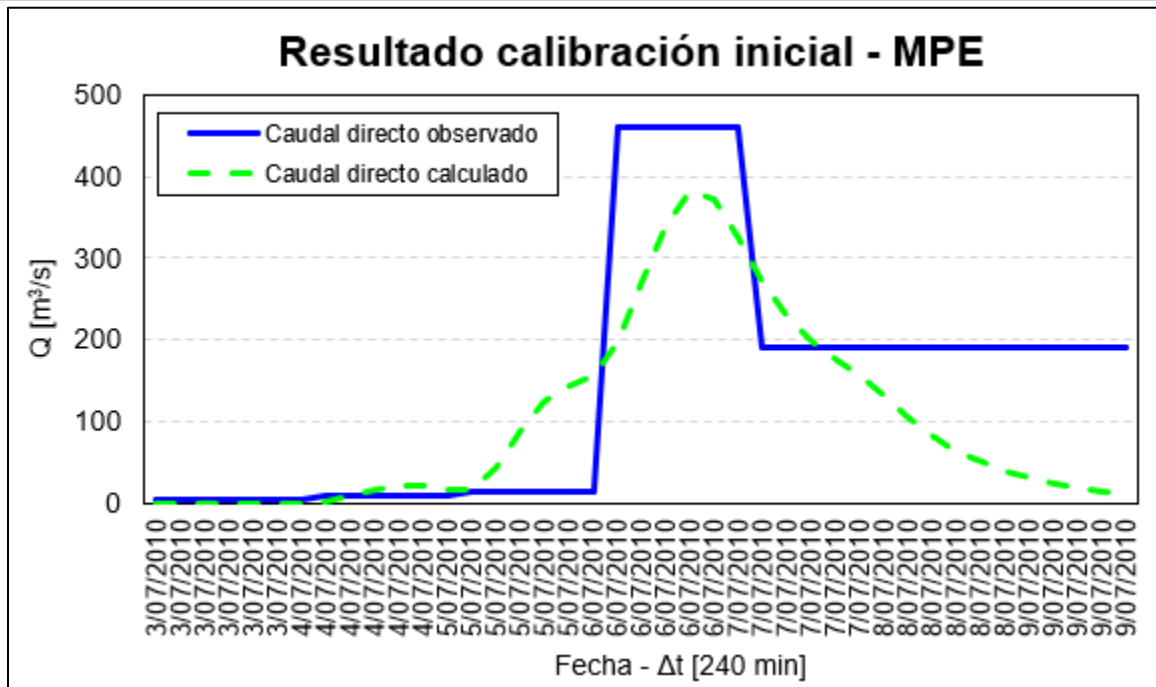


Figura 6.2. Caudal observado y caudal calculado – calibración inicial.

6.2 Tormentas estadísticas

6.2.1 Lluvia media de las precipitaciones diarias máximas anuales correspondiente a cada punto de interés

Debido a la escasa información en la zona, se localizaron 10 puntos distribuidos en toda la superficie de estudio (cuenca), con el objetivo de estimar tormentas estadísticas para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años); en la Figura 6.3 se presenta la localización de dichos puntos de interés.

Posteriormente se localizaron los puntos en el mapa de isoyetas de la República Mexicana del estudio de regionalización del Instituto de Ingeniería, y se le asignó a cada uno su precipitación media correspondiente utilizando la técnica de interpolación con la distancia inversa (IDW). En la Tabla 6.2 se presenta la lluvia media máxima respectiva para cada uno.

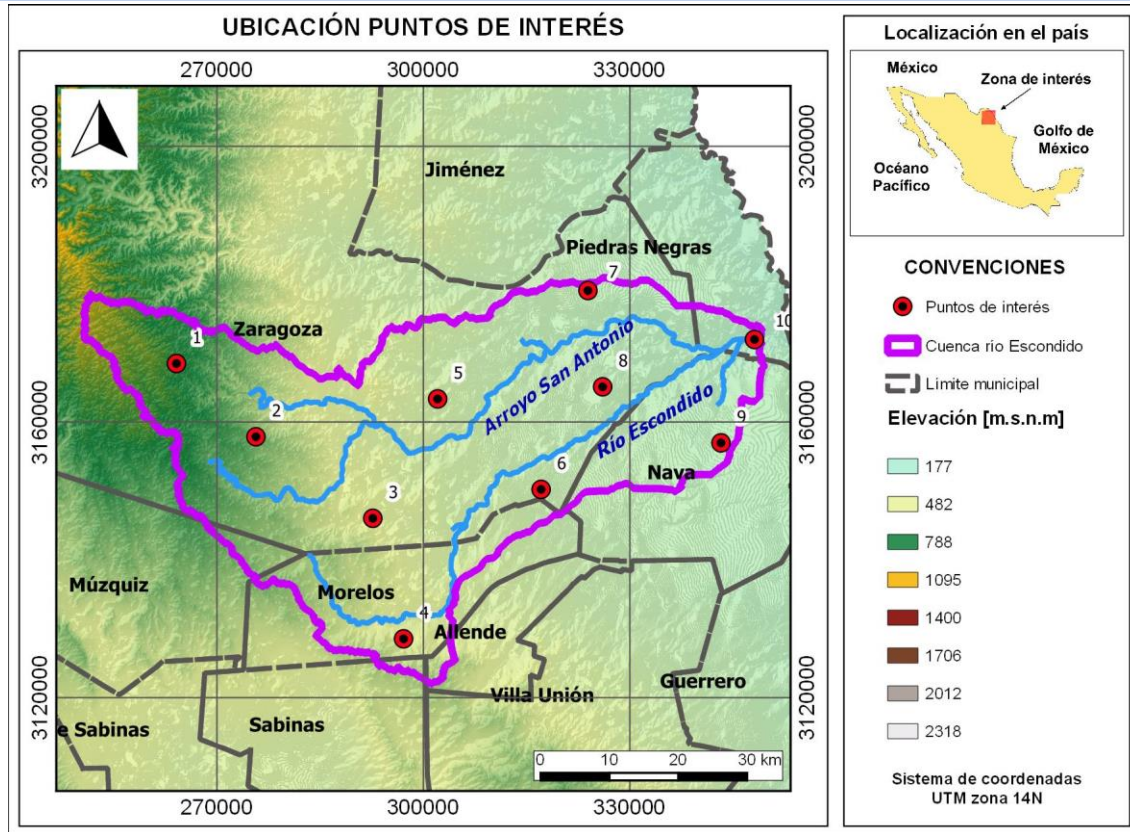


Figura 6.3. Localización de los puntos de interés.

Tabla 6.2. Lluvia media de las precipitaciones diarias máximas anuales.

Id	Altura [msnm]	Lluvia media [mm]	Coordenadas (**)	
			Longitud	Latitud
1	799	70.59	264,122	3,168,487
2	648	68.85	275,674	3,157,859
3	461	66.211	292,657	3,146,023
4	480	67.20	297,132	3,128,533
5	385	64.76	302,086	3,163,349
6	350	64.41	317,119	3,150,219
7	305	77.47	323,922	3,179,078
8	308	70.17	326,063	3,165,109
9	282	75.10	343,263	3,156,973
10	221	88.58	348,128	3,171,975

(**) Sistema de coordenadas UTM zona 14

6.2.2 Precipitaciones diarias máximas anuales asociadas a diferentes periodos de retorno

Coahuila conforma una de las 66 regiones del estudio de regionalización del Instituto de Ingeniería, para las cuales se determinaron los factores regionales (Tabla 5.3) asociados a diversos periodos de retorno.

Con el valor de la lluvia media de las diarias máximas anuales en cada punto de interés y el factor regional para la zona de estudio, fue posible determinar la precipitación para diferentes periodos de retorno con la siguiente expresión:

$$hp_{24h}^{Tr} = hp_m \cdot fr \tag{6.1}$$

Donde:

hp_{24h}^{Tr} : precipitación diaria máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno en mm

hp_m : lluvia media de las diarias máximas anuales en mm

fr : factor regional

Al aplicar la ecuación (6.1) para cada punto de interés se generaron los siguientes resultados:

Tabla 6.3. Lluvia diaria máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno.

Id	Periodo de retorno Tr [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
1	62.83	91.07	112.24	140.48	187.78	211.78	259.08
2	61.28	88.82	109.48	137.02	183.15	206.56	252.69
3	58.93	85.41	105.28	131.76	176.12	198.64	243.00
4	59.81	86.70	106.86	133.74	178.77	201.62	246.65
5	57.64	83.55	102.98	128.89	172.28	194.31	237.70
6	57.33	83.10	102.42	128.19	171.35	193.25	236.41
7	68.95	99.94	123.18	154.17	206.07	232.41	284.32
8	62.45	90.52	111.57	139.64	186.66	210.52	257.53
9	66.84	96.89	119.42	149.46	199.78	225.32	275.64
10	78.84	114.27	140.84	176.27	235.62	265.74	325.09

6.2.3 Precipitación con duración de 1 hora

Siguiendo la actualización a la investigación de Baeza [26], realizada por Labrada [35], en la que se dividió la República Mexicana en 3 regiones y se obtuvo para cada una de ellas factores de convectividad (R) que permiten convertir las duraciones de la lluvia a 1 hora, basta entonces con multiplicar la lluvia diaria máxima anual por su factor correspondiente. La cuenca río Escondido se localiza al norte del estado de Coahuila, al que le corresponde un factor $R = 0.3$ (Figura 6.4).

Lo anterior, considerando la siguiente fórmula de recurrencia:

$$R = \frac{hp_{1h}^{Tr}}{hp_{24h}^{Tr}} \tag{6.2}$$

Donde R : factor de convectividad, hp_{1h}^{Tr} : precipitación con duración de 1 hora en mm y hp_{24h}^{Tr} : precipitación con duración de 24 horas en mm. Al despejar la variable de interés de la ecuación (6.2), se obtiene la lluvia para una hora de duración. Los resultados para cada punto se presentan en la Tabla 6.4.

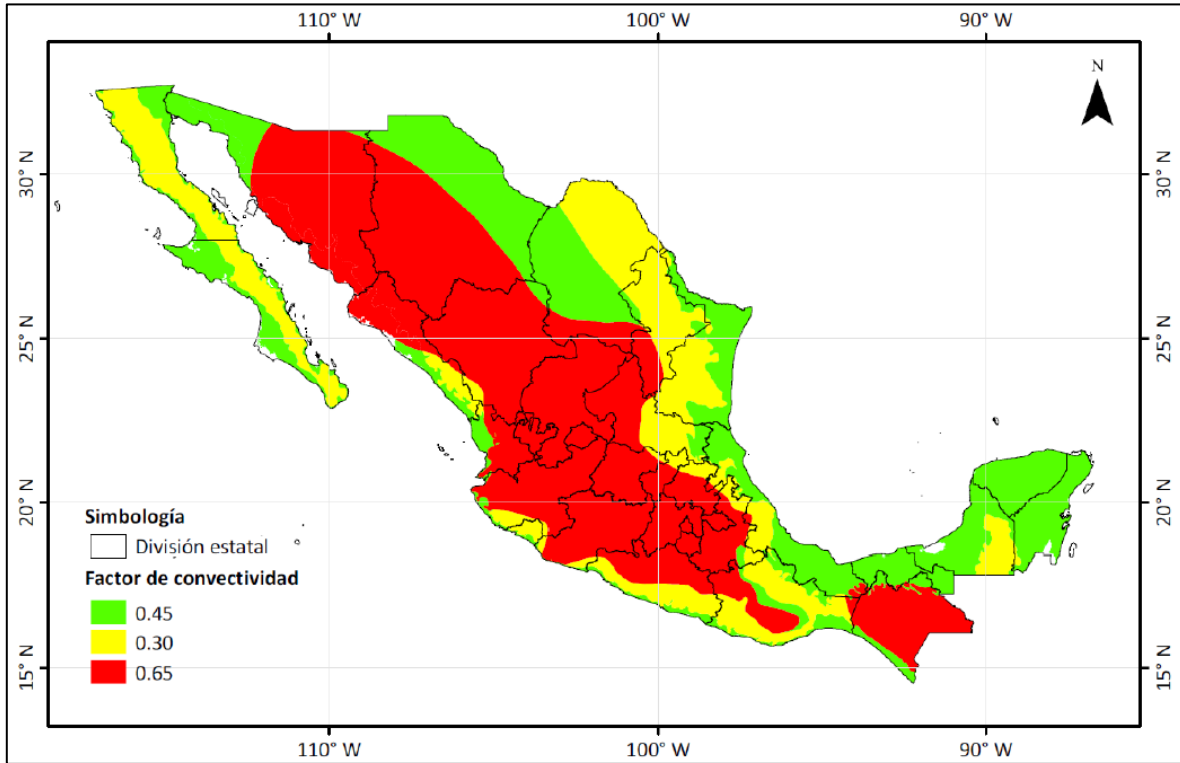


Figura 6.4. Factores de convectividad [35].

Tabla 6.4. Lluvia en mm con duración de 1 hora para diferentes periodos de retorno.

Id	Periodo de retorno Tr [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
1	18.85	27.32	33.67	42.14	56.33	63.53	77.72
2	18.38	26.65	32.84	41.11	54.94	61.97	75.81
3	17.68	25.62	31.58	39.53	52.84	59.59	72.90
4	17.94	26.01	32.06	40.12	53.63	60.49	74.00
5	17.29	25.07	30.89	38.67	51.69	58.29	71.31
6	17.20	24.93	30.73	38.46	51.41	57.98	70.92
7	20.68	29.98	36.95	46.25	61.82	69.72	85.29
8	18.74	27.16	33.47	41.89	56.00	63.15	77.26
9	20.05	29.07	35.83	44.84	59.93	67.60	82.69
10	23.65	34.28	42.25	52.88	70.69	79.72	97.53

6.2.4 Precipitación con duración menor a 1 día

Para obtener lluvias con duraciones menores a 1 día se recurre a los factores de Chen [25], que están en función de los factores de convectividad actualizados por Labrada [35], esto se logró aplicando la siguiente fórmula de recurrencia:

$$K = \frac{hp_d^{Tr}}{hp_{1h}^{Tr}} \quad 6.3$$

Donde:

K : factor de Chen

hp_d^{Tr} : precipitación para diferentes duraciones mayores y menores a 1 h hasta 24 h

hp_{1h}^{Tr} : precipitación con duración de una 1 h

Al despejar la variable de interés de la expresión (6.3) y realizar el producto entre el valor K (diferentes duraciones) y la lluvia con duración de 1 hora se obtuvo la precipitación para el intervalo de interés, en este caso cada Δ_t de 240 minutos durante un día.

A continuación, a modo de ejemplo se presenta la lluvia cada Δ_t para los 10 puntos de interés con periodo de retorno de 2 años; de igual manera se procedió para los periodos de 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años.

Tabla 6.5. Lluvia en mm para intervalos de 240 minutos durante un día – Tr:2 años.

d [min]	K	Puntos de interés									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
240	1.71	32.32	31.52	30.31	30.77	29.65	29.49	35.46	32.12	34.38	40.55
480	2.22	41.86	40.83	39.26	39.85	38.40	38.20	45.93	41.61	44.53	52.52
720	2.58	48.63	47.43	45.61	46.29	44.61	44.37	53.36	48.34	51.74	61.02
960	2.87	54.06	52.73	50.71	51.47	49.60	49.33	59.33	53.74	57.52	67.84
1200	3.11	58.68	57.24	55.04	55.87	53.84	53.55	64.40	58.33	62.43	73.64
1440	3.33	62.75	61.20	58.85	59.74	57.57	57.26	68.86	62.37	66.76	78.73

Enseguida se calculó el incremento de la lluvia a cada intervalo, es decir, el primer incremento corresponde al mismo valor determinado en el literal anterior, el segundo incremento equivale a la diferencia entre el Δ_t de 480 minutos y el de 240 minutos, así sucesivamente hasta completar 1 día de duración para cada punto y cada periodo de retorno.

A continuación, a modo de ejemplo se presentan los incrementos para los 10 puntos de interés y 2 años periodo de retorno; de igual manera se procedió para los Tr de 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años.

Tabla 6.6. Incrementos de lluvia en mm para intervalos de 240 minutos – Tr:2 años.

d [min]	Puntos de interés									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
240	32.32	31.52	30.31	30.77	29.65	29.49	35.46	32.12	34.38	40.55
480	9.54	9.31	8.95	9.08	8.75	8.71	10.47	9.48	10.15	11.97
720	6.77	6.60	6.35	6.44	6.21	6.18	7.43	6.73	7.20	8.49
960	5.44	5.30	5.10	5.17	4.99	4.96	5.96	5.40	5.78	6.82
1200	4.62	4.51	4.33	4.40	4.24	4.22	5.07	4.59	4.92	5.80
1440	4.06	3.96	3.81	3.87	3.73	3.71	4.46	4.04	4.32	5.10

Los incrementos obtenidos para cada punto de interés y cada periodo de retorno se reorganizaron mediante el uso de bloques alternos, es decir, se alternan los valores de derecha a izquierda y del valor más grande al más pequeño.

6.2.5 Conversión de lluvia puntual a lluvia distribuida

Basta con multiplicar el factor de reducción por área obtenido en la ecuación (5.4), por los incrementos de lluvia reorganizados para cada punto de interés y cada periodo de retorno. A modo de ejemplo se presentan en la Tabla 6.7 los resultados para cada punto y 2 años periodo de retorno; de igual manera se procedió para los Tr de 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años.

Tabla 6.7. Aplicación del FRA a los incrementos de lluvia en mm para intervalos de 240 minutos – Tr:2 años.

d [min]	Puntos de interés									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
240	2.52	2.46	2.36	2.40	2.31	2.30	2.77	2.51	2.68	3.16
480	3.37	3.29	3.16	3.21	3.09	3.08	3.70	3.35	3.59	4.23
720	5.92	5.77	5.55	5.64	5.43	5.40	6.50	5.88	6.30	7.43
960	20.05	19.56	18.81	19.09	18.40	18.30	22.01	19.93	21.33	25.16
1200	4.20	4.10	3.94	4.00	3.85	3.83	4.61	4.18	4.47	5.27
1440	2.87	2.80	2.69	2.73	2.63	2.62	3.15	2.85	3.05	3.60

6.2.6 Obtención de las tormentas estadísticas de diseño

Con el objetivo de observar 5 días de duración de los escurrimientos resultantes fue necesario obtener la lluvia de diseño para duraciones mayores que 1 día, lo anterior se logró utilizando las ecuaciones (5.6) a (5.9), suponiendo una lluvia de 1 mm para la duración de un día y aplicando las relaciones entre las precipitaciones medias máximas asociadas a diferentes duraciones y las correspondientes a 1 día del estudio de regionalización de Instituto de Ingeniería (Tabla 5.4), de este modo se obtuvo la precipitación de 2 a 5 días:

$$P_2 = 0.63 \cdot 1 \cdot 2 - 1 = 0.26 \text{ mm}$$

6.4

$$P_3 = 0.46 \cdot 1 \cdot 3 - 1 - 0.26 = 0.12 \text{ mm} \quad 6.5$$

$$P_4 = 0.37 \cdot 1 \cdot 4 - 1 - 0.26 - 0.12 = 0.10 \text{ mm} \quad 6.6$$

$$P_5 = 0.31 \cdot 1 \cdot 5 - 1 - 0.26 - 0.12 - 0.10 = 0.07 \text{ mm} \quad 6.7$$

Finalmente multiplicando los resultados de las ecuaciones (6.4) a (6.7) por la tormenta de un día de duración se obtienen las tormentas de 2, 3, 4 y 5 días para cada punto de interés y cada periodo de retorno; los valores obtenidos para cada día se organizaron utilizando nuevamente el método de bloques alternos, conformando así el archivo de lluvias para la estimación de los escurrimientos de diseño.

6.2.6.1 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 2 años

El comportamiento temporal de la lluvia es unimodal por día, nótese como cada 24 h la lluvia crece hasta cierto punto para volver a decrecer; cada tormenta alcanza su máximo valor el tercer día cuyo pico más alto ocurre en el punto 10 (25.15 mm) y el valor más bajo en el punto 6 (18.30 mm).

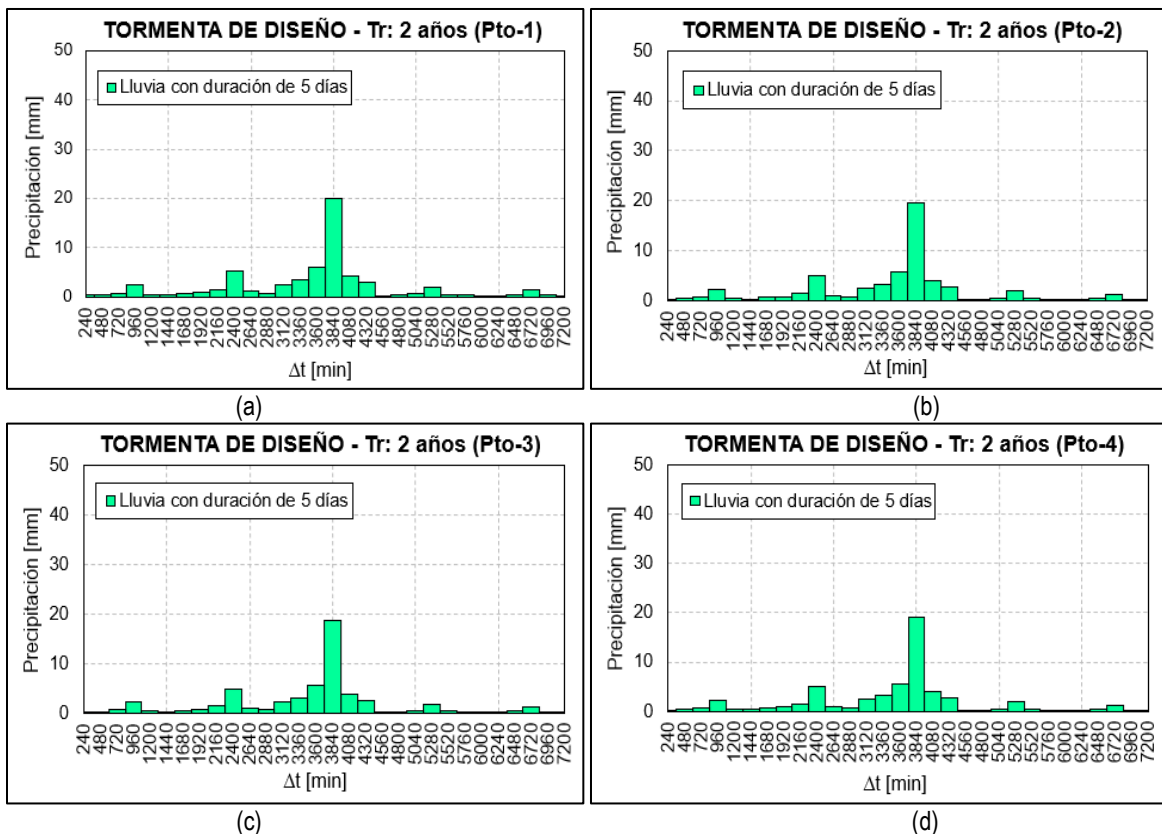


Figura 6.5. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 2 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.

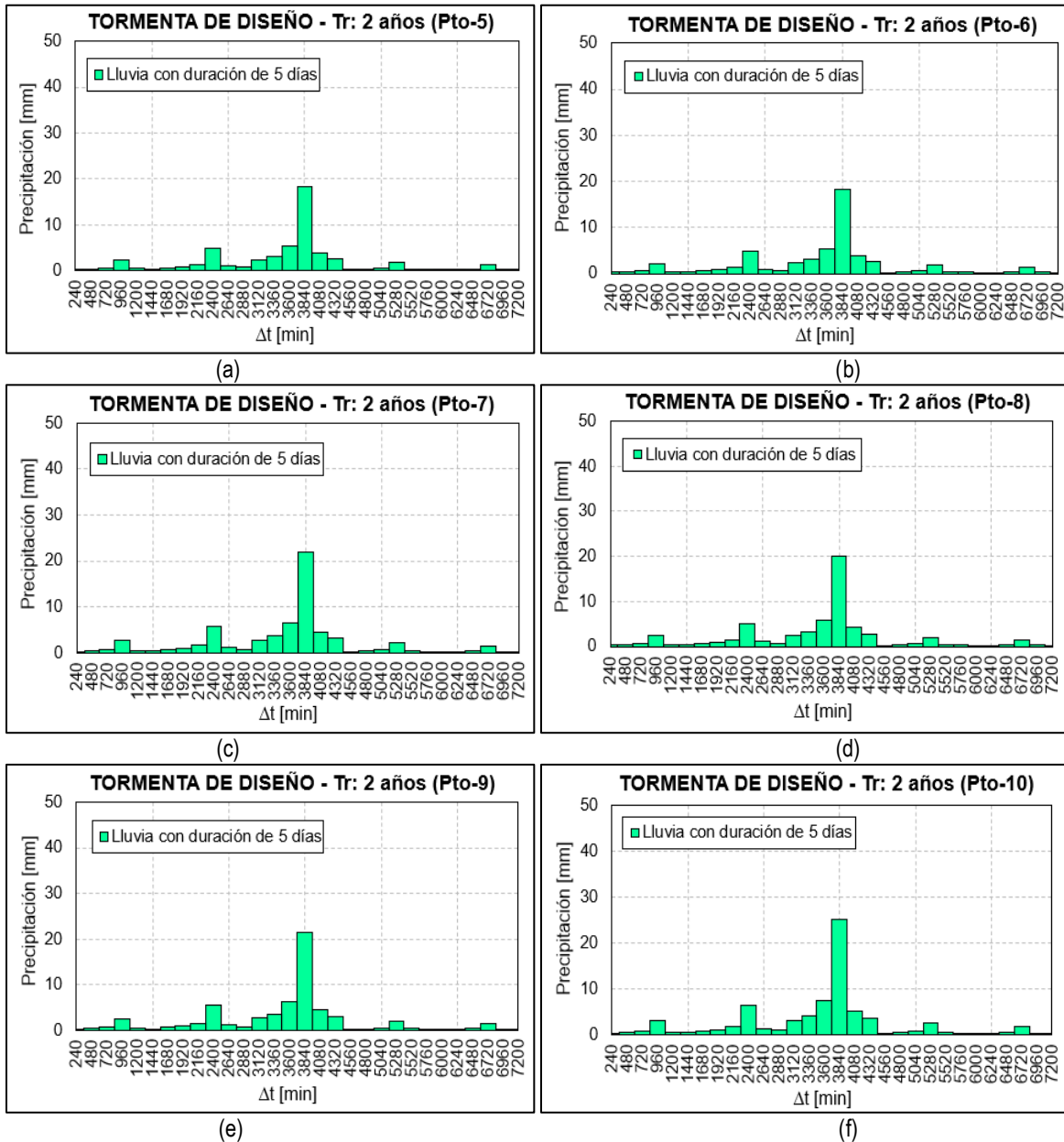


Figura 6.6. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 2 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.

6.2.6.2 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 5 años

El comportamiento de las tormentas para 5 años es similar al descrito para las de 2 años, nótese también que en la medida que incrementa el periodo de retorno, aumenta la magnitud de la lluvia. El valor más alto se alcanza para el punto 10 (36.47 mm) y el más bajo para el punto 6 (25.52 mm).

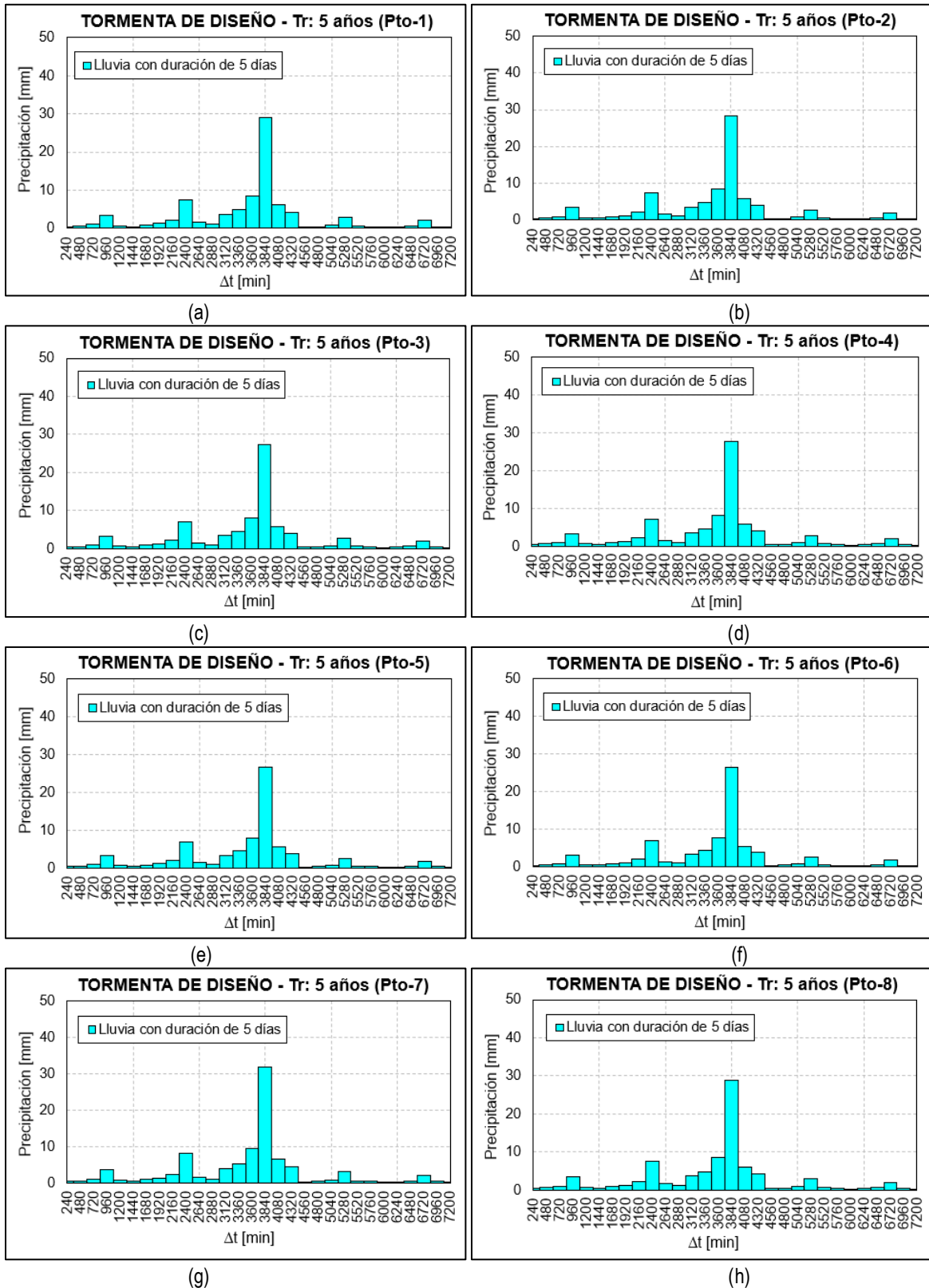


Figura 6.7. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 5 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3, (d) punto 4, (e) punto 5, (f) punto 6, (g) punto 7 y (h) punto 8.

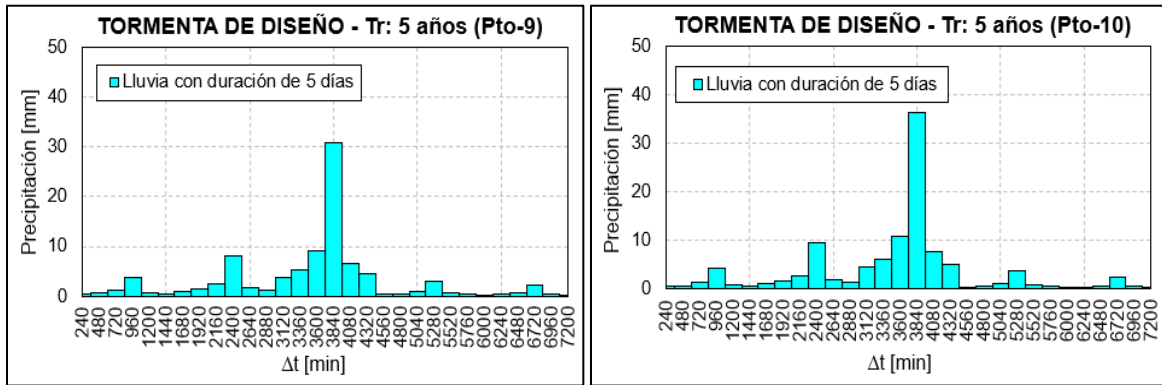


Figura 6.8. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 5 años: (a) punto 9 y (b) punto 10.

6.2.6.3 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 10 años

El comportamiento de las tormentas para 10 años es similar al descrito para las de 2 años, nótese también que en la medida que incrementa el periodo de retorno, aumenta la magnitud de la lluvia. El valor más alto se alcanza para el punto 10 (44.95 mm) y el más bajo para el punto 6 (32.69 mm).

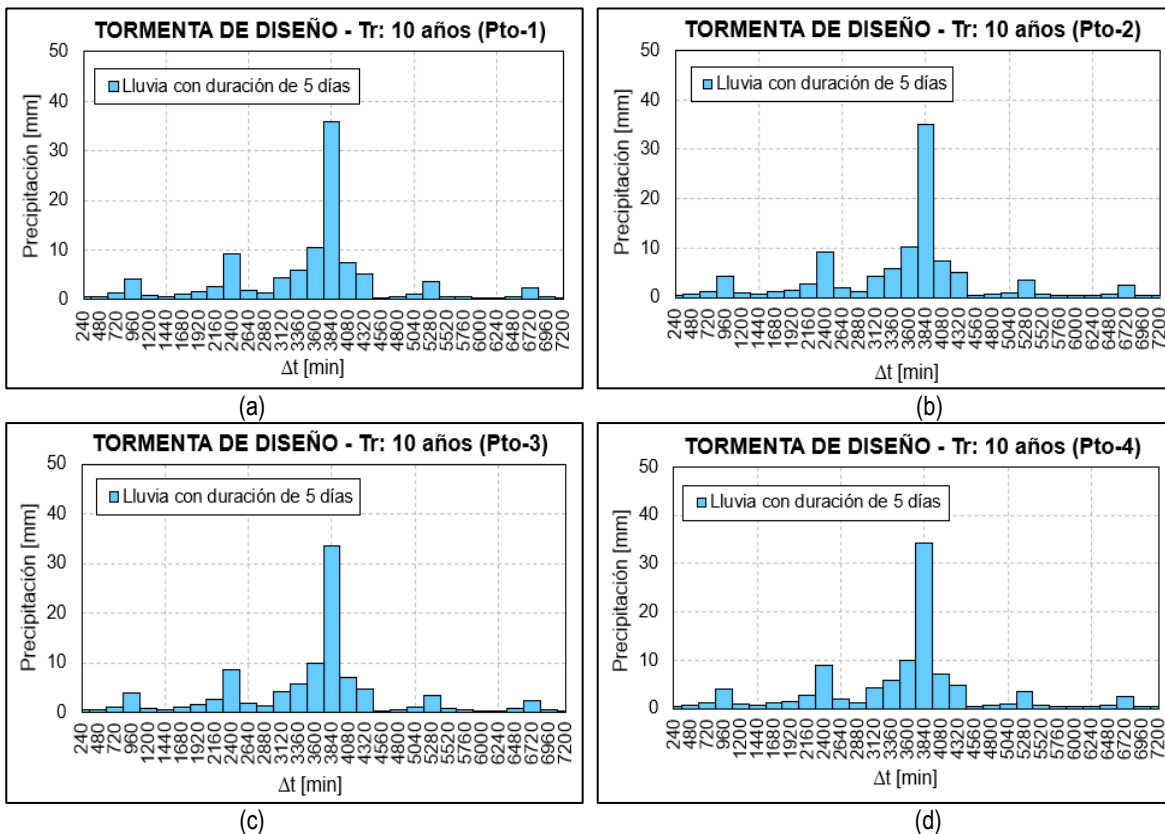


Figura 6.9. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 10 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.

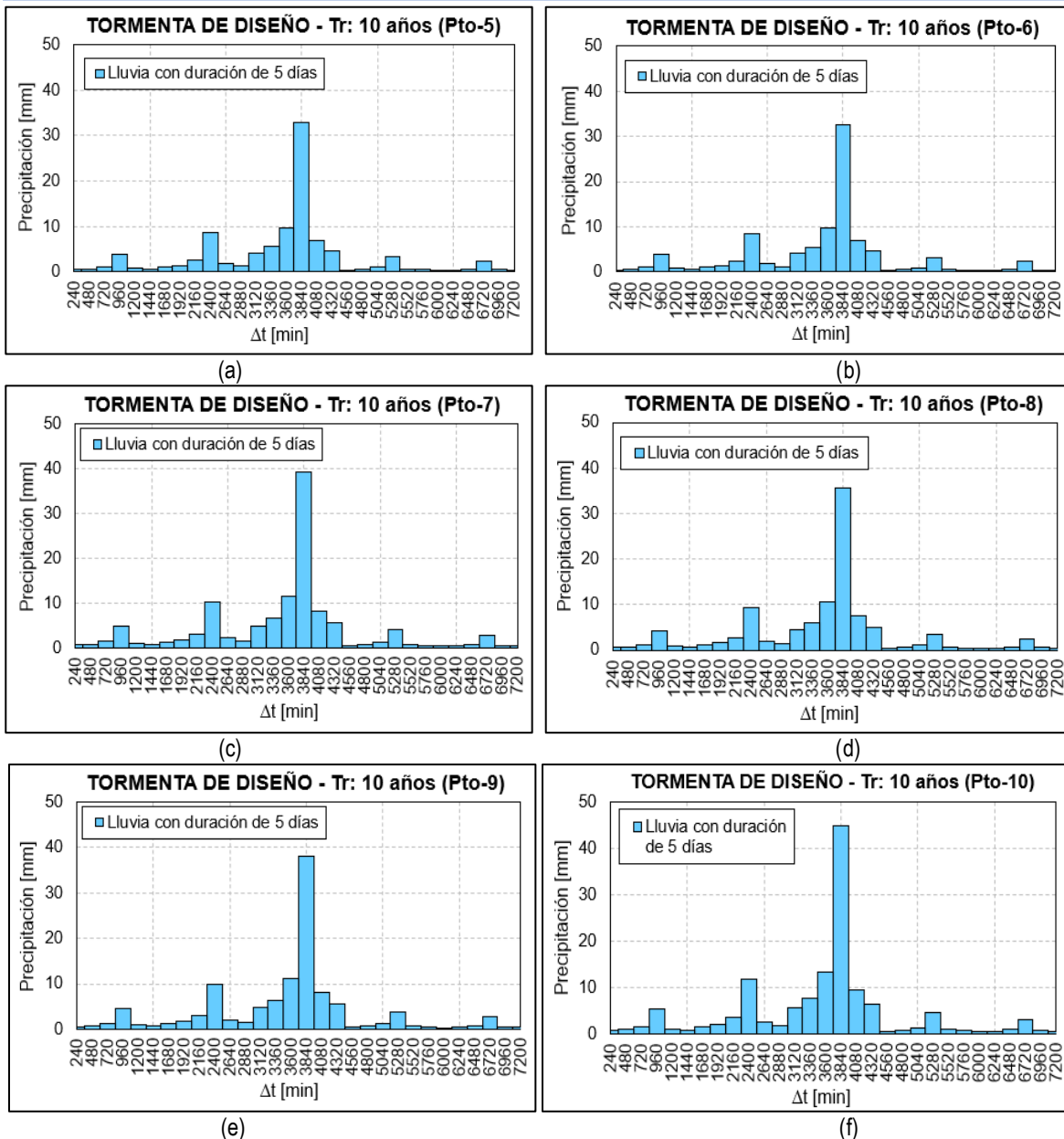


Figura 6.10. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 10 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.

6.2.6.4 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 20 años

El comportamiento de las tormentas para 20 años es similar al descrito para las de 2 años, nótese también que en la medida que incrementa el periodo de retorno, aumenta la magnitud de la lluvia. El valor más alto se alcanza para el punto 10 (56.26 mm) y el más bajo para el punto 6 (40.91 mm).

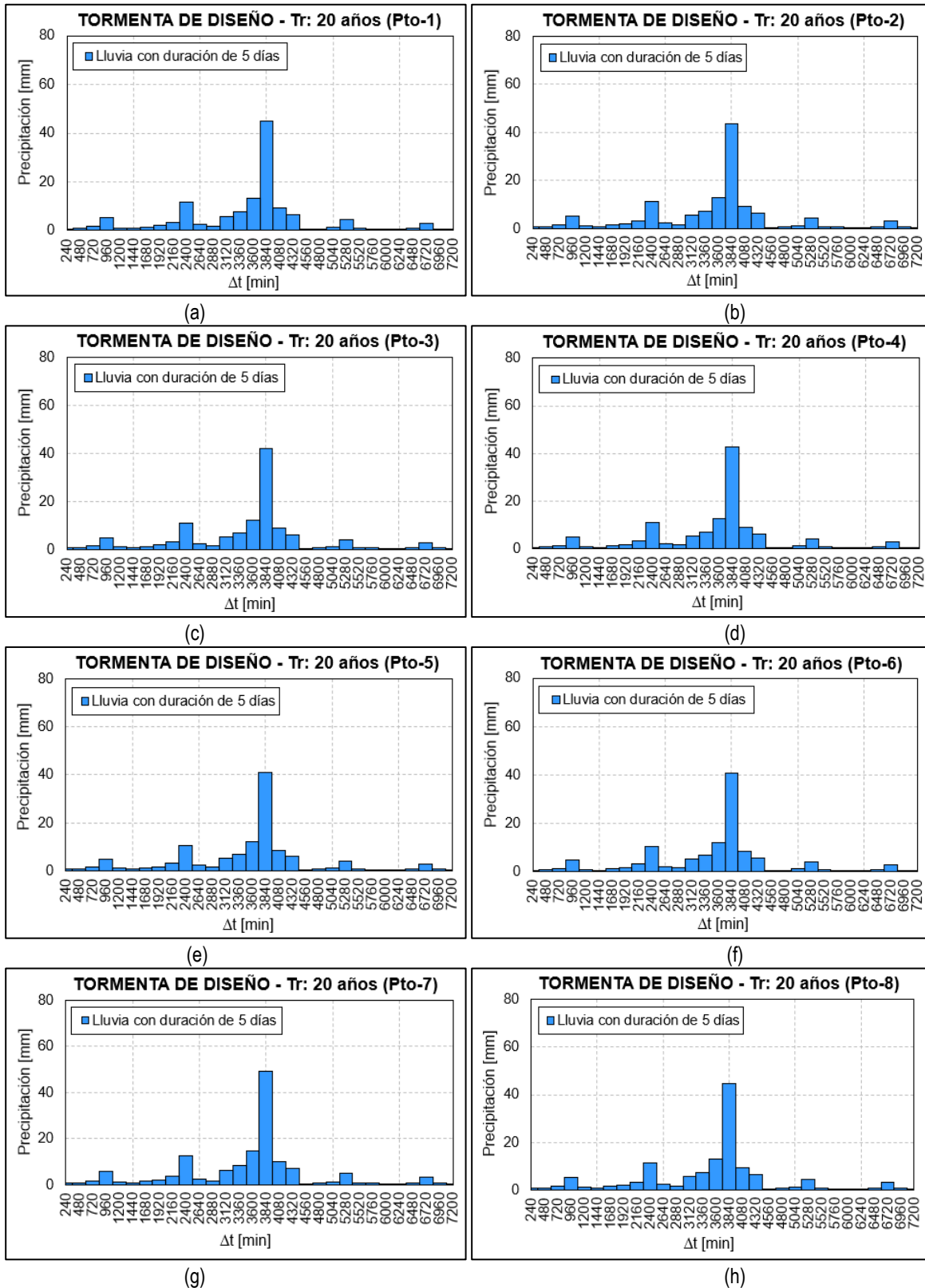
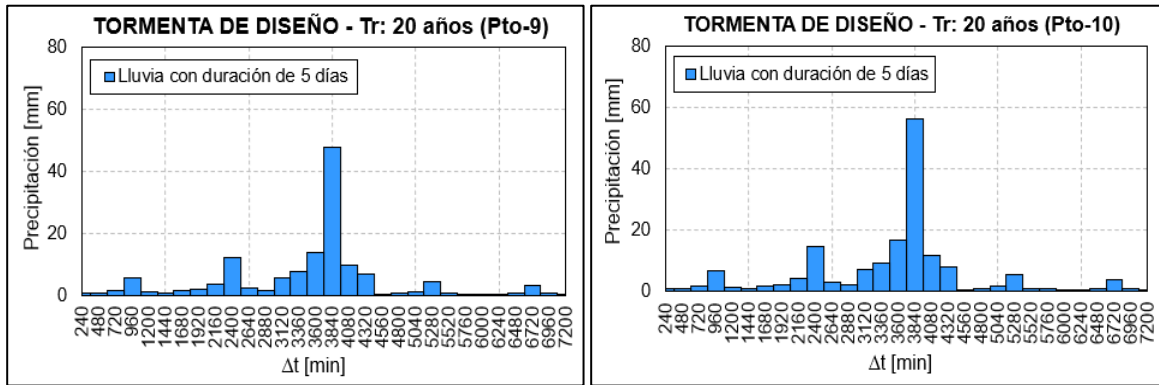


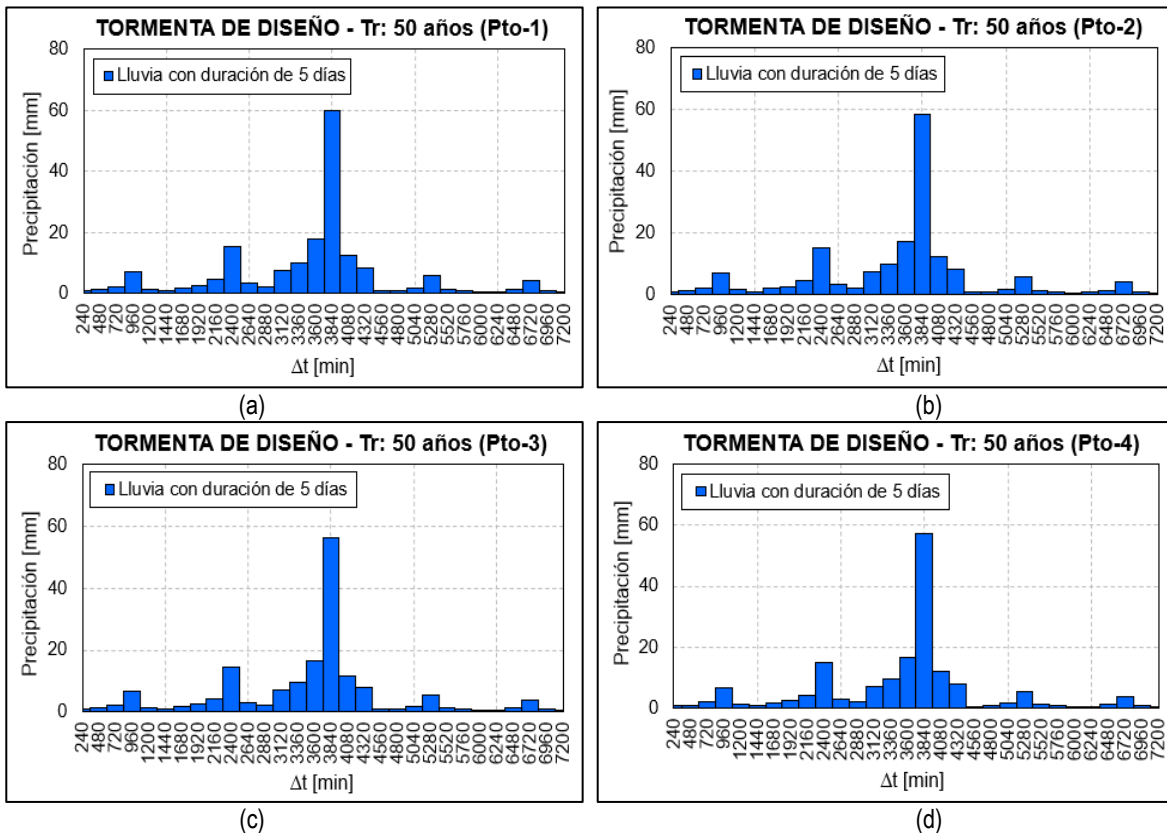
Figura 6.11. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 20 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3, (d) punto 4, (e) punto 5, (f) punto 6, (g) punto 7 y (h) punto 8.



(a) (b)
Figura 6.12. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 20 años: (a) punto 9 y (b) punto 10.

6.2.6.5 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 50 años

El comportamiento de las tormentas para 50 años es similar al descrito para las de 2 años, nótese también que en la medida que incrementa el periodo de retorno, aumenta la magnitud de la lluvia. El valor más alto se alcanza para el punto 10 (75.20 mm) y el más bajo para el punto 6 (54.69 mm).



(a) (b) (c) (d)
Figura 6.13. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 50 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.

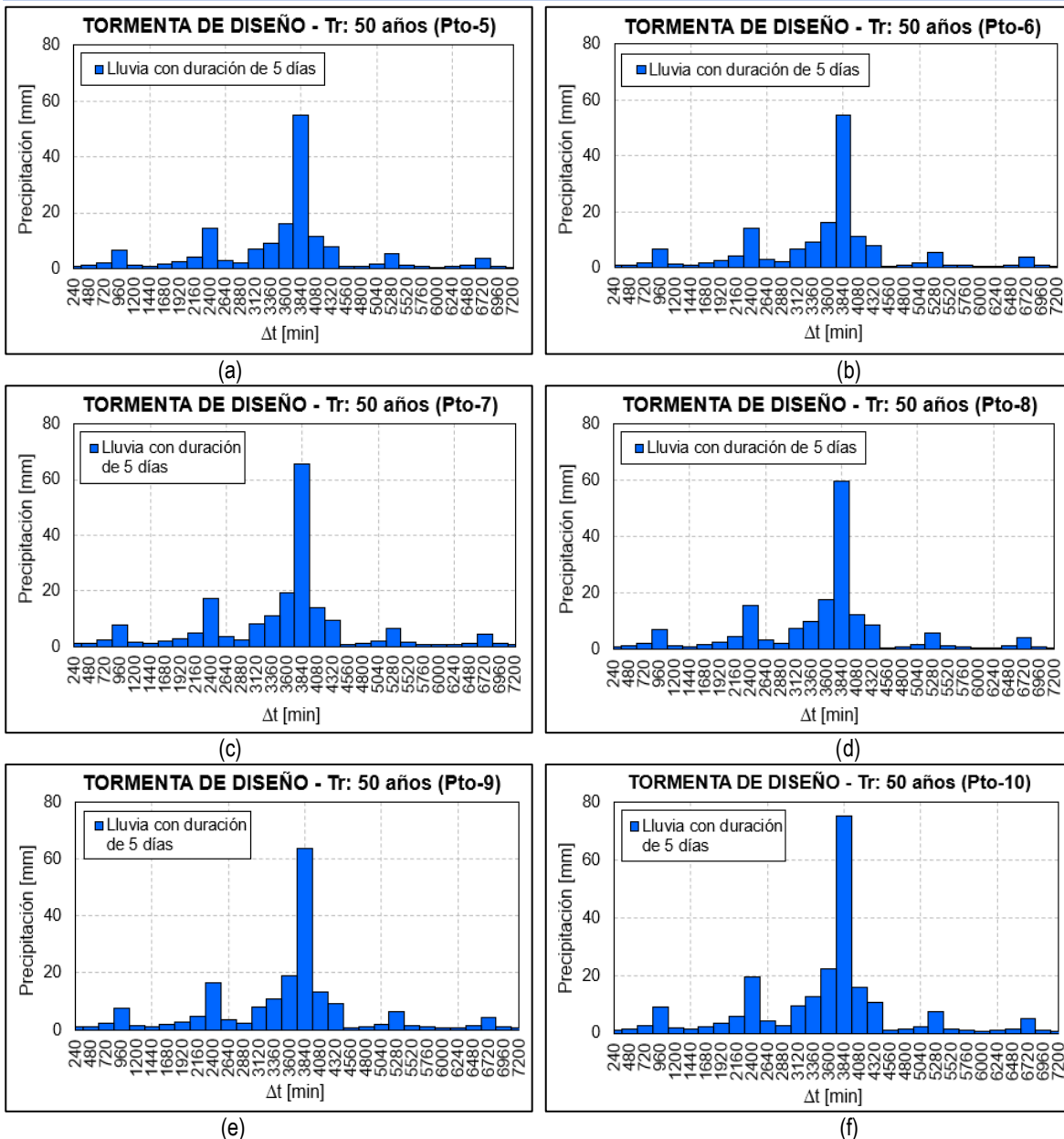


Figura 6.14. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 50 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.

6.2.6.6 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 100 años

El comportamiento de las tormentas para 100 años es similar al descrito para las de 2 años, nótese también que en la medida que incrementa el periodo de retorno, aumenta la magnitud de la lluvia. El valor más alto se alcanza para el punto 10 (84.82 mm) y el más bajo para el punto 6 (61.68 mm).

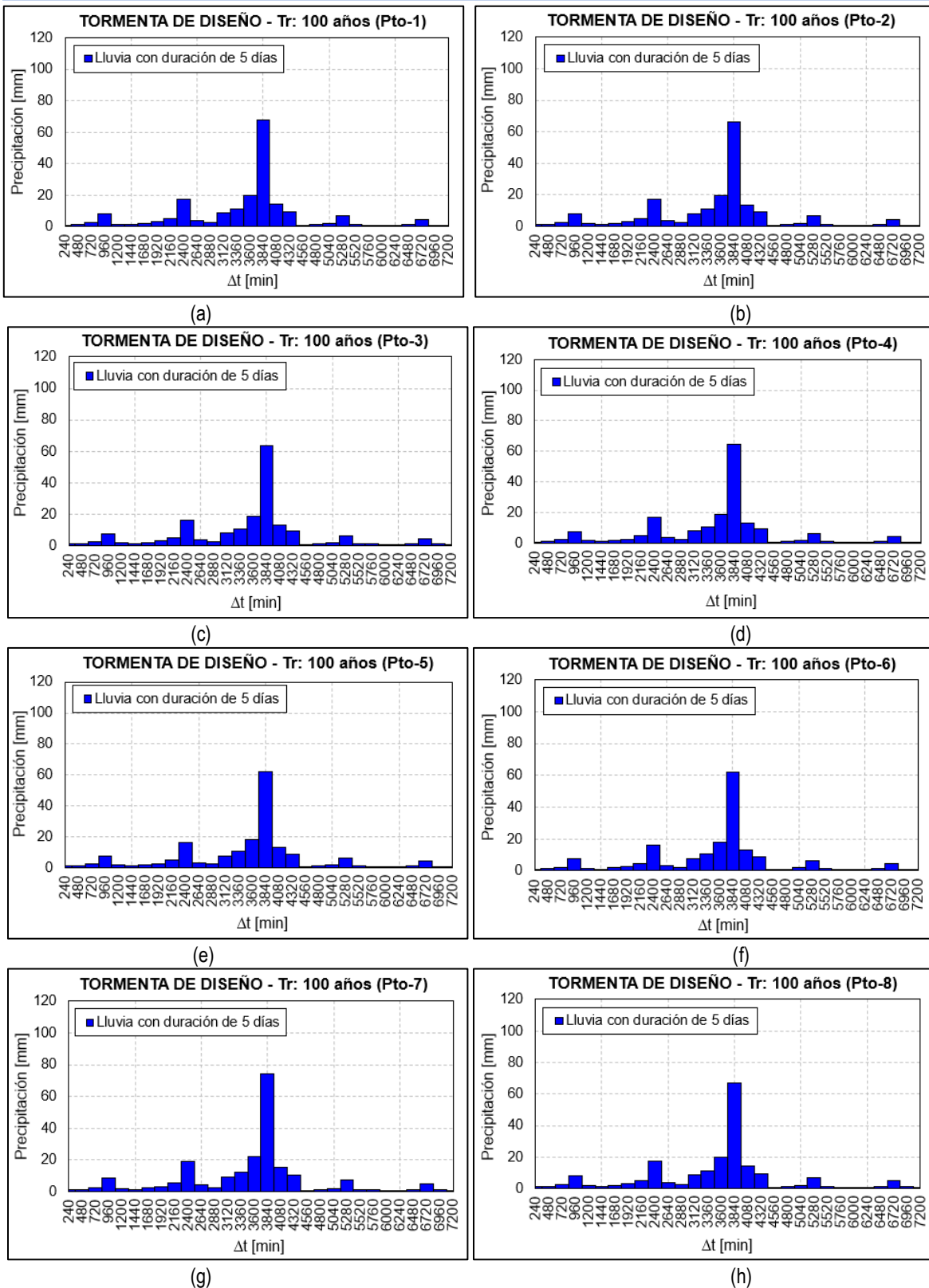


Figura 6.15. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 100 años: (a) punto 1, (b) punto 1, (c) punto 3, (d) punto 4, (e) punto 5, (f) punto 6, (g) punto 7 y (h) punto 8.

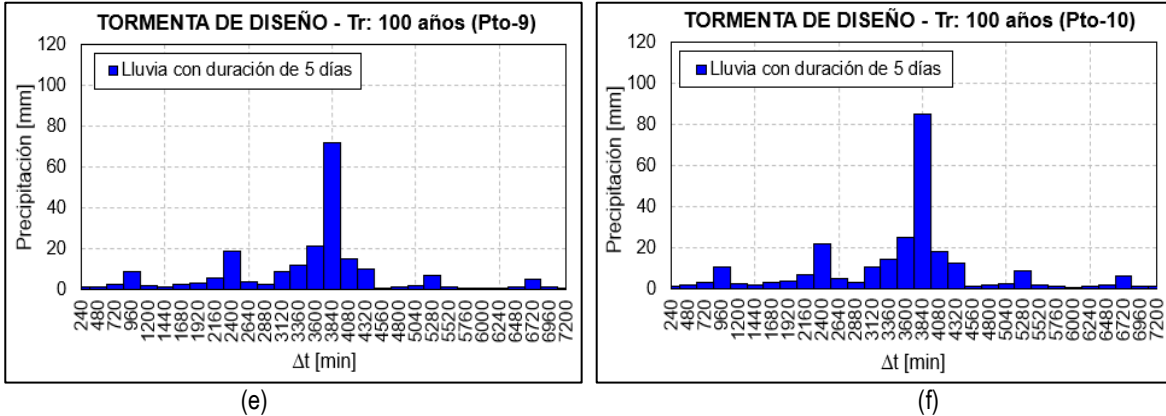


Figura 6.16. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 100 años: (a) punto 9 y (b) punto 10.

6.2.6.7 Tormentas asociadas al periodo de retorno de 500 años

Finalmente, también se observa que el comportamiento de las tormentas para 500 años es similar al descrito para las de 2 años, nótese también que en la medida que incrementa el periodo de retorno, aumenta la magnitud de la lluvia. El valor más alto se alcanza para el punto 10 (103.76 mm) y el más bajo para el punto 6 (75.45 mm).

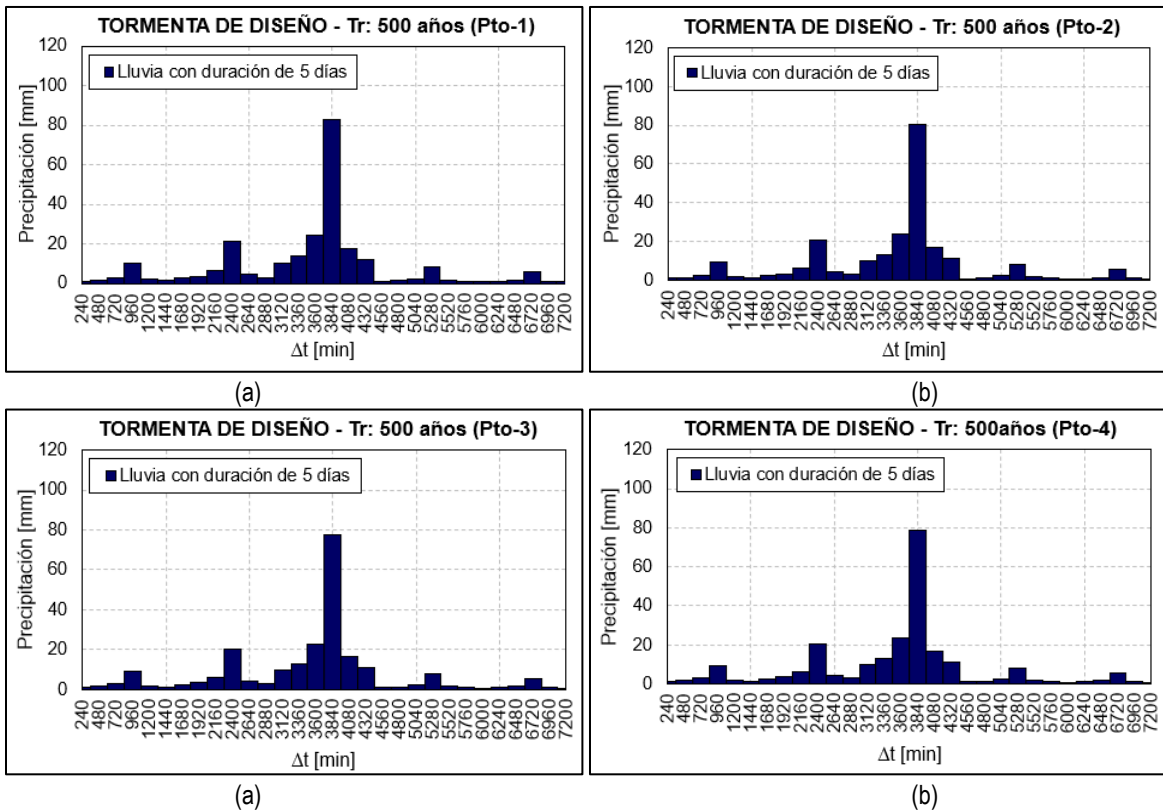


Figura 6.17. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 500 años: (a) punto 1, (b) punto 2, (c) punto 3 y (d) punto 4.

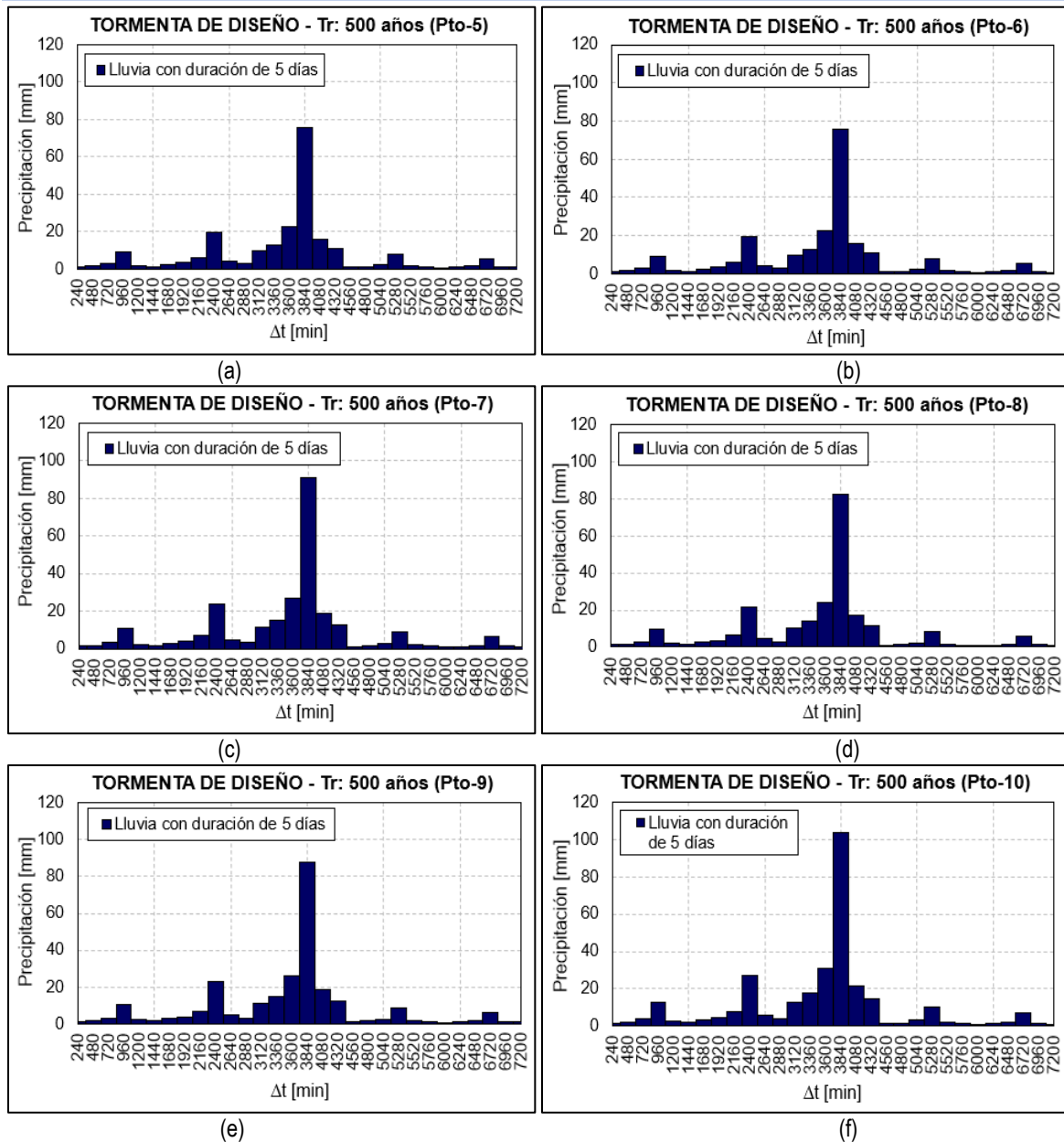


Figura 6.18. Tormentas estadísticas de diseño Tr: 500 años: (a) punto 5, (b) punto 6, (c) punto 7, (d) punto 8, (e) punto 9 y (f) punto 10.

Una vez determinadas todas las tormentas de diseño se conformó el archivo de lluvias que sirvió de insumo para las estimaciones de los caudales de diseño, haciendo uso también del archivo de celdas determinado con anterioridad se procedió a ejecutar el modelo para pronóstico del escurrimiento; no fue necesario agregar el caudal observado, pues en este punto el gasto no es una entrada sino más bien una salida, como se muestra en el siguiente apartado.

6.3 Estimación de los escurrimientos para distintos periodos de retorno en la cuenca río Escondido

Para la estimación de los escurrimientos se llevaron a cabo dos escenarios, el primero sin considerar las pérdidas por evapotranspiración con un factor de olvido (f_x) igual a la uno; y el segundo con un valor un poco menor a la unidad permitiendo mayor evapotranspiración y menor escurrimiento.

Parámetros de pérdidas:

En los dos escenarios el factor de escala de pérdida inicial (λ) se tomó como se recomienda en la literatura técnica para aplicaciones prácticas $\lambda = 0.2$; se modificó el factor de escala de retención potencial (f_s) que varía o modifica la retención del suelo y, por tanto, el valor del número de curva, al ir incrementando este valor se está considerando mayor permeabilidad en el terreno y menor volumen de escurrimiento (lo que resulta coherente a medida que pasa el tiempo), la elección de este parámetro fue a ensayo y error hasta identificar los resultados que permitieron determinar los coeficientes de escurrimientos más acordes con las características cuenca de estudio; como ya se mencionó el factor de olvido tomó un valor de uno y posteriormente menor a la unidad.

Parámetros de forma:

El tiempo de concentración se determinó con antelación mediante la ecuación de Kirpich, cuyo resultado fue de 27 horas, mientras que el coeficiente de almacenamiento se recomienda sea $0.6 \cdot T_c$, es decir 16 horas aproximadamente.

6.3.1 Escenario 1: factor de olvido $f_x = 1$

Se presentan a continuación, los resultados arrojados por el MPE para 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años periodo de retorno, en la Tabla 6.8 se observan los parámetros de pérdidas para cada T_r y en la Tabla 6.9 el resumen de los parámetros hidrológicos. Se consideró un gasto base de $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 6.8. Parámetros de pérdidas utilizados para cada periodo de retorno con $f_x = 1$.

Parámetros de pérdidas	Periodo de retorno T_r [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Factor de Escala de Retención Potencial (f_s)	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.77
Factor de olvido (f_x)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 6.9. Parámetros hidrológicos para cada periodo de retorno con $f_x = 1$.

Parámetros	Periodo de retorno T_r [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Lluvia media [mm]	59.3	85.9	105.9	132.6	177.2	199.8	244.5
Pérdidas [mm]	35.1	43.6	49.9	57.0	65.8	71.6	77.1
Lluvia en exceso [mm]	24.1	42.3	56.0	75.6	111.4	128.2	167.3
Volumen Total Calculado [Mm ³]	73518	128321	169652	228805	336955	387899	505962
Volumen Directo Calculado [Mm ³]	72942	127745	169076	228229	336379	387323	505386
Volumen Base Calculado [Mm ³]	576	576	576	576	576	576	576
Gasto Máximo del total Calculado [m ³ /s]	488	854	1127	1516	2219	2551	3307

A continuación, se presentan los gastos calculados para distintos periodos de retorno en la cuenca río Escondido (Figura 6.19 y Figura 6.20), la distribución temporal es similar en todos los casos, además se aprecia cómo se está reproduciendo el comportamiento de las tormentas estimadas. En general para cada hidrograma se observa que el punto de levantamiento ocurre el día 4 de julio de 2010 a las 15:50 p.m., el gasto máximo producido por cada tormenta se alcanza el día 6 de julio de 2010 a las 11:50 a.m., la curva de recesión empieza el día 6 de julio de 2010 a las 23:50 p.m. aproximadamente, mientras que el final de la escorrentía se extiende hasta el día 9 de julio de 2010 a las 19:50 p.m.

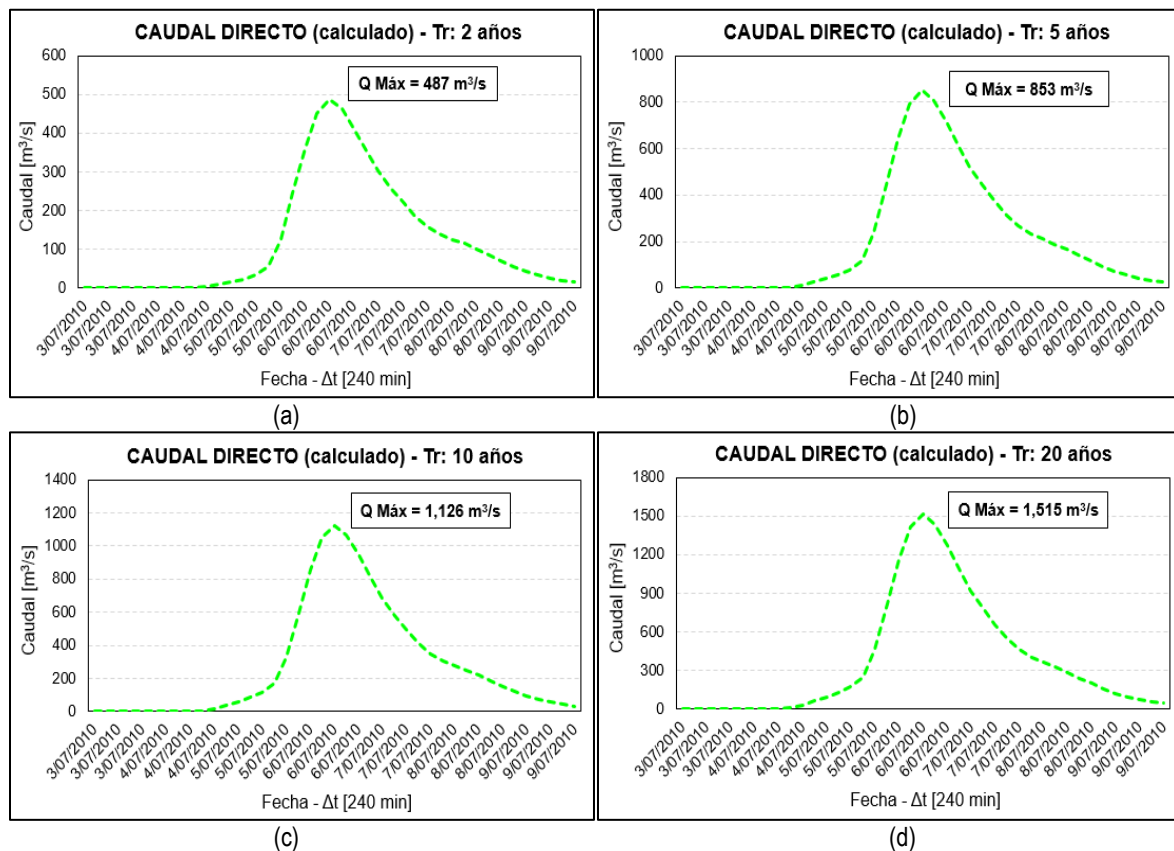


Figura 6.19. Caudal directo calculado para diferentes T_r : (a) 2 años, (b) 5 años, (c) 10 años y (d) 20 años con $f_x = 1$.

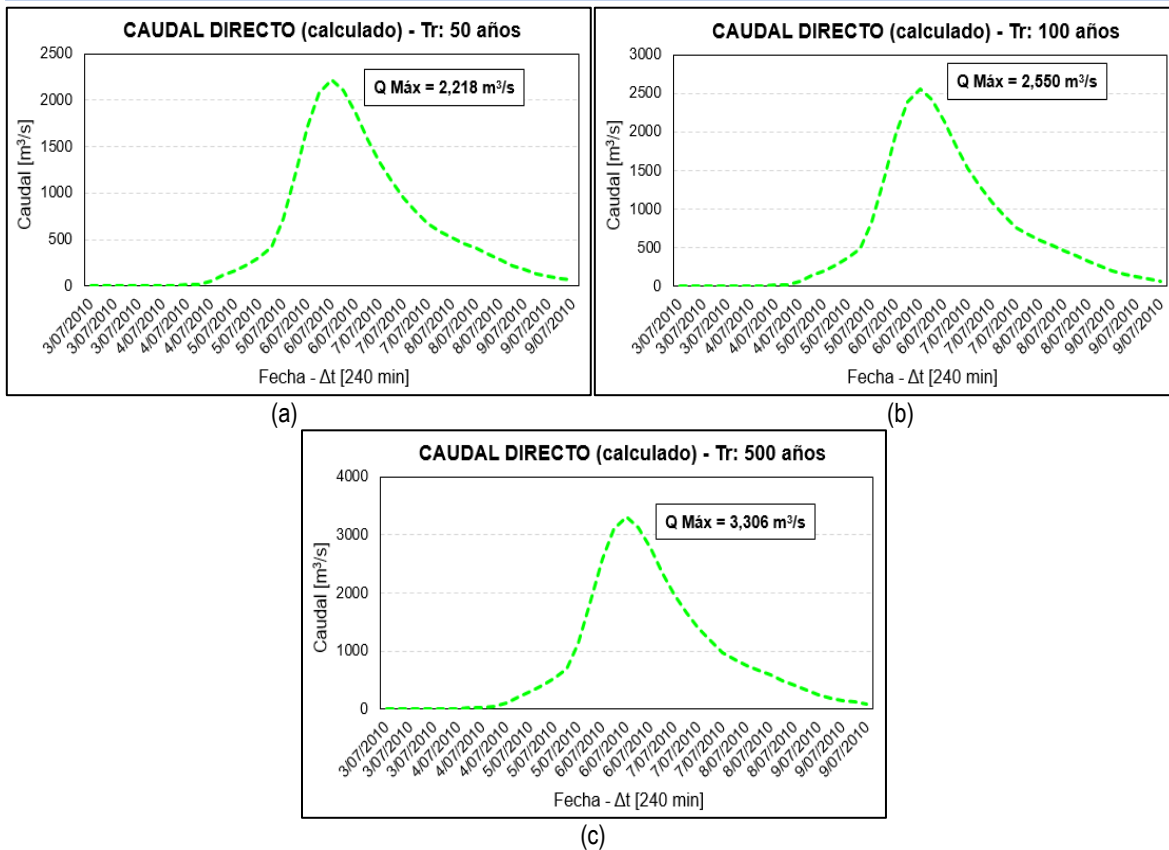


Figura 6.20. Caudal directo calculado para diferentes Tr: (a) 50 años, (b) 100 años y (c) 500 años con $f_x = 1$.

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos se recurrió a la definición del coeficiente de escurrimiento C , el cual representa la porción de la lluvia que escurre sobre la superficie del suelo. En la Tabla 6.10 se presentan los resultados:

Tabla 6.10. Coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno con $f_x = 1$.

Tr [años]	Factor de Escala de Retención Potencial (f_s)	Lluvia media [mm]	Lluvia en exceso [mm]	Coficiente de escurrimiento C	Variación C
2	0.50	59.3	24.1	0.41	--
5	0.55	85.9	42.3	0.49	0.08
10	0.60	105.9	56.0	0.53	0.04
20	0.65	132.6	75.6	0.57	0.04
50	0.70	177.2	111.4	0.63	0.06
100	0.75	199.8	128.2	0.64	0.01
500	0.77	244.5	167.3	0.68	0.04

Considerando que gran parte del suelo está constituido por pastizales y matorrales, y además la pendiente promedio de la cuenca es del 4.18 % (obtenida del Modelo de Elevación Digital), se compararon los coeficientes de escurrimiento para cada periodo de retorno con los obtenidos por Ven Te Chow [36] en su obra titulada «Hidrología Aplicada» (Imagen 1).

Se infiere que los valores de C sobrepasan los calculados por Ven Te Chow, por lo que se sobreestiman los gastos calculados.

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
<i>Condición pobre</i> (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio</i> (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena</i> (cubierta de pasto mayor del 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Nota: Los valores de la tabla son los estándares utilizados en la ciudad de Austin, Texas. Utilizada con autorización.

Imagen 1. Coeficientes de escurrimiento en función del periodo de retorno [36].

6.3.2 Escenario 2: factor de olvido $f_x < 1$

El factor de olvido se determinó recurriendo al término de Índice de Precipitación Antecedente (API), que se define como la suma ponderada de las cantidades anteriores de precipitación diaria que se utiliza como índice de humedad del suelo. El peso atribuido a la precipitación de cada día se considera generalmente como una

función exponencial o inversa del tiempo, de forma que las precipitaciones más recientes reciben mayor peso [37].

$$API = \sum_{t=-1}^{-j} P_t R^{-t} \tag{6.8}$$

Donde:

P_t : es la precipitación antes del periodo de estudio t

R : es el factor de recesión a escala diaria (24 horas)

t : es el periodo de tiempo en días transcurridos desde el último día con lluvia

j : es el número de días antecedentes

El factor R toma en cuenta la disminución de la humedad con el tiempo cuyo valor puede tomarse como 0.85 para cálculos diarios [38] [39] [40] [41].

Haciendo uso del factor R y considerando que para poder aplicarlo a otras duraciones es necesario elevarlo al cociente entre la duración deseada (en horas) y 24 horas, se procedió a determinar su valor teniendo en cuenta que el tamaño del intervalo de tiempo empleado en el MPE fue de 240 minutos, el resultado de esta operación se toma como el factor de olvido.

$$fx = 0.85^{4/24} = 0.973 \tag{6.9}$$

Se presentan a continuación, los resultados arrojados por el MPE para 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años periodo de retorno, en la Tabla 6.11 se observan los parámetros de pérdidas para cada Tr y en la Tabla 6.12 el resumen de los parámetros hidrológicos. Se consideró un gasto base de $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 6.11. Parámetros de pérdidas utilizados para cada periodo de retorno con $fx < 1$.

Parámetros de pérdidas	Periodo de retorno Tr [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Factor de Escala de Retención Potencial (fs)	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.77
Factor de olvido (fx)	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973

Tabla 6.12. Parámetros hidrológicos para cada periodo de retorno con $fx < 1$.

Parámetros	Periodo de retorno Tr [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Lluvia media [mm]	59.3	85.9	105.9	132.6	177.2	199.8	244.5
Pérdidas [mm]	42.9	56.2	66.0	77.9	95.1	105.0	119.1

Parámetros	Periodo de retorno Tr [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Lluvia en exceso [mm]	16.4	29.8	39.9	54.7	82.1	94.9	125.3
Volumen Total Calculado [Mm^3]	50128	90478	121160	165675	248465	287144	379189
Volumen Directo Calculado [Mm^3]	49552	89902	120584	165099	247889	286568	378613
Volumen Base Calculado [Mm^3]	576	576	576	576	576	576	576
Gasto Máximo del total Calculado [m^3/s]	399	711	946	1282	1897	2185	2851

A continuación, se presentan los gastos calculados para distintos periodos de retorno en la cuenca río Escondido (Figura 6.21 y Figura 6.22), la distribución temporal es similar en todos los casos, además se aprecia cómo se está reproduciendo el comportamiento de las tormentas estimadas. Como en el caso anterior, en general para cada hidrograma se observa que el punto de levantamiento ocurre el día 4 de julio de 2010 a las 15:50 p.m., el gasto máximo producido por cada tormenta se alcanza el día 6 de julio de 2010 a las 11:50 a.m., la curva de recesión empieza el día 6 de julio de 2010 a las 23:50 p.m. aproximadamente, mientras que el final de la escorrentía se extiende hasta el día 9 de julio de 2010 a las 19:50 p.m. Los registros completos parecen en el ANEXO A.

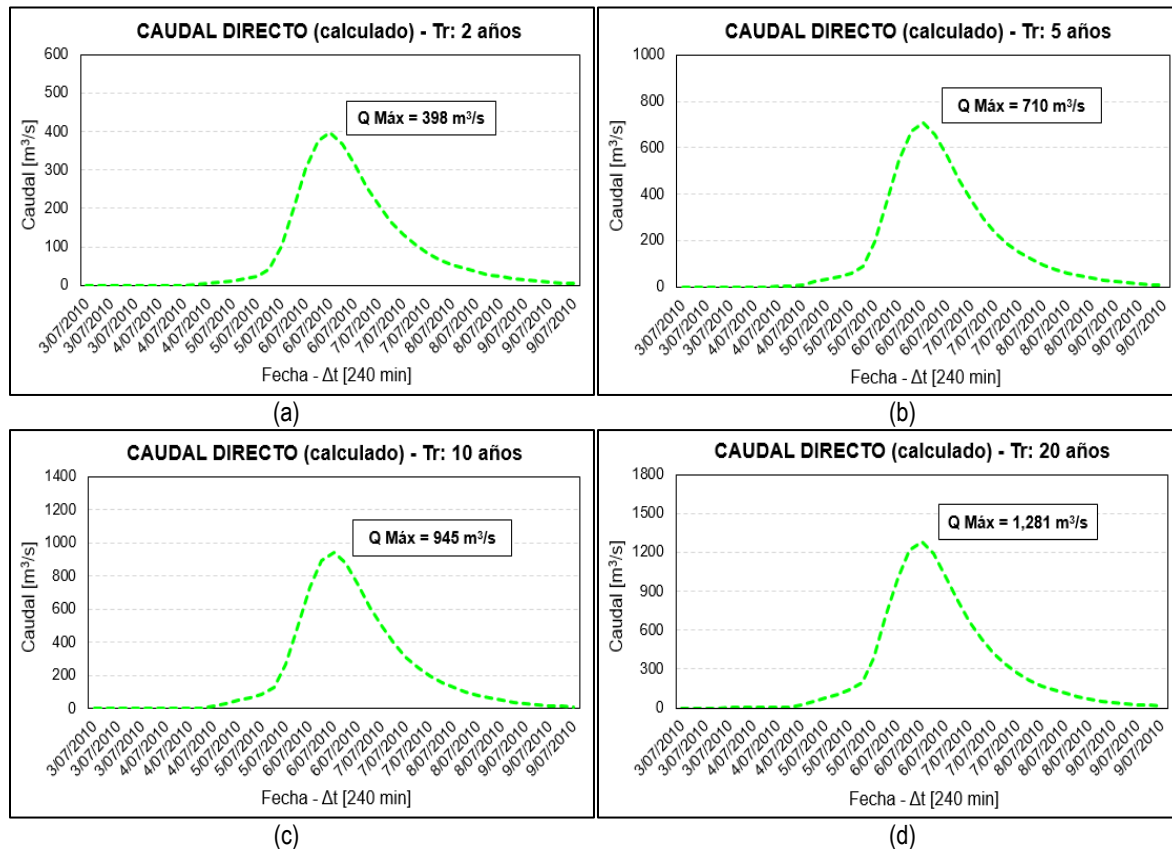


Figura 6.21. Caudal directo calculado para diferentes Tr : (a) 2 años, (b) 5 años, (c) 10 años y (d) 20 años con $f_x < 1$.

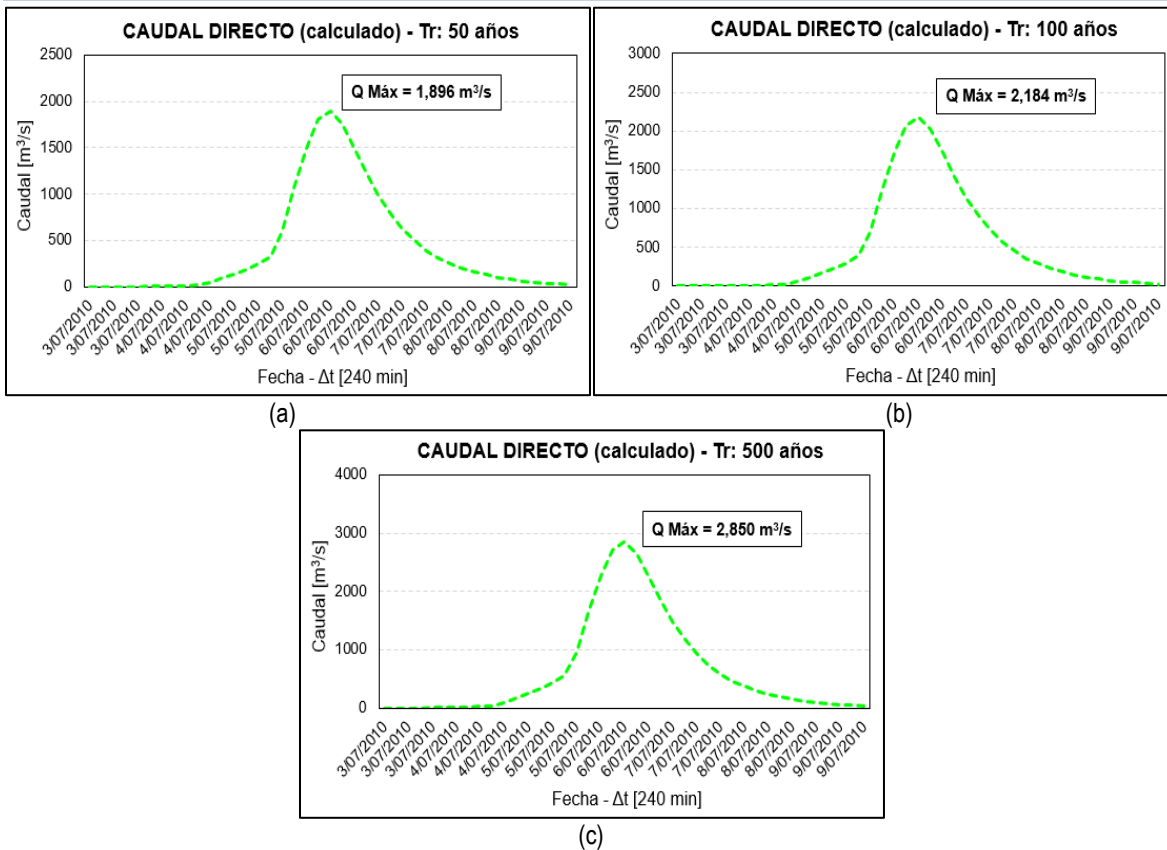


Figura 6.22. Caudal directo calculado para diferentes Tr: (a) 50 años, (b) 100 años y (c) 500 años con $f_x < 1$.

Tabla 6.13. Coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno con $f_x < 1$.

Tr [años]	Factor de Escala de Retención Potencial (f_s)	Lluvia media [mm]	Lluvia en exceso [mm]	Coefficiente de escurrimiento C	Variación C
2	0.50	59.28	16.41	0.28	--
5	0.55	85.93	29.76	0.35	0.07
10	0.60	105.91	39.92	0.38	0.03
20	0.65	132.55	54.66	0.41	0.04
50	0.70	177.18	82.07	0.46	0.05
100	0.75	199.83	94.88	0.47	0.01
500	0.77	244.45	125.35	0.51	0.04

Al comparar los coeficientes de escurrimiento con los obtenidos por Ven Te Chow [36] se infiere que existe un mejor ajuste que en el escenario 1, por lo que se eligen los caudales estimados utilizando $f_x < 1$, en los que se permite mayor evapotranspiración y menor escurrimiento para la cuenca río Escondido.

6.4 Influencia del ENSO en la hidroclimatología de la región

6.4.1 Dispersión de datos y regresión lineal simple

La regresión lineal consiste en generar una ecuación (modelo) que, basándose en la relación existente entre ambas variables, permita predecir el valor de una a partir de la otra [42].

En este caso se graficó en el eje de las ordenadas la precipitación promedio estandarizada a escala mensual y en el eje de las abscisas los valores del índice ONI, posteriormente se obtuvo la ecuación que relaciona ambas variables junto con el coeficiente de determinación r^2 , que se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión, oscila entre 0 y 1, entre más cercano sea a la unidad significa que la ecuación es más fiable para la predicción del parámetro deseado.

A continuación, como primer análisis exploratorio se presentan los gráficos de dispersión para cada registro de lluvia.

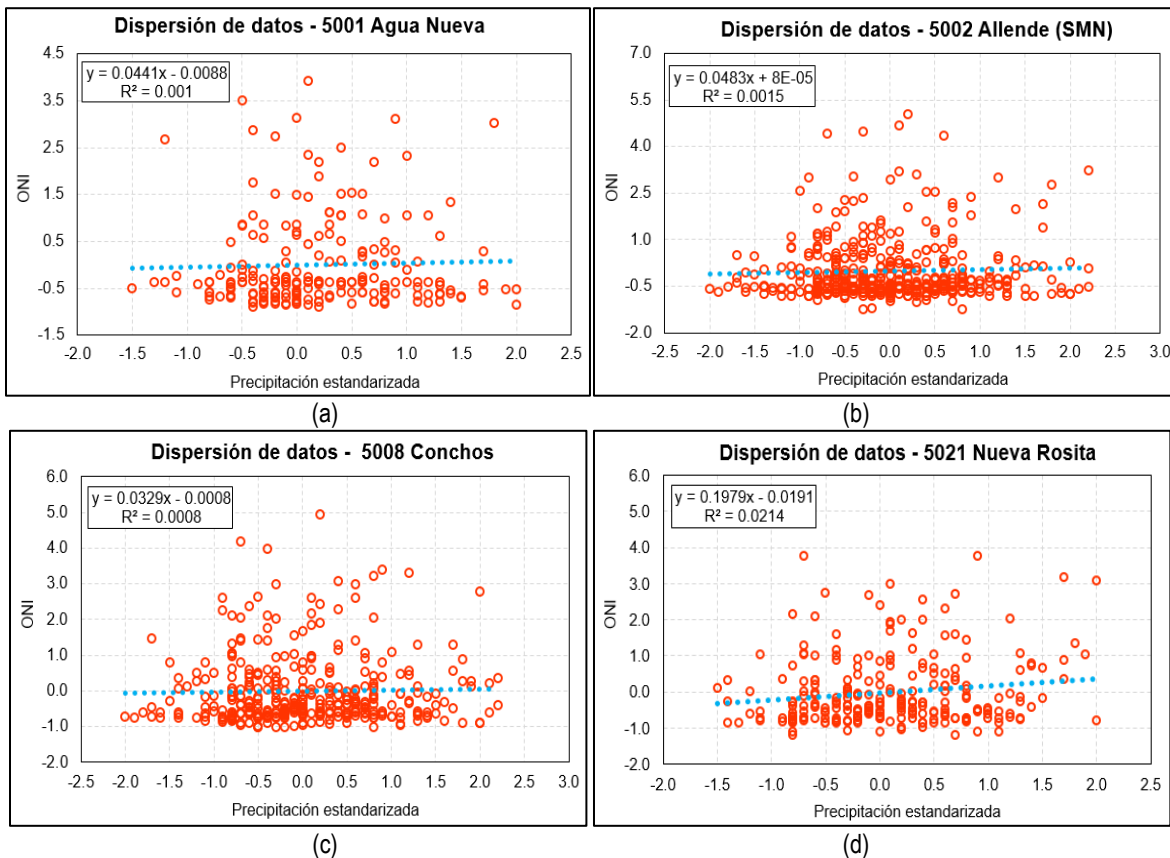


Figura 6.23. Dispersión y regresión lineal simple: (a) 5001 Agua Nueva, (b) 5002 Allende (SMN), (c) 5008 Conchos y (d) 5021 Nueva Rosita

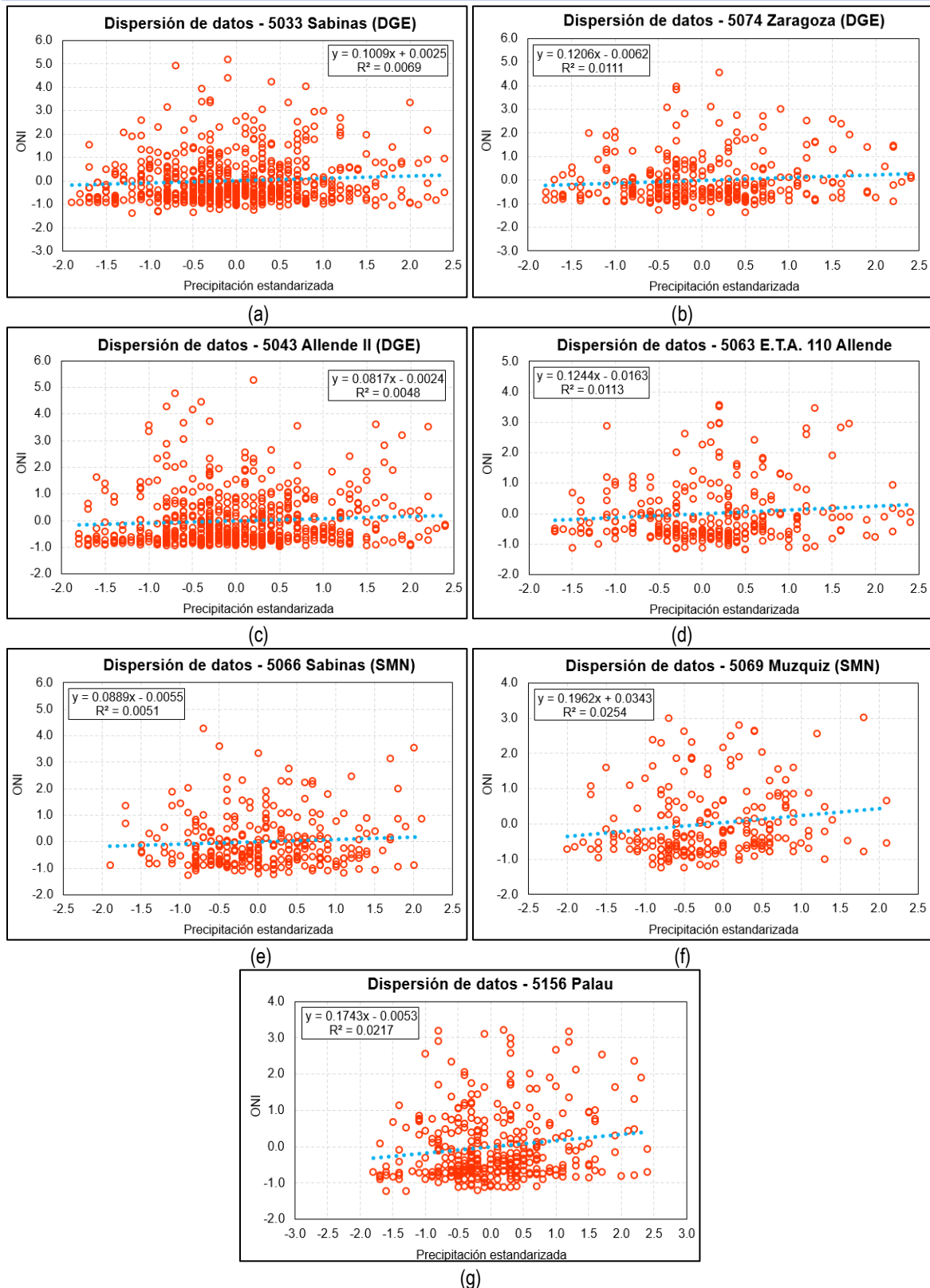


Figura 6.24. Dispersión y regresión lineal simple: (a) 5033 Sabinas (DGE), (b) 5074 Zaragoza (DGE), (c) 5043 Allende II (DGE), (d) 5063 E.T.A. 110 Allende, (e) 5066 Sabinas (SMN), (f) 5069 Muzquiz (SMN) y (g) 5156 Palau.

Para las 11 estaciones se observa que la mayoría de puntos se encuentran concentrados entre -2 y 2 respecto a los ejes X e Y, a partir del 2 en el eje vertical se aprecia mayor dispersión de los datos incluso varios puntos alcanzan valores de hasta 6 unidades; el coeficiente de determinación es muy bajo para todas las estaciones del orden de 0.01, lo que indica que la ecuación no es fiable para la predicción del índice ONI, nótese también que la relación entre las variables no es lineal.

A continuación, se presenta el coeficiente de determinación obtenido para cada estación:

Tabla 6.14. Estadísticos para cada registro de lluvia (estandarizada).

Código	Estación	Coefficiente de determinación r^2
5001	Agua Nueva	0.0010
5002	Allende (SMN)	0.0015
5008	Conchos	0.0008
5021	Nueva Rosita	0.0214
5033	Sabinas (DGE)	0.0069
5074	Zaragoza (DGE)	0.0111
5043	Allende II (DGE)	0.0048
5063	E.T.A. 110 Allende	0.0113
5066	Sabinas (SMN)	0.0051
5059	Muzquiz (SMN)	0.0254
5156	Palau	0.0217

En la siguiente tabla se recogen algunos estadísticos de cada registro de lluvia (estandarizada), como era de esperarse el valor de la media es 1 y la desviación estándar 0:

Tabla 6.15. Estadísticos para cada registro de lluvia (estandarizada).

Estadístico/Estación	5001	5002	5008	5021	5033	5074	5043	5063	5066	5069	5156
Número de datos	205	415	357	244	659	313	608	271	276	218	356
Media	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Desviación Estándar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mínimo	-0.894	-1.241	-1.013	-1.190	-1.363	-1.347	-0.960	-1.180	-1.250	-1.229	-1.220
Máximo	3.9130	5.0400	4.9400	3.7400	5.1920	4.5686	5.2600	3.5600	4.2900	3.0200	4.2200
Asimetría	1.8490	2.2571	1.9674	1.5658	1.8641	1.7387	1.9950	1.6298	1.5471	1.2840	1.6013
kurtosis	3.0909	5.9798	4.2690	2.2559	4.2549	3.2874	4.8764	2.4188	2.5948	0.9423	2.6362

Con base a lo anterior y como primera aproximación estadística se infiere que no existe una relación fuerte entre las variables analizadas, sin embargo, se debe considerar que los registros de lluvia tienen datos faltantes.

6.4.2 Resultados correlación gráfica

Las oscilaciones positivas del ONI y negativas del SOI indican fase El Niño y por tanto una disminución en la precipitación, mientras que las oscilaciones negativas del ONI y positivas del SOI hacen referencia a fase La Niña y un incremento en la lluvia. Con base en lo anterior se presentan los resultados de la correlación gráfica para cada uno de los 11 registros de lluvia:

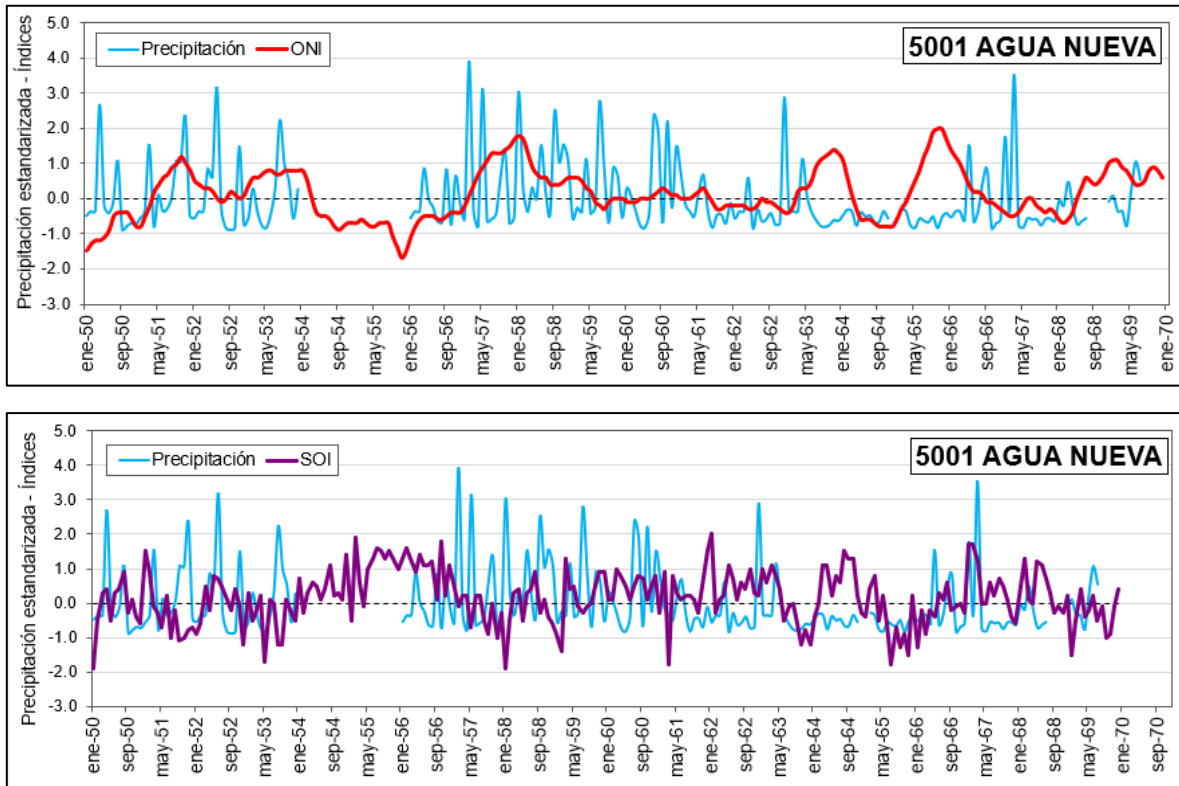


Figura 6.25. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5001 Agua Nueva.

Para la estación 5001 Agua Nueva no se aprecia con claridad la influencia del ENSO en el comportamiento de la lluvia, si bien existen pequeños tramos en los que para oscilaciones positivas del ONI (fase cálida) se observa disminución de la precipitación, por ejemplo, entre 1963 a 1964 se registró la ocurrencia de un evento El Niño de magnitud moderada, y de 1965 a 1966 se registró un evento El Niño fuerte, periodos para los cuales se presentó disminución de lluvia; sin embargo, al no contar con registros completos no es posible inferir resultados concluyentes. Además de que en la mayor parte del registro no se observa ninguna correspondencia con el fenómeno.

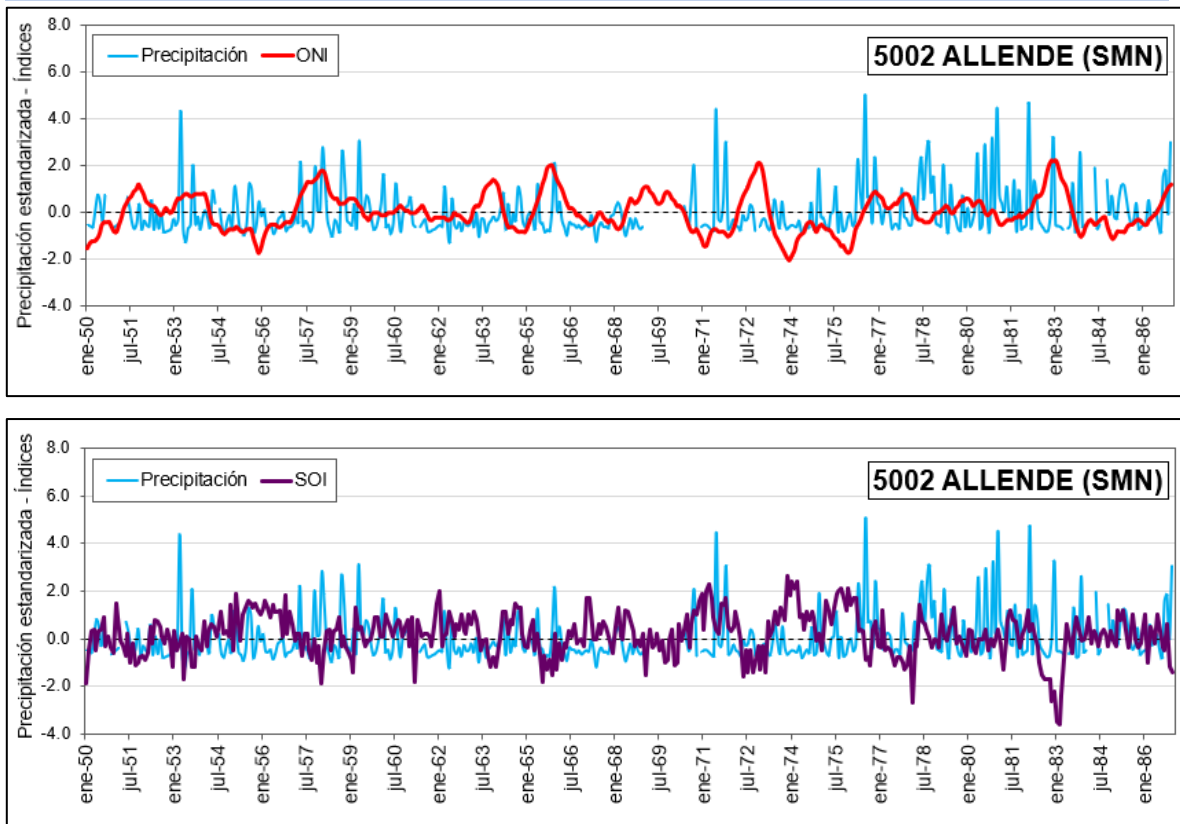


Figura 6.26. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5002 Allende (SMN).

En la estación 5002 Allende (SMN) se logra visualizar cierta consistencia entre el fenómeno ENSO y el comportamiento de la lluvia desde 1950 a 1968 aunque existen periodos donde la lluvia sigue un comportamiento de incrementos y decrementos súbitos, además nótese que hay tramos donde la tendencia de incrementos en las lluvias bajo influencia de La Niña y disminuciones bajo la influencia de El Niño, desaparecen por completo, por ejemplo, entre 1974 y 1975.

En la Figura 6.27 estación 5008 Conchos se observa: entre 1957 y 1958 anomalías positivas para el ONI y negativas para el SOI que indican la ocurrencia de una fase El Niño de magnitud fuerte, periodo en el que la precipitación disminuyó acorde con el evento ocurrido; entre 1963 a 1964 del año +1 y entre 1964 del año +0 a 1965 se registraron un evento El Niño de magnitud moderada y La Niña de magnitud débil respectivamente, acorde con el comportamiento de la lluvia donde se observan disminuciones para el primer periodo y algunos incrementos para el segundo, mostrando la influencia del fenómeno; entre 1973 y 1974 se registró un evento La Niña de magnitud fuerte consecuente con las anomalías negativas del ONI y positivas del SOI, periodo en el que la precipitación refleja incrementos súbitos. Sin embargo, existen mayor cantidad de tramos donde la correspondencia del fenómeno ENSO desaparece por completo.

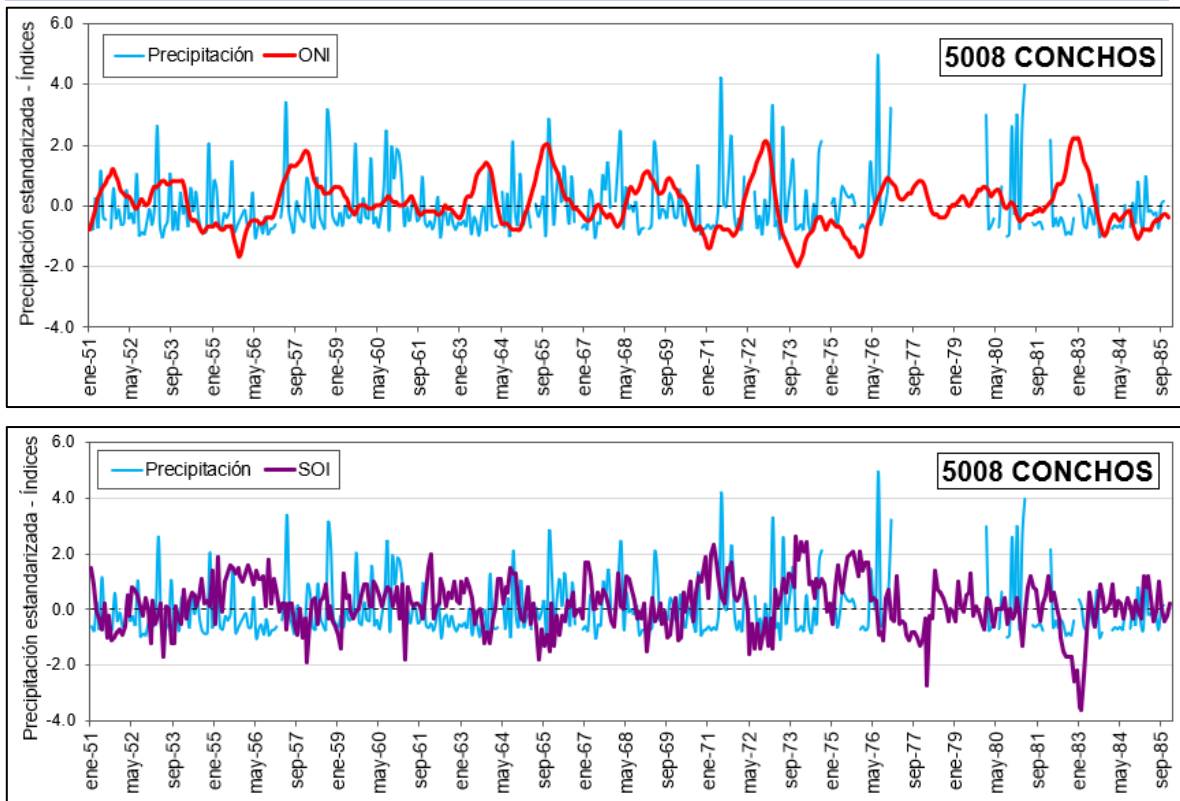


Figura 6.27. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5008 Conchos.

En la Figura 6.28 estación 5021 Nueva Rosita se observa un comportamiento similar al descrito en las estaciones 5001 Agua Nueva, 5002 Allende (SMN) y 5008 Conchos, donde se puede apreciar que de manera aproximada solo en algunos tramos frente a oscilaciones positivas del ONI y negativas del SOI (fase El Niño), la precipitación muestra anomalías negativas (disminución), por ejemplo, entre 1968 y 1969; mientras que las anomalías positivas (incrementos), se correlacionan con oscilaciones negativas del ONI y positivas del SOI (fase La Niña), por ejemplo entre 1964 y 1965. Es importante aclarar que como el registro tiene datos faltantes no es posible determinar con certeza el comportamiento real de la precipitación.

En la Figura 6.29 estación 5033 Sabinas (DGE) se observa un comportamiento similar como al descrito anteriormente, donde se puede apreciar que de manera aproximada solo en algunos tramos frente a oscilaciones positivas del ONI y negativas del SOI (fase El Niño), la precipitación muestra anomalías negativas (disminución), por ejemplo entre 1963 y 1964, mientras que las anomalías positivas (incrementos), se correlacionan con oscilaciones negativas del ONI y positivas del SOI (fase La Niña), por ejemplo entre 1988 y 1989.

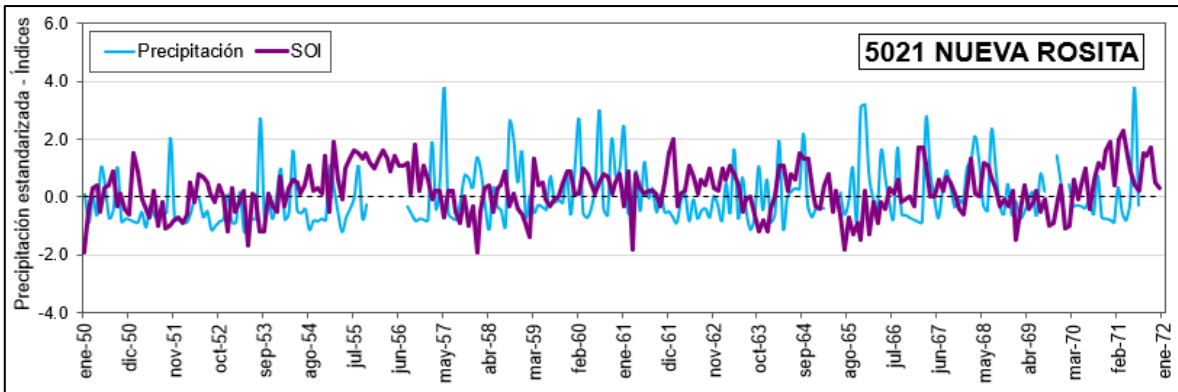
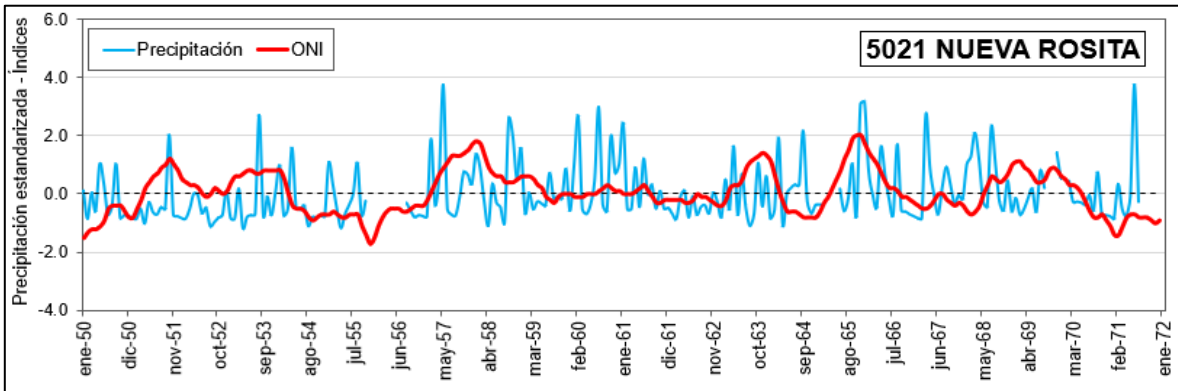


Figura 6.28. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5021 Nueva Rosita.

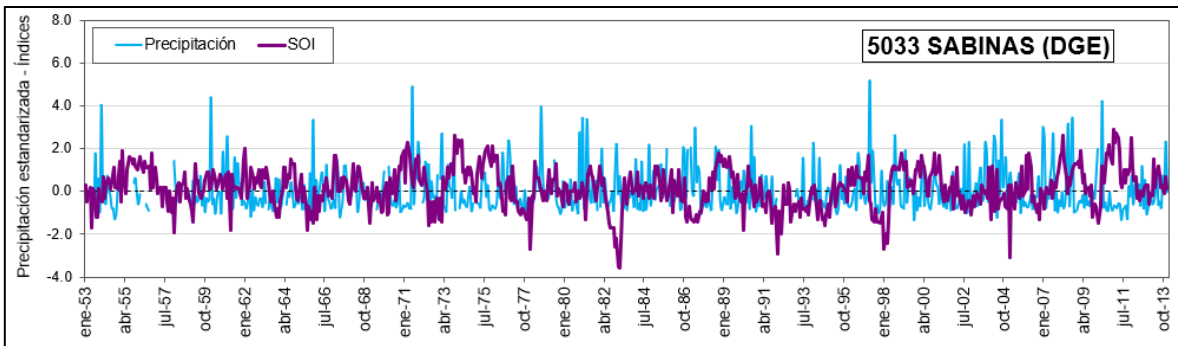
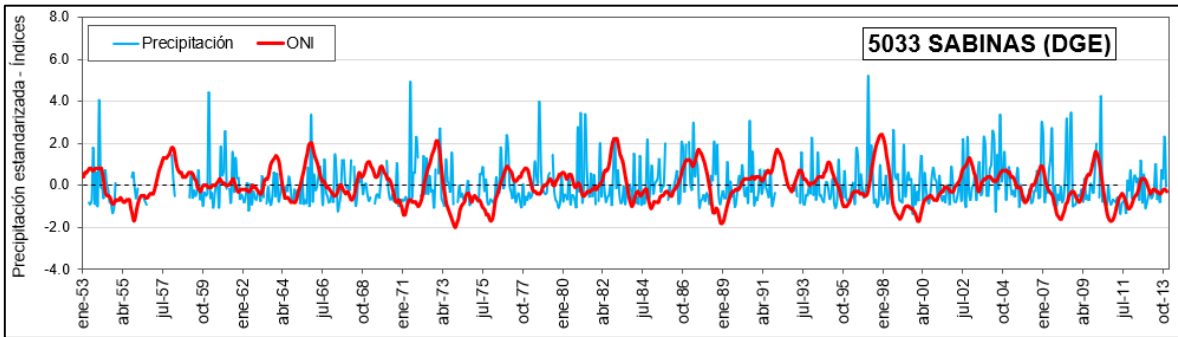


Figura 6.29. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5033 Sabinas (DGE).

En la Figura 6.30 estación 5074 Zaragoza (DGE) se observa que la ocurrencia de un evento La Niña fuerte entre 1988 y 1989 pudo influir en el aumento de la lluvia, mientras que entre 1997 y 1998 se registró una fase El Niño de magnitud muy fuerte, y como era de esperarse la precipitación disminuyó, la estación en mención tiene 28 % de datos faltantes lo que influye en la baja certeza de conocer el comportamiento real de la lluvia.

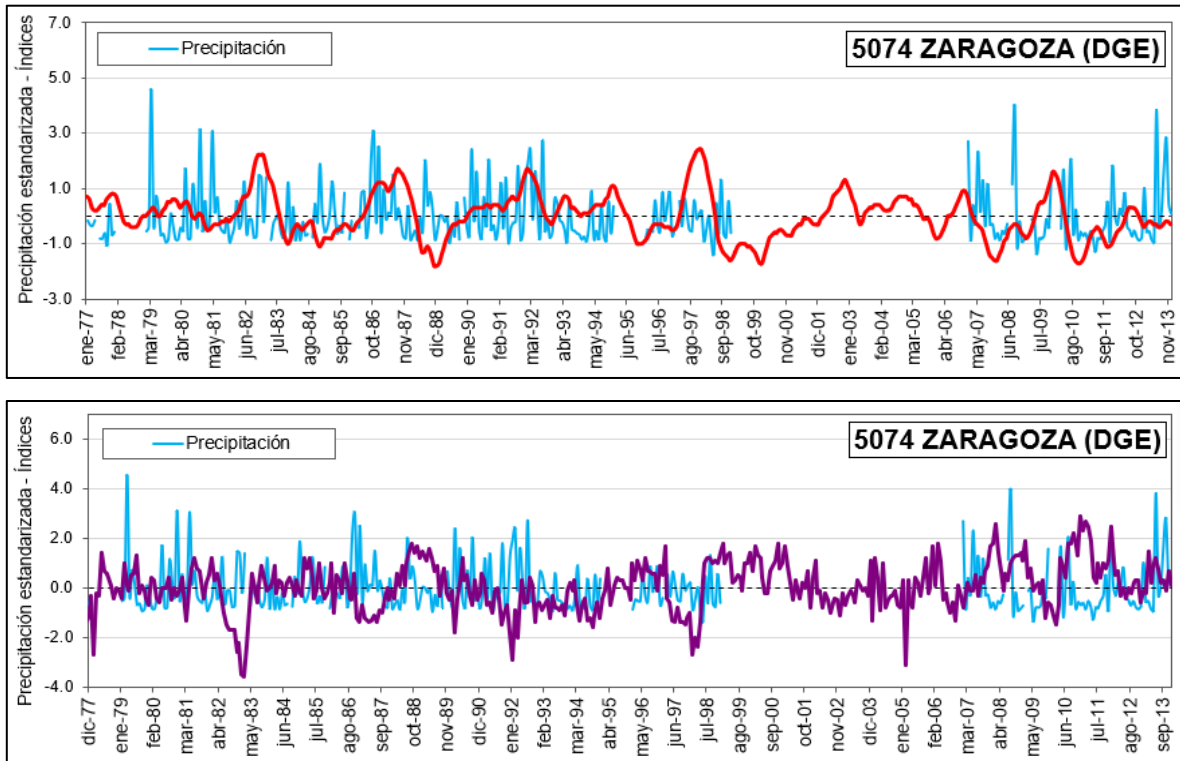


Figura 6.30. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5074 Zaragoza (DGE).

En la estación 5043 Allende II (DGE) (Figura 6.31) se aprecian incrementos de la lluvia entre 1983 y 1985 bajo la ocurrencia de fase La Niña, aunque haya sido de magnitud débil generó incrementos notorios.

En la Figura 6.32 estación E.T.A. 100 Allende se observa un decremento de la lluvia entre 1997 a 1998 del año +0 coincidiendo con un evento El Niño muy fuerte, en tanto que entre 1998 del año +1 a 2000 se aprecia incremento de la precipitación coincidiendo con una fase La Niña de magnitud fuerte, sin embargo, el porcentaje de datos faltantes del 22 % impiden conocer su comportamiento real y completo.

En la Figura 6.33 se aprecia que entre 1951 y 1952 hay decremento de la lluvia coincidiendo con fase moderada de El Niño, se puede decir que el comportamiento de la precipitación para 5066 Sabinas (SNM) es como el descrito antes, existen tramos donde hay influencia del fenómeno y otros donde desaparece completamente. La estación 5069 Muzquiz (SMN) (Figura 6.34) con 23 % de datos faltantes dificulta identificar si existe o no influencia del ENSO para cada año, este análisis resulta no concluyente para la estación en mención.

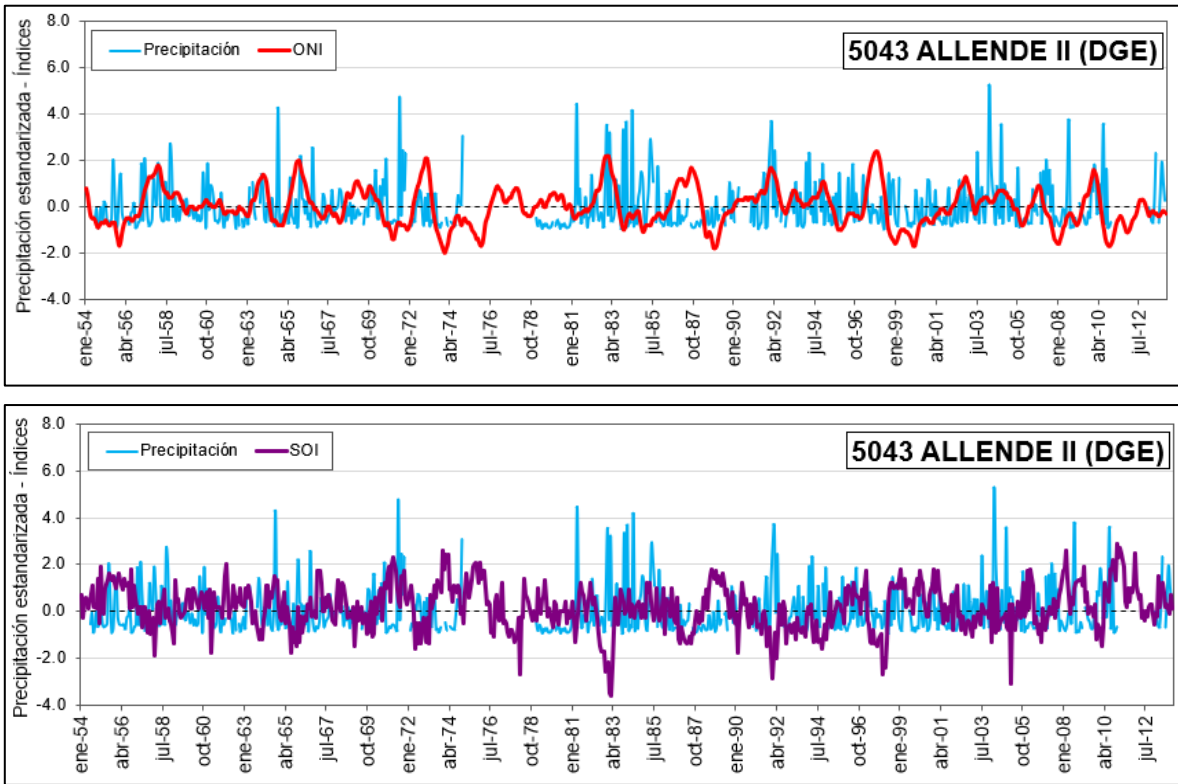


Figura 6.31. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5043 Allende II (DGE).

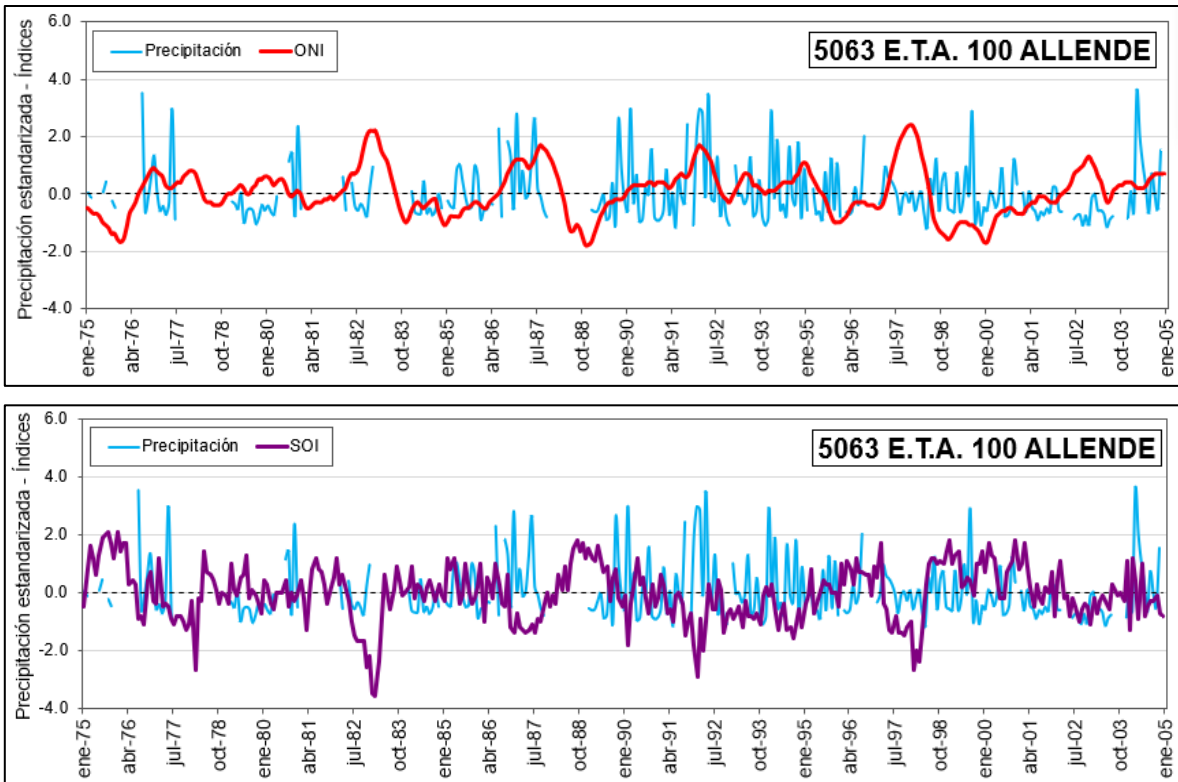


Figura 6.32. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5063 E.T.A Allende.

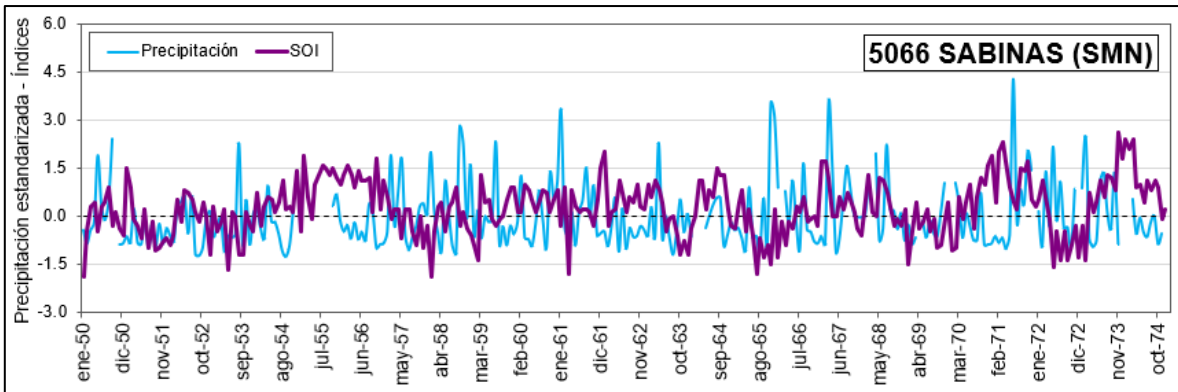
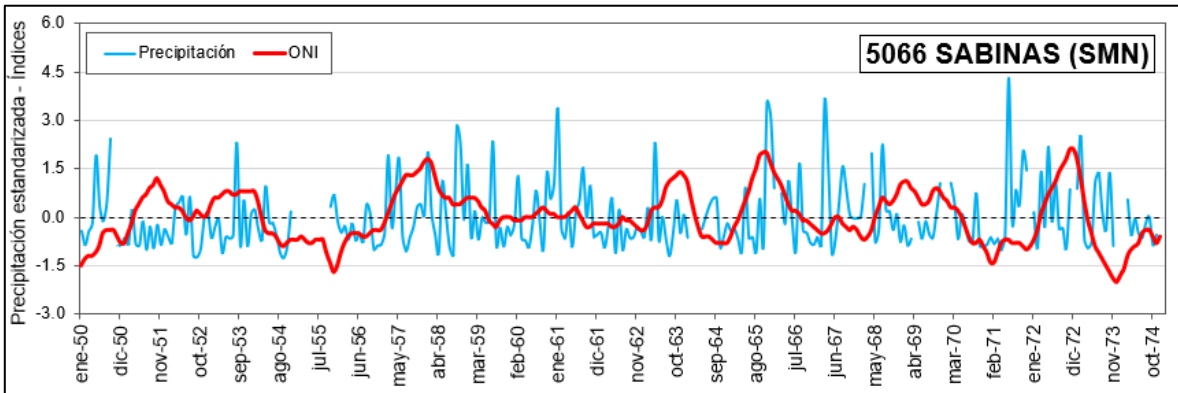


Figura 6.33. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5066 Sabinas (SMN).

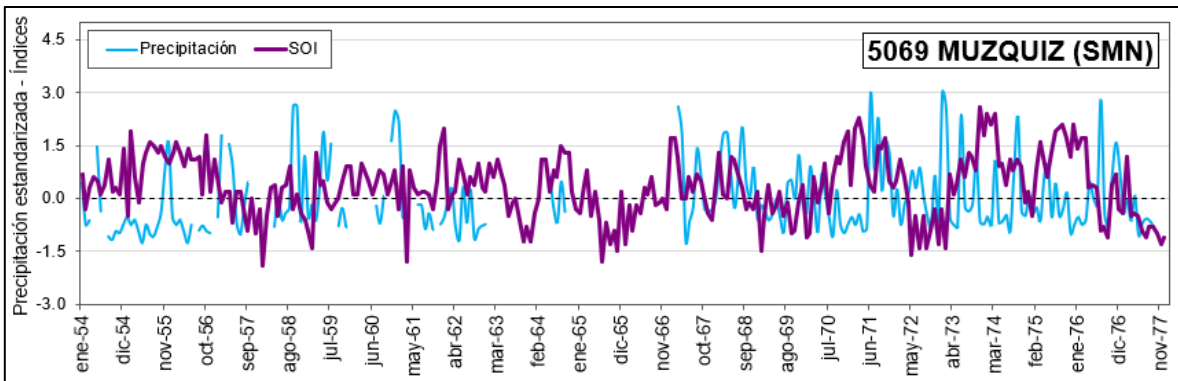
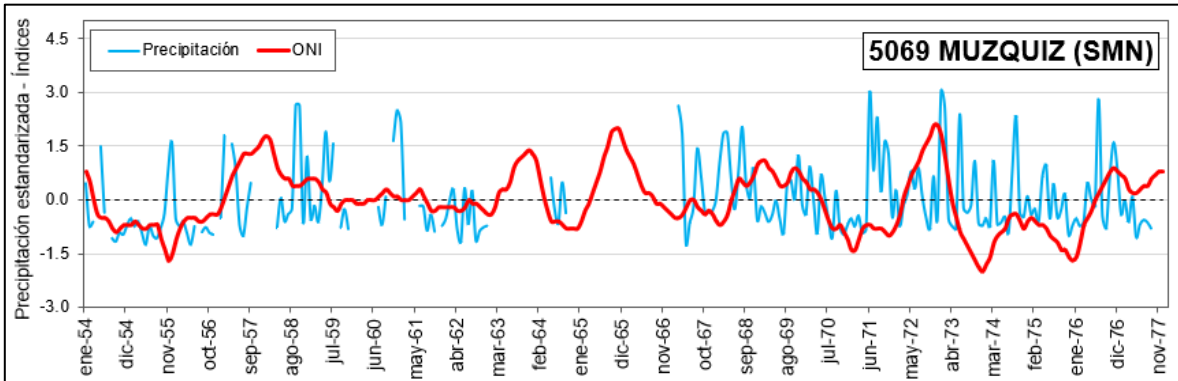


Figura 6.34. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - 5069 Muzquiz (SNM).

Finalmente, al observar la estación 5156 Palau (Figura 6.35) también se aprecian algunos periodos donde se identifica correspondencia aproximada del fenómeno ENSO con la precipitación, por ejemplo, entre 1983 a 1985 bajo fase La Niña de magnitud débil ocurren incrementos y disminuciones súbitas de la lluvia.

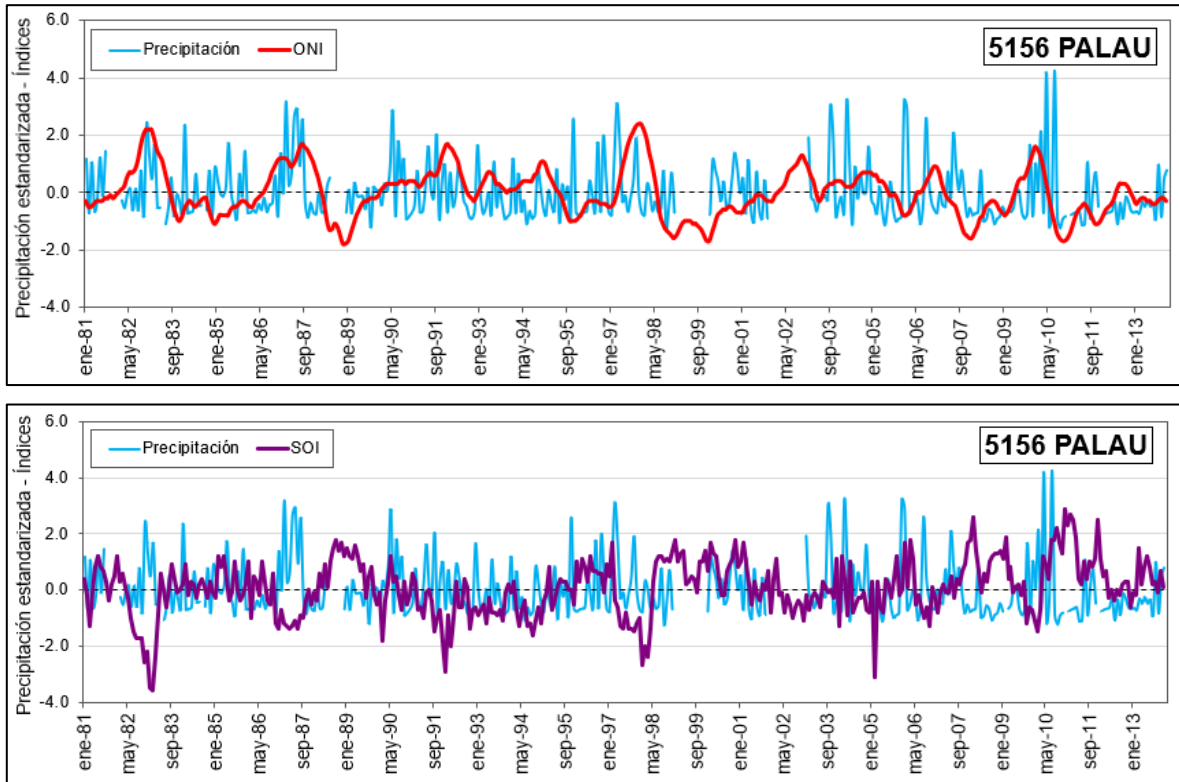


Figura 6.35. Correlación gráfica de la precipitación con los índices ONI (superior) y SOI (inferior) - estación 5156 Palau.

En términos generales no se identifica influencia clara y persistente del fenómeno ENSO en el comportamiento de la precipitación en la región, se identificaron los periodos más notorios donde se observan incrementos y disminuciones de la lluvia asociados a fases El Niño y La Niña, si bien es verdad que hay puntos muy claros donde la precipitación es consistente con el fenómeno., son más los periodos o tramos donde la influencia desaparece por completo; por lo que es necesario realizar otros análisis complementarios.

6.4.3 Resultados variación interanual – correlación cruzada

El correlograma cruzado muestra las variaciones del coeficiente de correlación con las variaciones del periodo de desfase o lag determinado (meses), se consideraron 200 meses como el número total de desfases para cada estación.

Un valor positivo para el índice ONI indica temporada cálida (El Niño) y un valor negativo temporada fría (La Niña), mientras que para el índice SOI la variación se invierte, un valor positivo indica fase fría y un valor

negativo fase cálida, por lo anterior desde la Figura 6.36 a la Figura 6.38, se observa que mientras el ONI crece y alcanza su valor máximo, el SOI registra su valor mínimo y viceversa.

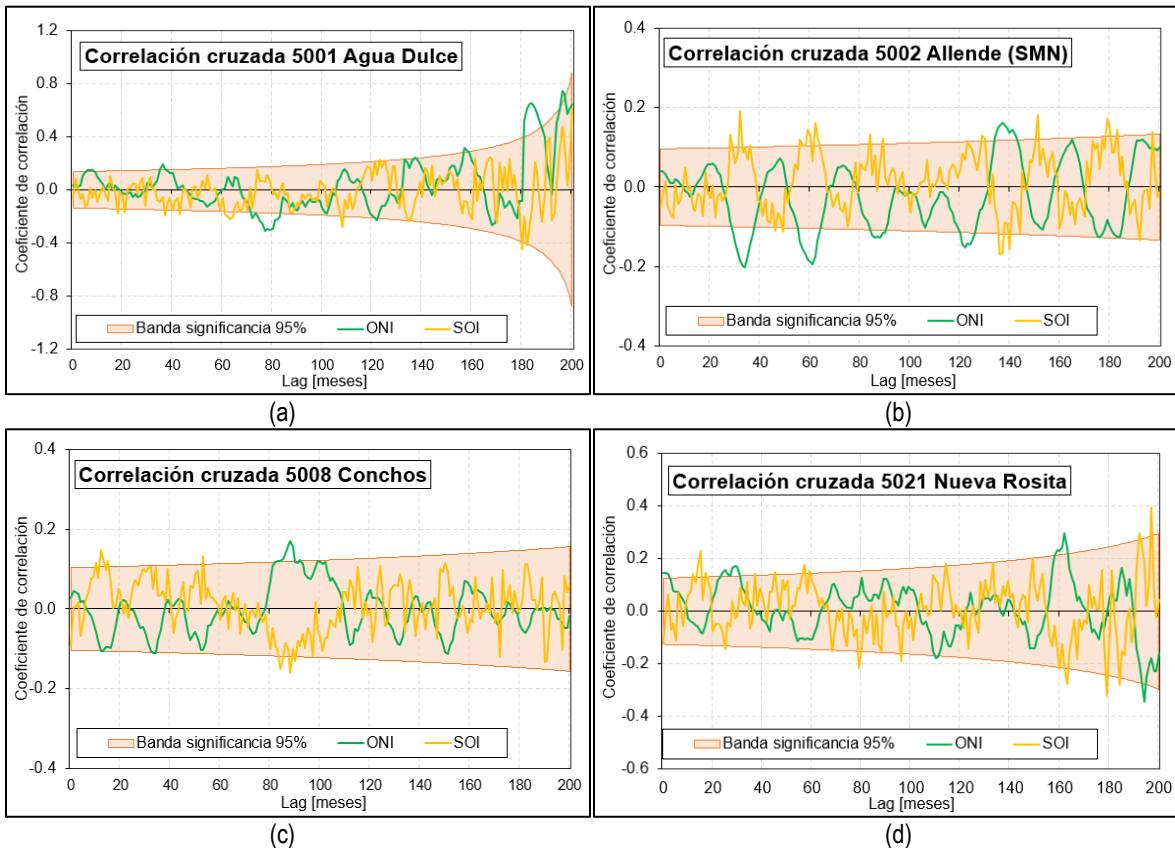


Figura 6.36. Correlogramas cruzados para la precipitación mensual estandarizada vs los índices ONI y SOI: (a) 5001 Agua Dulce, (b) 5002 Allende (SMN), (c) 5008 Conchos y (d) 5021 Nueva Rosita.

En la Figura 6.36 (a) se observa para el lag 80 un valor del coeficiente de correlación (entre el ONI y la precipitación) alto y negativo -0.2955, mientras que para un retardo de 184 meses un valor de 0.6516, siendo estos estadísticamente significativos, sin embargo para estos periodos no se registra ninguna fase del fenómeno ENSO. Para la estación 5002 Allende (SMN) (Figura 6.36 (b)) se alcanzan varios puntos donde el coeficiente de correlación alcanza la significación estadística: 33, 60, 85, 88, 122, 131, 152 y 180 meses, sin embargo, para estos periodos no hay correspondencia alguna con el fenómeno ENSO, se registran nuevamente puntos significativos a los 138 meses con valor de 0.1563 (ONI) y a los 137 meses con valor de 0.1687 (SOI) donde hay coincidencia efectivamente con una fase El Niño moderada donde el comportamiento de la lluvia muestra pequeñas disminuciones desfasadas en el tamaño del retardo (200 meses).

En la estación 5008 Conchos (Figura 6.36 (c)) se alcanzan los dos primeros puntos estadísticamente significantes en 14 y 54 meses aunque no hay ocurrencia del fenómeno ENSO, posteriormente se observa para

los retardos de 88 meses (ONI) un valor de 0.1708, para 85 meses (SOI) un valor de -0.1507 y finalmente para 89 meses (SOI) un valor de -0.1617, coincidiendo con una fase El Niño en 1958 del año +1 donde efectivamente se observan disminuciones en la precipitación registrada. En la Figura 6.36 (d) se aprecian varios puntos donde se alcanza la significancia estadística tanto con el índice ONI como con el índice SOI, pero únicamente se observa correspondencia con el fenómeno ENSO en fase El Niño para el lag 30 con valor de 0.1689 (ONI) y el lag 26 con valor de -0.1454 (SOI), en el año de 1953.

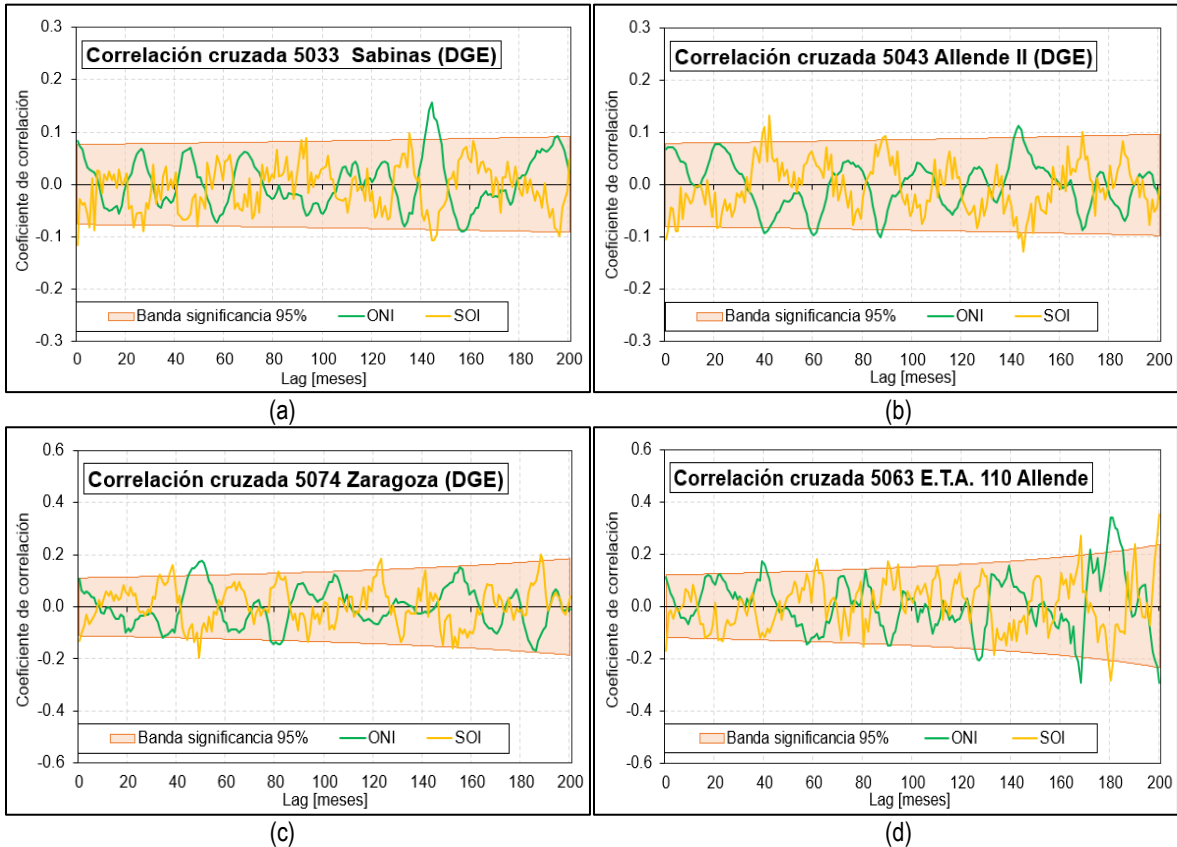


Figura 6.37. Correlogramas cruzados para la precipitación mensual estandarizada vs los índices ONI y SOI del ENSO: (a) 5033 Sabinas (DGE), (b) 5043 Allende II (DGE), (c) 5074 Zaragoza (DGE) y (d) 5063 E.T.A. 110 Allende.

En la Figura 6.37 (a) se alcanza la significancia estadística en el lag 144 (ONI) y en el lag 146 (SOI), aunque en este punto no existe ocurrencia del fenómeno ENSO.

Para la estación 5043 Allende II (DGE) (Figura 6.37 (b)) los únicos puntos significativos que corresponden con una fase (El Niño) del fenómeno son el lag 144 con valor de 0.10628 (ONI) y el lag 146 con valor de -0.12852 (SOI), sin embargo, el comportamiento de la lluvia no reproduce ninguna disminución.

En la Figura 6.37 (c) estación 5074 Zaragoza (DGE) ninguno de los puntos estadísticamente significantes presenta correspondencia con el fenómeno El Niño, Oscilación del Sur.

Por otro lado en la Figura 6.37 (d) el único punto estadísticamente significativo que presenta correspondencia con una fase La Niña del fenómeno ENSO es en el lag 200 con valor de -0.2912 (ONI) y valor de 0.3509 (SOI), y efectivamente se observan pequeños incrementos en la lluvia registrada con retardo positivo del tamaño del desfase.

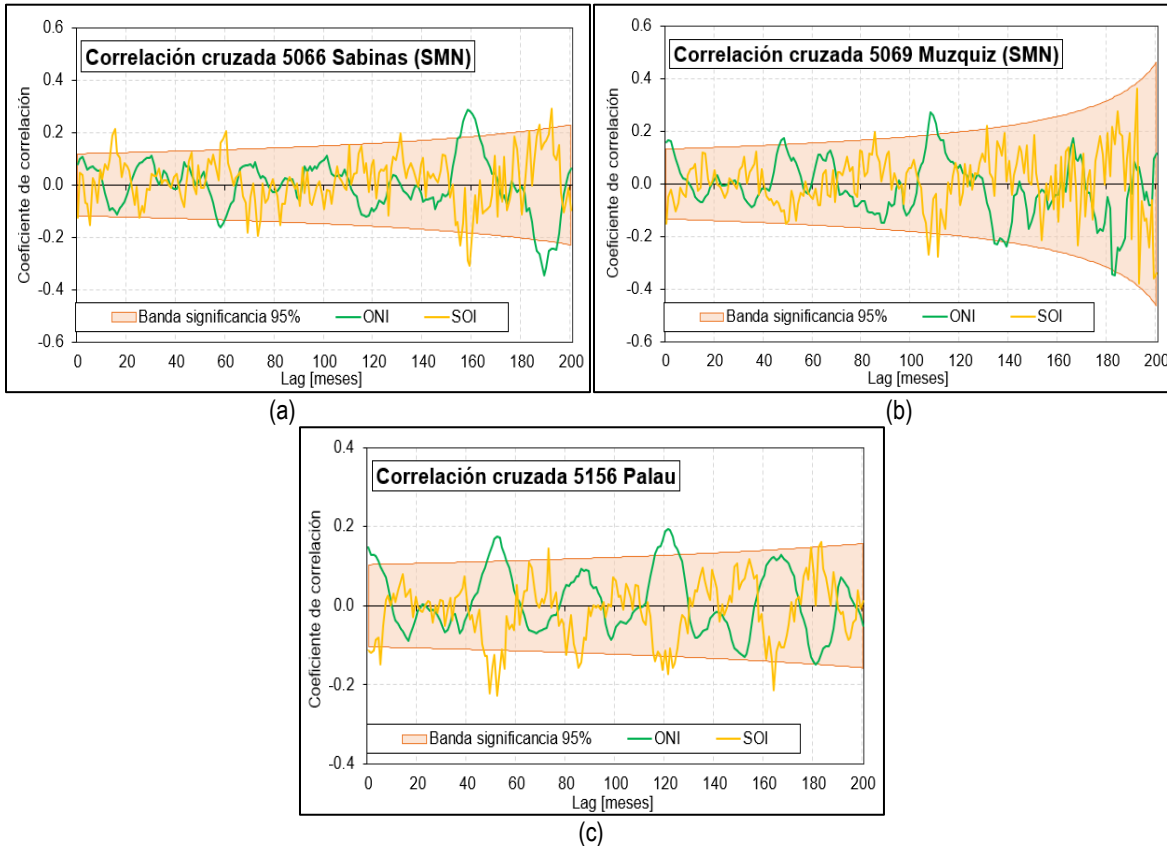


Figura 6.38. Correlogramas cruzados para la precipitación mensual estandarizada vs los índices ONI y SOI del ENSO: (a) 5066 Sabinas (SMN), (b) 5069 Muzquiz (SMN) y (c) 5156 Palau.

En la Figura 6.38 (a) estación 5066 Sabinas (SMN) se determinó que únicamente en los puntos de lag 58 (ONI) con valor de -0.1611 y lag 61 (SOI) con valor de 0.2030 indican y corresponden a una fase La Niña ocurrida en entre 1954 y 1956 donde se observan pequeños incrementos de la precipitación registrada. En tanto que para la estación 5069 Muzquiz (SMN) (Figura 6.38 (b)) se determinó que no existe ningún punto que corresponda con la ocurrencia del fenómeno ENSO. Y finalmente en la estación 5156 Palau (Figura 6.38 (c)) tampoco se encontró correspondencia con eventos El Niño o La Niña.

Con base en el análisis anterior se infiere que no existe influencia del fenómeno ENSO en tiempos desfasados o retardados en la precipitación, debido a que son apenas puntos los que corresponden con alguna fase El Niño o La Niña, inclusive se pudo apreciar que el coeficiente de correlación de la mayoría de estaciones apenas si alcanzan la significación estadística al 95 %.

6.4.4 Resultados variación estacional – correlación lineal simple

Para las 11 estaciones de precipitación se calcularon los coeficientes de correlación lineal de Pearson considerando la clasificación trimestral de la lluvia (promedio sin estandarizar) y los índices macroclimáticos ONI y SOI.

En la Tabla 6.16 se presentan los resultados obtenidos de la correlación entre la precipitación trimestral y el índice ONI, mientras que en la Figura 6.39 se muestra la distribución espacial de los coeficientes de correlación en el área de interés.

Tabla 6.16. Correlación entre las series trimestrales de la precipitación en la zona y el índice ONI.

Estación Código - Nombre	Coeficiente de correlación ONI - Precipitación			
	DEF	MAM	JJA	SON
5001 Agua Nueva	0.373	-0.167	-0.027	0.475
5002 Allende (SMN)	0.295	0.080	-0.310	-0.073
5008 Conchos	0.300	-0.034	-0.244	-0.094
5020 Muzquiz (DGE)	0.365	0.245	-0.369	0.030
5021 Nueva Rosita	0.330	0.091	-0.109	0.061
5033 Sabinas (DGE)	0.357	-0.106	-0.322	0.087
5074 Zaragoza (DGE)	0.464	-0.082	-0.174	-0.112
5043 Allende II (DGE)	0.409	-0.023	-0.293	-0.041
5043 E.T.A. ALLENDE	0.576	0.304	-0.540	0.552
5066 sabinas (SMN)	0.544	0.124	-0.489	-0.007
5069 Muzquiz (SMN)	0.472	0.149	-0.057	-0.061
5156 Palau	0.352	0.283	0.136	0.384

Se puede observar que en el trimestre DEF la correlación con el ONI es positiva y fuerte, oscilando entre 0.295 y 0.576, siendo predominantes los valores de correlación del orden de 0.300. Se aprecia también que la estación 5074 Zaragoza (DGE) que se encuentra en la parte media de la cuenca presenta un valor de 0.464 uno de los más altos en este rango.

En cuanto al trimestre MAM, se observa que predomina la correlación positiva con el índice ONI, aunque de magnitud débil, se presentan seis estaciones con correlación positiva (entre 0.080 y 0.304), localizadas cuatro de ellas al suroeste del área de estudio en los municipios de San Buenaventura, San Juan de Sabinas y Sabinas, y dos de ellas en el municipio de Morelos al sur de la cuenca río Escondido. Las cinco estaciones restantes presentan correlación negativa y débil (entre -0.023 y -0.167) tres de ellas al sur de la zona de interés, y dos dentro de la cuenca: 5074 Zaragoza (DGE) con valor -0.082 y 5043 Allende II con valor de -0.023.

En el trimestre JJA, se observa que predomina la correlación negativa con el ONI de magnitud media, se presentan 10 estaciones con correlación negativa (entre -0.027 y -0.540), las de mayor magnitud se localizan

al sur de la cuenca río Escondido, y dentro de esta la estación 5074 Zaragoza (DGE) con un valor de -0.174. Únicamente se registra una estación con valor positivo (0.136) en el municipio de San Buenaventura.

Finalmente, en el trimestre SON, se observa equilibrio entre las estaciones de correlación positiva y negativa con el índice ONI, cinco estaciones con valor positivo (entre 0.061 y 0.552), y seis con valor negativo (entre -0.112 y -0.007) y una de estas (5074 Zaragoza (DGE)) dentro de la cuenca con un valor muy bajo de -0.112.

Por otro lado en la Tabla 6.17 se presentan los resultados obtenidos de la correlación entre la precipitación trimestral y el índice SOI, mientras que en la Figura 6.40 se muestra la distribución espacial de los coeficientes de correlación en el área de interés.

Tabla 6.17. Correlación entre las series trimestrales de la precipitación en la zona y el índice SOI.

Estación Código - Nombre	Coeficiente de correlación SOI- Precipitación			
	DEF	MAM	JJA	SON
5001 Agua Nueva	-0.001	-0.108	-0.244	-0.331
5002 Allende (SMN)	-0.149	-0.206	0.098	0.074
5008 Conchos	-0.139	-0.068	-0.145	0.105
5020 Muzquiz (DGE)	-0.530	-0.392	0.364	0.030
5021 Nueva Rosita	-0.070	-0.205	0.194	0.060
5033 Sabinas (DGE)	-0.358	-0.251	0.306	-0.022
5074 Zaragoza (DGE)	-0.480	0.180	0.232	0.156
5043 Allende II (DGE)	-0.500	-0.105	0.341	0.049
5063 E.T.A. ALLENDE	-0.677	-0.073	0.329	-0.081
5066 Sabinas (SMN)	-0.149	-0.286	0.303	0.054
5069 Muzquiz (SMN)	-0.441	-0.100	-0.038	-0.045
5156 Palau	-0.175	-0.122	0.049	-0.352

Se observa que la correlación trimestral de la lluvia con el índice SOI, es inversa que con el índice ONI. Para el primer trimestre (DEF) se aprecia que la correlación es negativa y fuerte oscilando entre -0.677 y -0.001, la estación 5074 Zaragoza (DGE) ubicada dentro de la cuenca alcanza un valor de -0.480.

Por otro lado, en el trimestre MAM se aprecia un claro predominio de 10 estaciones con correlaciones negativas (entre -0.286 y -0.068), la única estación con valor positivo de 0.180 está ubicada en la parte media de la cuenca.

En cuanto al trimestre JJA, se nota que predomina la correlación positiva débil con el índice SOI, ocho estaciones con valores positivos (entre 0.049 y 0.341) las de mayor magnitud se localizan al sur de la cuenca río Escondido, y dentro de ella 5074 Zaragoza (DGE) con un valor de 0.232; mientras que tres estaciones registran un bajo valor negativo (entre -0.244 y -0.038) localizadas dos de ellas al suroeste y una al sureste de la ventana de rastreo.

Finalmente, en el trimestre SON se presentan cinco estaciones de correlación negativa de magnitud débil (entre -0.352 y -0.022), mientras que seis de ellas con valor positivo (entre 0.049 y 0.156) se distribuyen al suroeste de la ventana de rastreo y en la parte media, 5074 Zaragoza (DGE) dentro de la cuenca con un valor muy bajo de 0.156

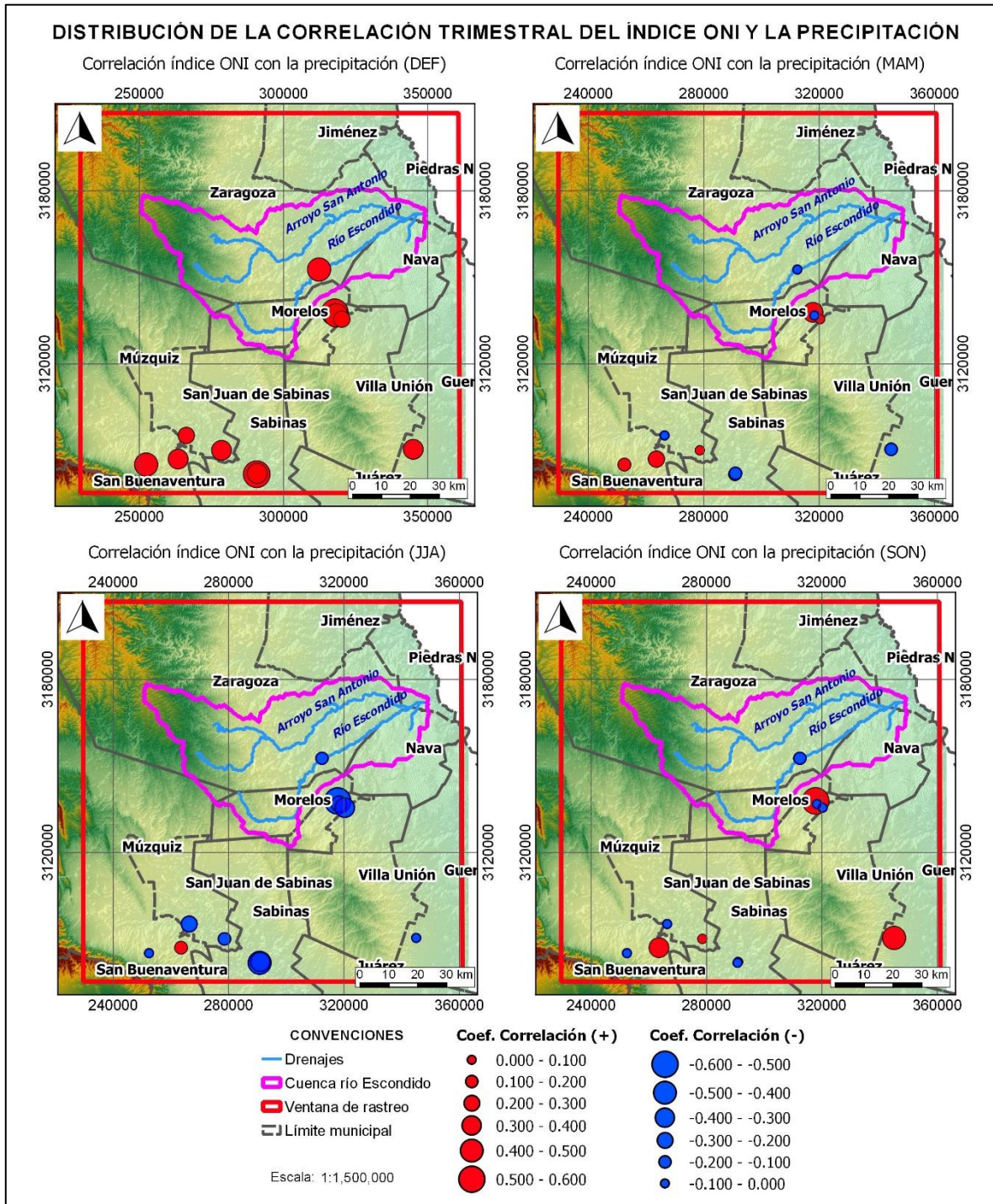


Figura 6.39. Distribución espacial del coeficiente de correlación lineal entre el índice ONI y la precipitación (trimestral).

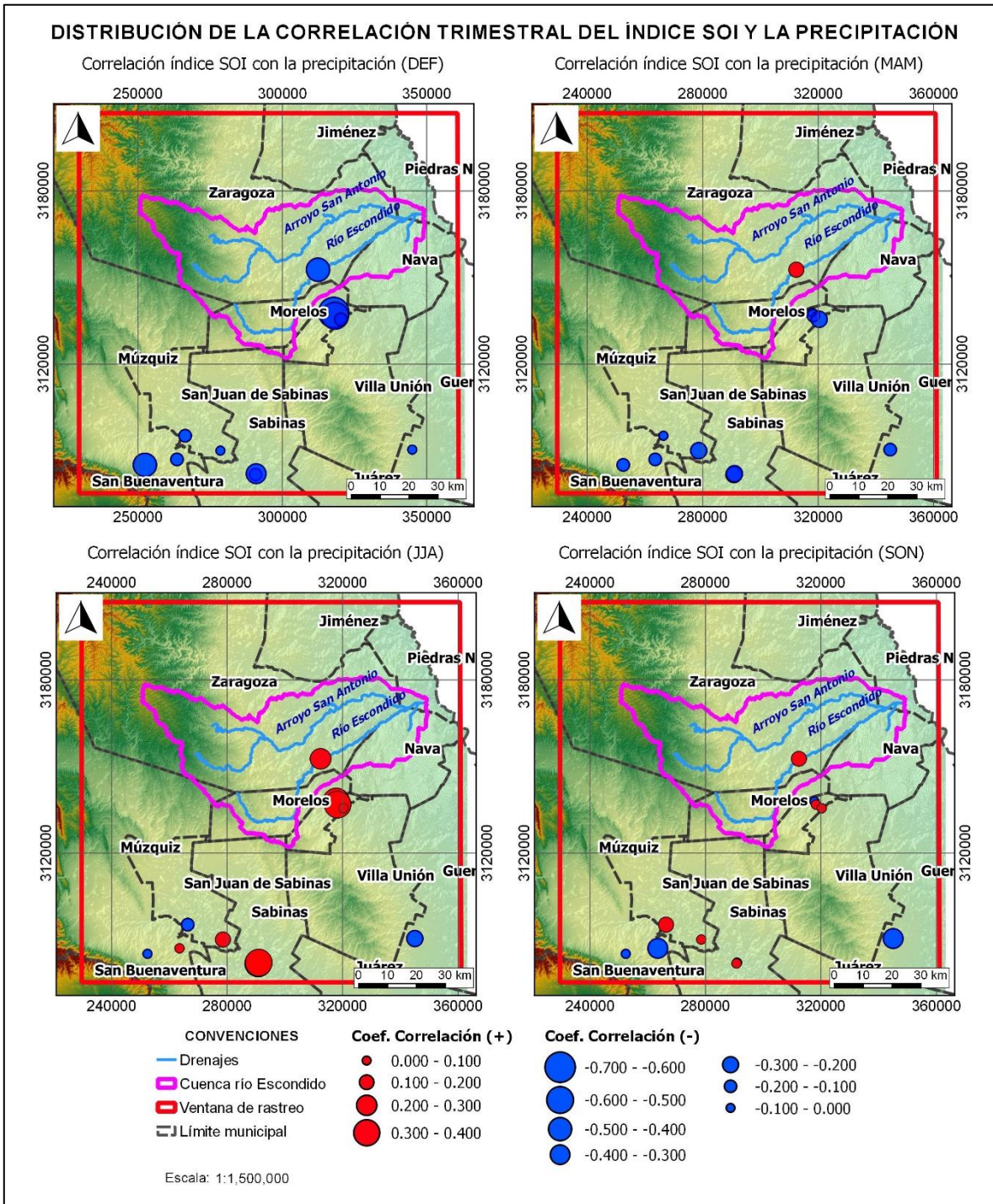


Figura 6.40. Distribución espacial del coeficiente de correlación lineal entre el índice SOI y la precipitación (trimestral).

A partir del análisis de correlación trimestral entre la precipitación y los índices macroclimáticos del fenómeno ENSO, se encontró un consenso en el comportamiento espacial y temporal de la correlación y los índices evaluados, lo que finalmente permitió concluir que las fases del ENSO (El Niño / La Niña) tienen un mayor

impacto en el régimen de precipitaciones a escala estacional; lo anterior se refleja durante el trimestre DEF donde se observan los mayores valores del coeficiente de correlación y coherencia entre el ONI con oscilaciones positivas que indican evento El Niño, y en contraparte el índice SOI con valores negativos asociados también a una fase cálida.

En el trimestre JJA se observa que predomina la correlación negativa con el ONI y positiva con el índice SOI, consistente probablemente con la ocurrencia de una fase La Niña. En el trimestre MAM predomina la correlación positiva con el ONI y negativa con el índice SOI, sugiriendo la ocurrencia de una fase El Niño; mientras que en el trimestre SON no se observa una fase definida.

Tanto en MAM, JJA y SON hay una contradicción por la inversión de signos que presenta el coeficiente de correlación en algunas estaciones, este comportamiento entre el fenómeno ENSO y la precipitación puede ser causa del efecto combinado de este fenómeno y los efectos locales del microclima, o de la influencia de otros fenómenos macroclimáticos de menor escala.

6.4.5 Resultados del análisis de la precipitación regional bajo fases del ENSO

En esta sección se construyen los ciclos promedios anuales de precipitación clasificados según el año hidrológico (comprendido entre junio del año 0 y mayo del año +1) de acuerdo con las etapas El Niño, La Niña y la fase Normal, utilizando el índice ONI como indicador de su ocurrencia; se muestra también el ciclo de las variaciones relativas (anomalías) de la lluvia en las fases El Niño y La Niña respecto a la fase Normal.

La finalidad de este análisis es reforzar o clarificar la incidencia del fenómeno macroclimático ENSO sobre el régimen intra - anual de precipitaciones en la zona de análisis.

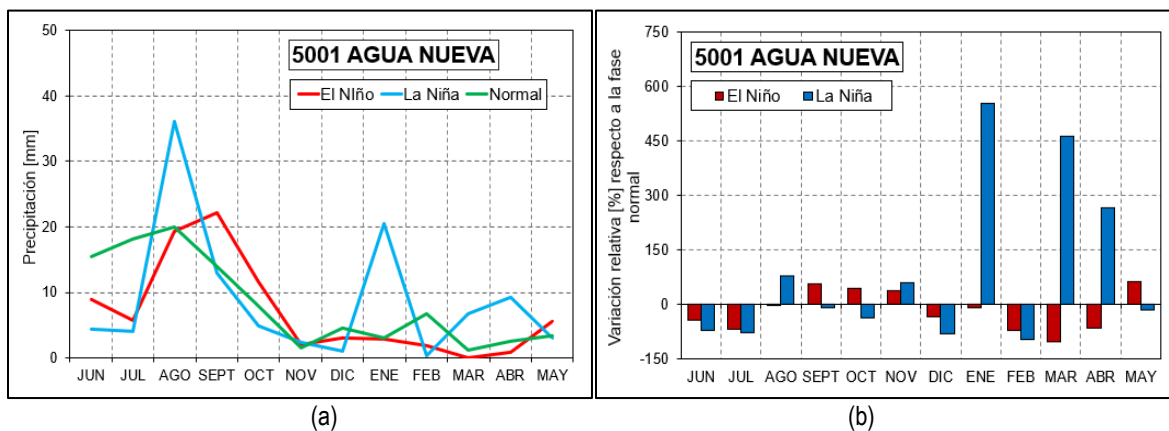


Figura 6.41. Estación 5001 Agua Nueva: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

Para la estación 5001 Agua Nueva (Figura 6.41 (a)) se observa que en los meses de enero, marzo y abril del año +1, el comportamiento de las precipitaciones que se generan durante La Niña son mayores a las que se generan durante fase Normal, mientras que durante El Niño se presentan las de menor magnitud, coherente con la influencia del fenómeno, en el resto de meses no se identifica ningún comportamiento acorde con el ENSO. En la Figura 6.41 (b) las anomalías promedio anuales de la lluvia durante La Niña son mayores que durante El Niño, en general las variaciones relativas presentan inversión de signo indicando correspondencia nula con el fenómeno.

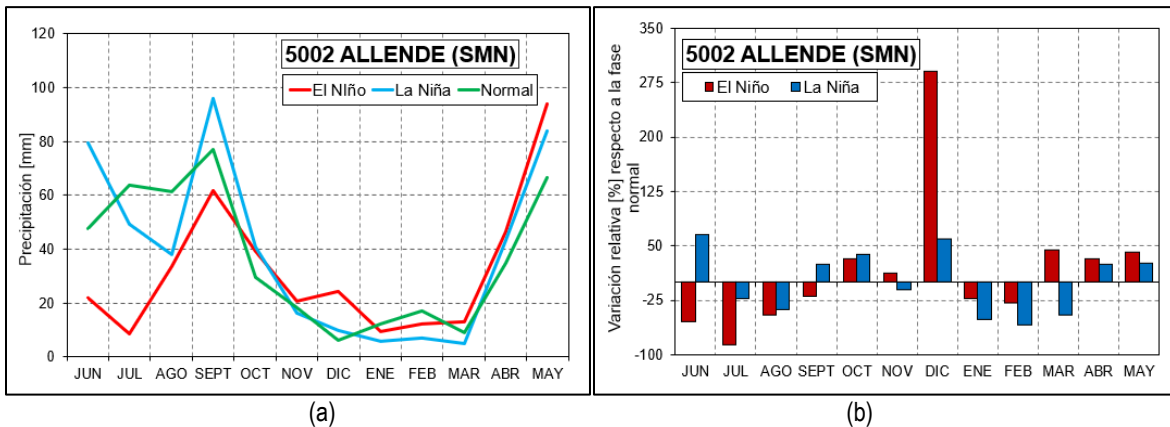


Figura 6.42. Estación 5002 Allende (SMN): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

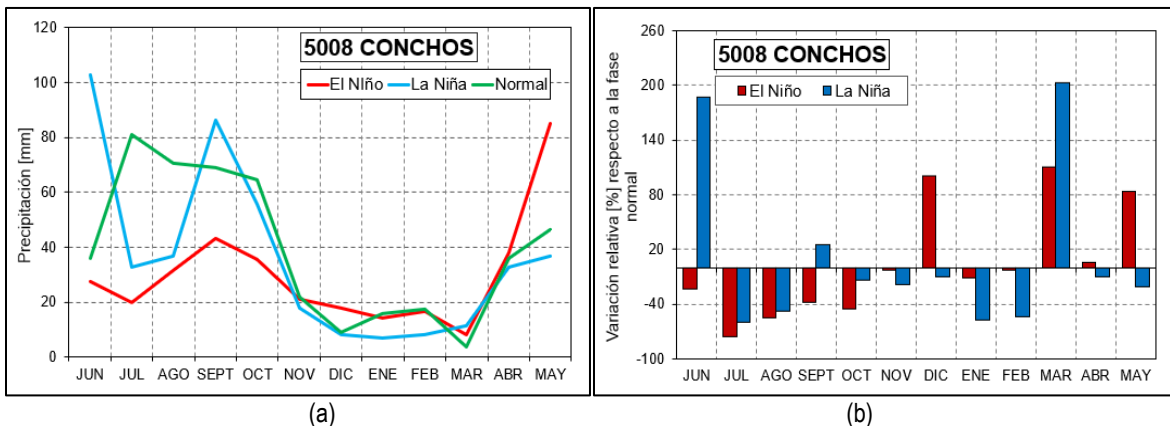


Figura 6.43. Estación 5008 Conchos: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

Para las estaciones 5002 Allende (SMN) (Figura 6.42 (a)) y 5008 Conchos (Figura 6.43 (a)) se observa que únicamente para los meses de junio y septiembre el comportamiento de la lluvia promedio anual es acorde con la influencia del ENSO, en tanto que el porcentaje de las anomalías positivas es de alrededor de 275 % para El Niño y 200 % para La Niña, sin embargo, estas variaciones no muestran ninguna correspondencia con el fenómeno, por el contrario prevalece la inversión de signos como en la estación 5001 Agua Nueva.

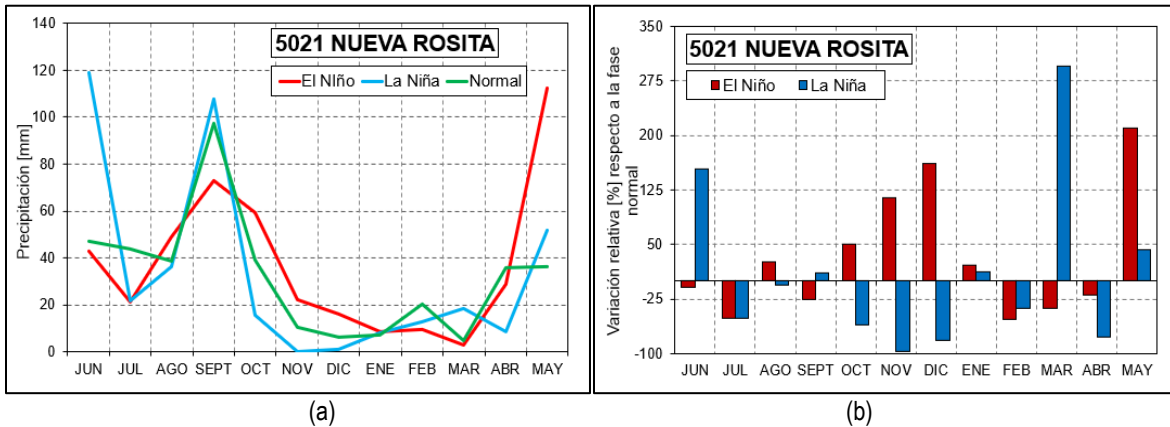


Figura 6.44. Estación 5021 Nueva Rosita: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

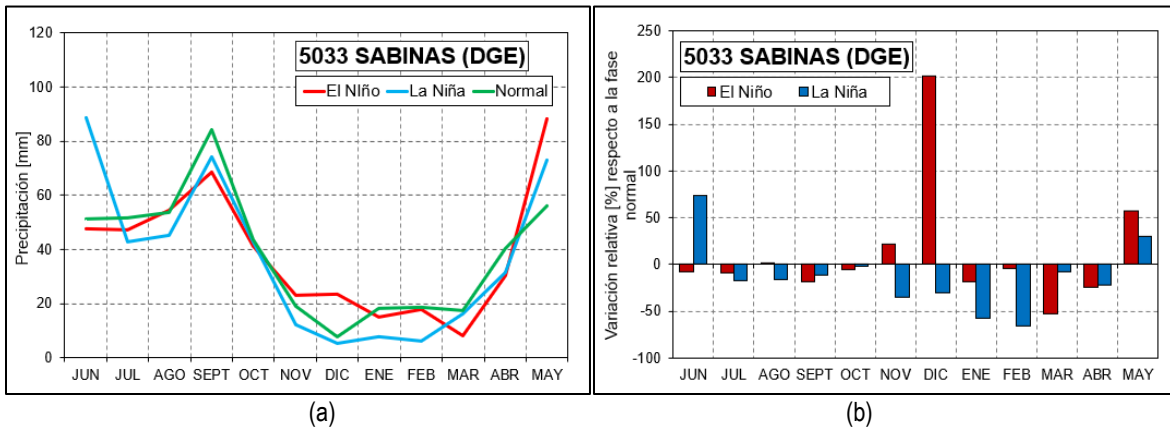


Figura 6.45. Estación 5033 Sabinas (DGE): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

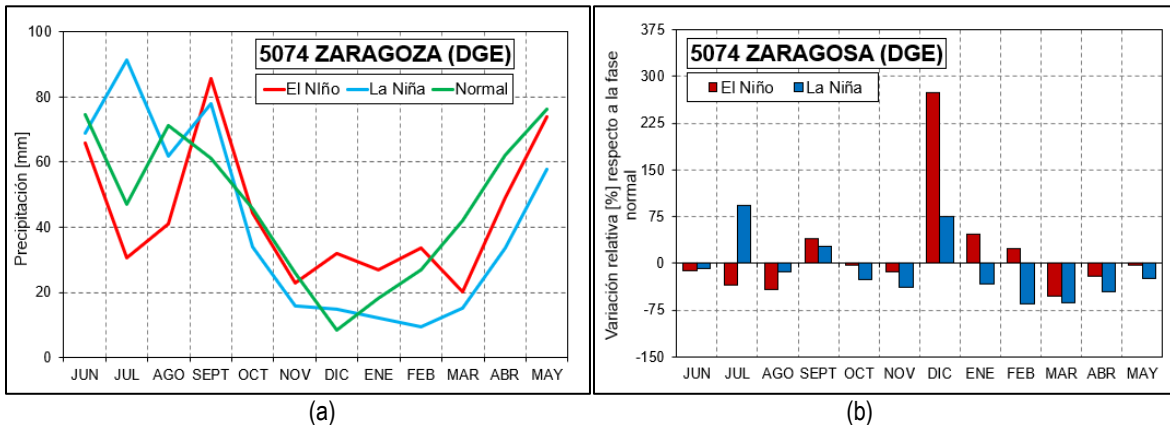


Figura 6.46. Estación 5074 Zaragoza (DGE): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

Para la estación 5021 Nueva Rosita (Figura 6.44 (a)) se aprecia que para los meses de junio y septiembre del año 0 y marzo del año +1 el comportamiento de la lluvia se ve influenciado por el fenómeno; en tanto que las

anomalías respecto a fase normal invierten su signo para la mayoría de meses indicando inconsistencia entre la precipitación y el fenómeno.

En la Figura 6.45 (a) estación 5033 Sabinas (DGE) se observa que únicamente en el mes de junio hay consistencia entre el comportamiento de la lluvia y la influencia del fenómeno ENSO; y en el mes de julio para la estación 5074 Zaragoza (DGE) (Figura 6.46).

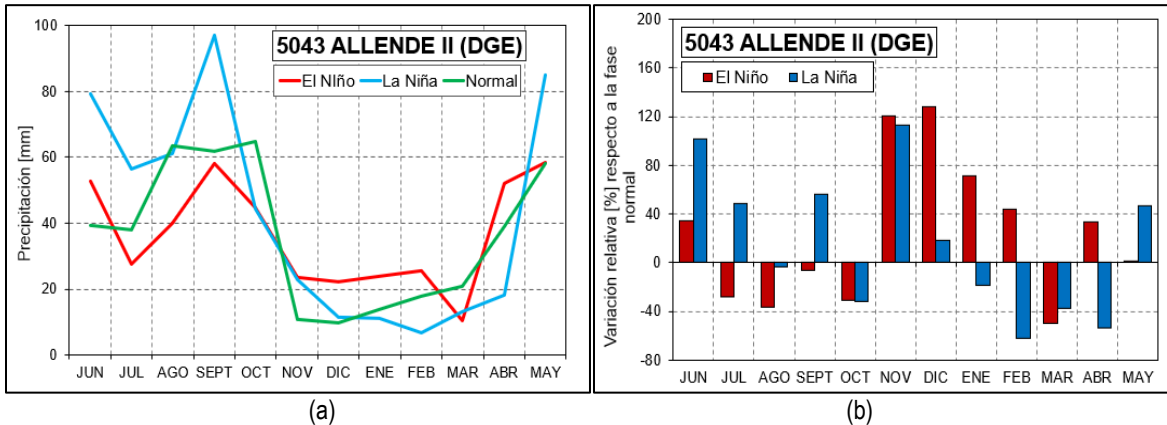


Figura 6.47. Estación 5043 Allende II (DGE): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

En la Figura 6.47 para la estación 5043 Allende II (DGE) se identifica que para los meses de julio, agosto y septiembre del año + 0 ocurren incrementos de lluvia bajo fase La Niña (superior a la lluvia en fase Normal) y disminuciones en época El Niño (inferior a la lluvia en fase Normal).

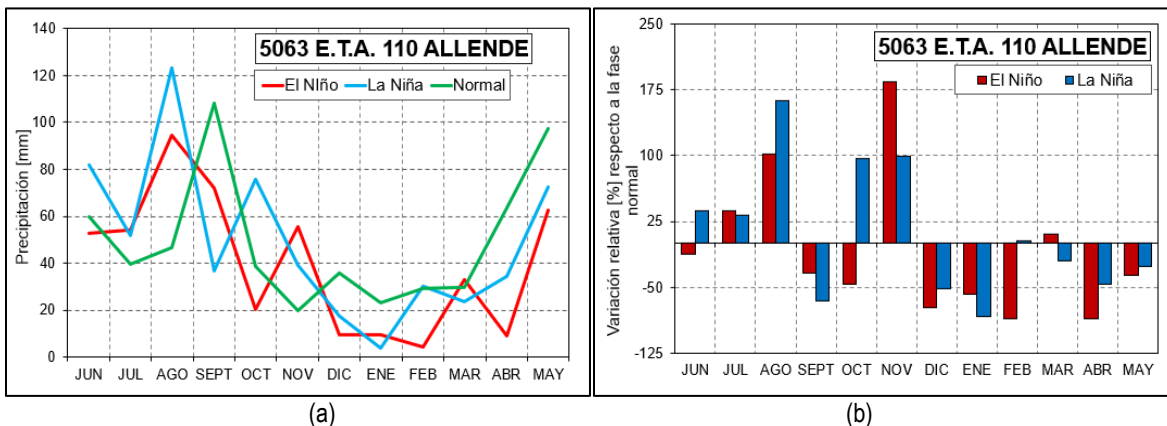


Figura 6.48. Estación 5063 E.T.A. 110 Allende: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

Mientras que para la estación 5063 E.T.A. 110 Allende (Figura 6.48) la correspondencia entre la variable de lluvia y el fenómeno ocurre únicamente para los meses de junio del año +1 y octubre del año +0.

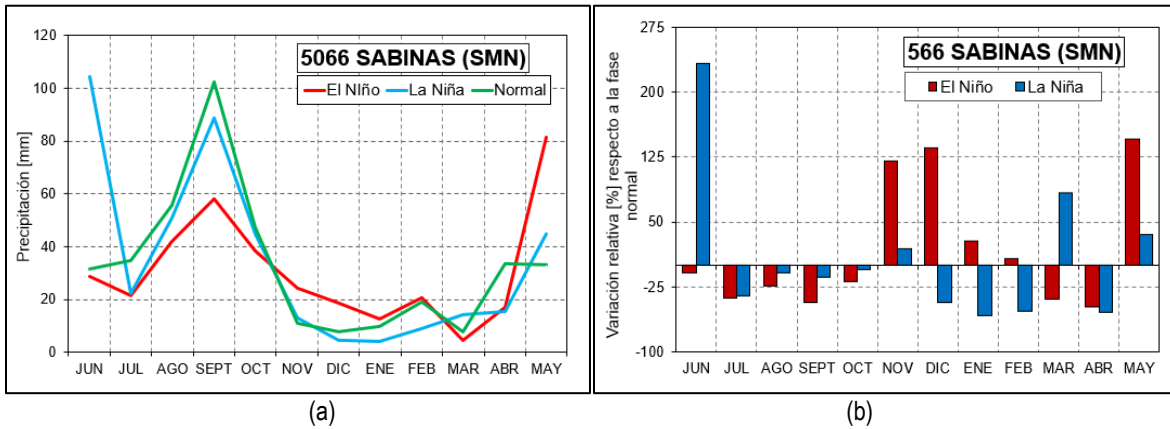


Figura 6.49. Estación 5066 Sabinas (SMN): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

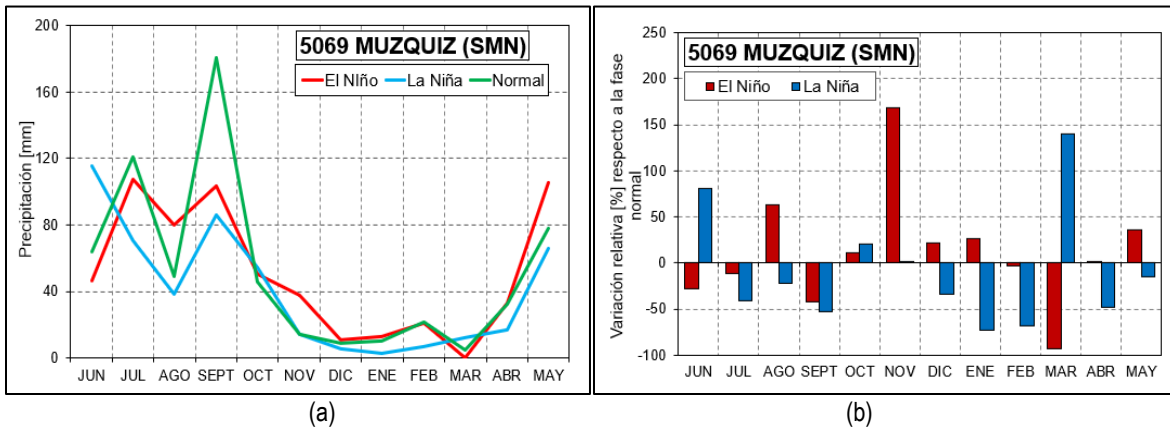


Figura 6.50. Estación 5069 Muzquiz (SMN): (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

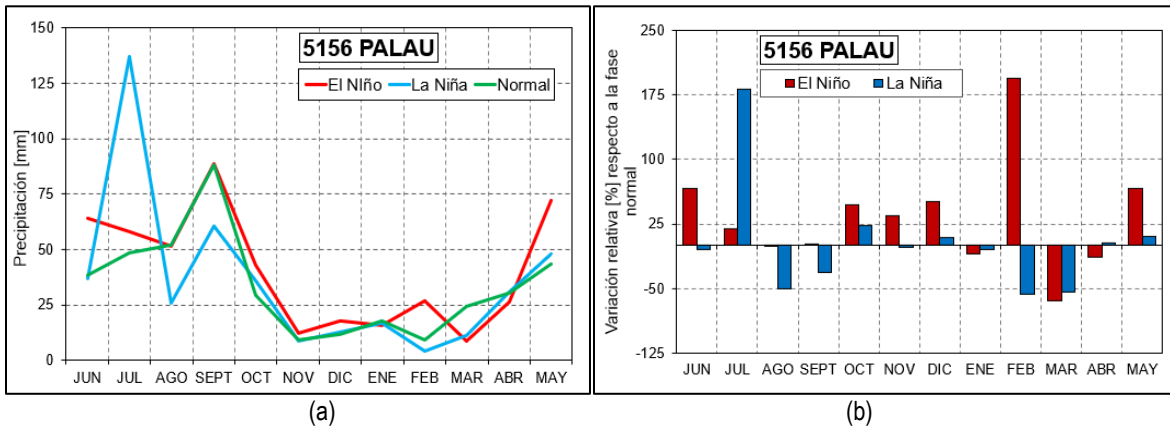


Figura 6.51. Estación 5156 Palau: (a) ciclo anual de la precipitación bajo fases del ENSO y (b) variación relativa de la lluvia bajo fases del ENSO respecto a la fase normal.

En la estación 5066 Sabinas (SMN) (Figura 6.49) y en la estación 5069 Muzquiz (SMN) (Figura 6.50) se identifica que para los meses de junio y marzo hay consistencia entre la lluvia y la influencia del ENSO. En tanto que en la estación 5156 Palau (Figura 6.51) no se aprecia correspondencia en ningún mes del año.

Para el mes de junio se identificaron cinco (5) estaciones en las que hay influencia del fenómeno y la precipitación, cuatro (4) en el mes de septiembre y tres (3) en el mes de marzo, para el resto de meses se determinó entre cero y una estación.

Resultado que no se considera significativo para afirmar la influencia del fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur en el área de interés a escala intra - anual, aunque en el mes de junio cinco (5) estaciones presentan consistencia, estas no representan ni el 50 % del total de registros analizados.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Debido a que al norte de la República Mexicana no se tiene suficiente información hidrometeorológica, la investigación realizada tiene ciertas limitaciones tales como contar con una única tormenta de calibración debido al insuficiente número de pluviómetros dentro de la cuenca. También se tuvo que suponer que el gasto horario es igual al gasto diario por cada día de tormenta, debido a información de la estación Villa de Fuente es insuficiente.

Se recurrió a determinar el coeficiente de escurrimiento como medida de validación de los resultados del MPE. En la calibración inicial se obtuvo un valor de 0.30 el cual se consideró aceptable para cuencas no urbanizadas y por ende para la cuenca río Escondido. La determinación de los parámetros de escala en la calibración inicial es útil únicamente como base al momento de la estimación de los caudales de diseño para diferentes periodos de retorno.

Debido a la escasa información hidrometeorológica se localizaron 10 puntos distribuidos en la cuenca, con el objetivo de determinar tormentas estadísticas para diferentes periodos de retorno y que fueran el archivo de lluvias de entrada del modelo MPE durante la estimación de los escurrimientos de diseño.

Existen diferentes estudios en los cuales se obtienen ecuaciones logarítmicas para determinar el factor de reducción por área en diferentes zonas de México, sin embargo, no existe ningún estudio para el área de interés, lo que hizo necesario utilizar la ecuación de una región más cercana a la cuenca y de mayor similitud en la magnitud de precipitación media máxima anual, en este sentido, se tomó como referencia la expresión para el estado de Durango. Esta acción constituye una limitante en la obtención de las tormentas estadísticas, que influyen directamente en el cálculo de los hidrogramas asociados a distintos periodos de retorno.

El Modelo para Pronóstico de Ecurrimiento (MPE) considera las pérdidas por evapotranspiración, agregando un elemento denominado factor de olvido (f_x); con el fin de observar la influencia de este parámetro en la determinación de los gastos de diseño, se trabajaron dos escenarios, el primero sin considerar el secado del suelo con $f_x = 1$ y el segundo considerando las pérdidas con un factor $f_x < 1$.

Para los dos escenarios el factor de escala de pérdida inicial (λ) tomó el valor recomendado de 0.2, afectando directamente a la infiltración inicial en el suelo al disminuirla en el 20% de la retención potencial. Por otro lado, el factor de escala de retención potencial (f_s) va incrementando desde 0.50 para 2 años hasta 0.77 para 500

años periodo de retorno, este varía o modifica la retención potencial del suelo y, por tanto, el valor del número de curva, como f_s va incrementando se está considerando entonces mayor permeabilidad en el terreno y menor volumen de escurrimiento.

El factor de olvido del segundo escenario se tomó igual a 0.973 para todos los periodos, considerando así que las pérdidas por el secado del suelo son iguales en todos los años. Al tomar un valor un poco menor a la unidad se está permitiendo mayor evapotranspiración y menor volumen de escurrimiento.

Para los dos escenarios el tiempo de concentración se determinó mediante la ecuación de Kirpich, cuyo resultado fue de 27 horas, mientras que el coeficiente de almacenamiento se recomienda sea $0.6 \cdot T_c$, es decir 16 horas aproximadamente.

En la Tabla 7.1 se presentan las diferencias entre los parámetros hidrológicos resultantes de los dos escenarios, se infiere que para el caso con el factor de olvido menor a uno se obtuvieron mayores pérdidas, menor lluvia en exceso lo que afecta directamente en la disminución del coeficiente de escurrimiento, también se aprecia que tanto el volumen total calculado, el volumen directo calculado, como el gasto máximo del total calculado son todos menores que en el escenario 1 para cada periodo de retorno.

Tabla 7.1. Variación de los resultados del MPE entre los dos escenarios (escenario 2 – escenario 1).

Parámetros	Periodo de retorno T_r [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Pérdidas [mm]	7.7	12.5	16.1	20.9	29.3	33.4	42.0
Lluvia en exceso [mm]	-7.7	-12.5	-16.1	-20.9	-29.3	-33.4	-42.0
Volumen Total Calculado [Mm ³]	-23389	-37843	-48492	-63129	-88490	-100755	-126773
Volumen Directo Calculado [Mm ³]	-23389	-37843	-48492	-63129	-88490	-100755	-126773
Gasto Máximo del total Calculado [m ³ /s]	-89.8	-142.9	-181.5	-233.8	-322.8	-366.3	-455.4

Al comparar el coeficiente de escurrimiento bajo cada escenario se puede apreciar que cuando $f_x < 1$ se obtienen valores de C de menor magnitud de hasta -0.1 unidades (Tabla 7.2).

Tabla 7.2. Variación del coeficiente de escurrimiento entre los dos escenarios.

T_r [años]	C_1 con $f_x = 1$	C_2 con $f_x < 1$	$C_2 - C_1$
2	0.41	0.28	-0.13
5	0.49	0.35	-0.15
10	0.53	0.38	-0.15
20	0.57	0.41	-0.16
50	0.63	0.46	-0.17
100	0.64	0.47	-0.17
500	0.68	0.51	-0.17

Considerando que gran parte del suelo está constituido por pastizales y matorrales, y además la pendiente promedio de la cuenca es del 4.18 % (obtenida del Modelo de Elevación Digital), se compararon los coeficientes de escurrimiento para cada periodo de retorno, bajo cada escenario, con los obtenidos por Ven Te Chow [36] en su obra titulada «Hidrología Aplicada» (Imagen 1), los resultados se presentan en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3. Coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno bajo los dos escenarios.

Tr [años]	C con $fx = 1$	C con $fx < 1$	C Ven Te Chow	Variación C con $fx = 1$	Variación C con $fx < 1$
2	0.41	0.28	0.33	-0.08	0.05
5	0.49	0.35	0.36	-0.13	0.01
10	0.53	0.38	0.38	-0.15	0.00
20	0.57	0.41	0.40	-0.17	-0.01
50	0.63	0.46	0.45	-0.18	-0.01
100	0.64	0.47	0.49	-0.15	0.02
500	0.68	0.51	0.58	-0.10	0.07

La menor variación de C para todos los periodos de retorno se obtiene bajo el segundo escenario, es decir utilizando el factor de olvido menor a la unidad, nótese que para 10 años dicha variación es nula. Los valores de C del primer escenario sobrepasan los de Ven Te Chow, por lo que se sobreestiman los gastos calculados.

Bajo este resultado se eligen los caudales estimados en el escenario dos, en los que se permite mayor evapotranspiración y menor escurrimiento para las características de la cuenca río Escondido.

Los escurrimientos estimados (sección 6.3.2) son de gran utilidad para el Sistema de Alerta Temprana, para tomar con antelación las medidas necesarias que reduzcan los riesgos de las inundaciones. A continuación, se presentan los caudales pico resultantes bajo el escenario seleccionado y para cada periodo de retorno.

Tabla 7.4. Caudales pico para los diferentes periodos de retorno.

Caudal directo máximo	Periodo de retorno Tr [años]						
	2	5	10	20	50	100	500
Q [m ³ /s]	398	710	945	1,281	1,896	2,184	2,850

Para verificar la influencia del fenómeno ENSO en la precipitación de la zona de interés, se trazó un polígono de rastreo de 17,289 km² con el objetivo de seleccionar un mayor número de estaciones alrededor de la cuenca, inicialmente se eligieron 18 registros de lluvia, pero al condicionarlos a tener una longitud de por lo menos 20 años, la cantidad se redujo a 11 estaciones.

El primer análisis que se realizó fue el de las gráficas de dispersión de puntos y regresión lineal simple, entre la precipitación promedio estandarizada a escala mensual y el índice ONI, en el que se pudo observar que para ningún caso existe relación lineal entre las variables. En general en los 11 registros se observó que la mayoría

de puntos se concentraron entre -2 y 2 respecto a los ejes X e Y, sin embargo, se apreció también un gran número de datos que alcanzaron valores de hasta 6 unidades en el eje de las ordenadas. Como primera aproximación estadística se infiere que no existe una relación fuerte entre las variables analizadas, sin embargo se debe considerar que los registros de lluvia tienen datos faltantes.

El segundo análisis fue la correlación gráfica entre la precipitación promedio estandarizada a escala mensual y los coeficientes macroclimáticos del ENSO (ONI y SOI), no se observaron tramos definidos de incrementos o disminución de lluvia asociados a La Niña o El Niño, si bien se logró identificar apenas unos pocos puntos de coincidencia, se notó más que el comportamiento de los datos se apegan a una fase normal. Sin embargo, los valores faltantes en algunos registros impiden apreciar el comportamiento real de las series lo que limita la certeza del análisis.

Como tercera prueba se realizó un análisis de correlación cruzada, con el fin de identificar la asociación de dos series temporales (lluvia estandarizada e índice ONI) en tiempos simultáneos y en periodos desfasados (rezago o lag). Con base en este análisis se concluyó que no existe influencia del fenómeno ENSO en tiempos desfasados o retardados en la precipitación del área de estudio, debido a que fueron apenas puntos los que correspondieron con alguna fase El Niño o La Niña, inclusive se pudo apreciar que el coeficiente de correlación de la mayoría de las estaciones apenas si alcanzó la significación estadística al 95 %.

A partir del análisis de correlación trimestral entre la precipitación y los índices macroclimáticos del fenómeno ENSO, se encontró un consenso en el comportamiento espacial y temporal de la correlación y los índices evaluados, lo que finalmente permitió concluir que las fases del ENSO (El Niño / La Niña) tienen un mayor impacto en el régimen de precipitaciones a escala estacional.

Lo anterior se reflejó durante el trimestre DEF donde se observaron los mayores valores del coeficiente de correlación y coherencia entre el ONI con oscilaciones positivas que indican evento El Niño, y en contraparte el índice SOI con valores negativos asociados también a una fase cálida.

También se determinó que tanto en los trimestres MAM, JJA y SON hay una contradicción por la inversión de signos que presenta el coeficiente de correlación, este comportamiento entre el ENSO y la precipitación puede ser causa del efecto combinado de este fenómeno y los efectos locales del microclima, o de la influencia de otros fenómenos macroclimáticos de menor escala.

La finalidad del cuarto análisis fue reforzar o clarificar la incidencia del fenómeno macroclimático ENSO sobre el régimen intra - anual de precipitaciones en la zona de análisis. Para el mes de junio se identificaron cinco (5)

estaciones en las que hay influencia del fenómeno sobre la precipitación, cuatro (4) en el mes de septiembre y tres (3) en el mes de marzo, para el resto de los meses se determinó entre cero y una estación. Resultado que no se considera significativo para afirmar la influencia del fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur en el área de interés a escala intra - anual, aunque en el mes de junio cinco estaciones presentaron consistencia, estas no representan ni el 50 % del total de registros analizados.

Con base en lo anterior es posible afirmar que no existe influencia significativa del fenómeno ENSO ni en la cuenca río Escondido ni en el área del polígono de rastreo. Sin embargo, es importante mencionar que al no contar con un mayor número de estaciones y al considerar que las pocas utilizadas tienen datos faltantes, no es posible conocer el comportamiento real de la lluvia. Se recomienda para análisis posteriores utilizar la mayor cantidad de información y pruebas alternas como también considerar otros fenómenos macroclimáticos como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) que pudiera ser un factor influyente en el comportamiento de la lluvia de la región.

Finalmente es importante mencionar que al no encontrar una influencia significativa de El Niño – Oscilación del Sur en la precipitación de la región, no existe entonces relación entre las tormentas extremas que han causado inundaciones en el municipio de Piedras Negras.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. G. Matías Ramírez, R. Valverde Delgado, S. Lozano Torres, A. E. Galván Torres, and L. E. Cruz García, “ÍNDICE DE PELIGRO POR INUNDACIÓN (IPI).” Ciudad de México, pp. 1–9, 2016.
- [2] Centro Nacional De Prevención de Desastres (CENAPRED) and Secretaría de Gobierno, “INUNDACIONES.” Agosto 2009, Ciudad de México, p. 38, 2009.
- [3] Centro Nacional De Prevención de Desastres (CENAPRED) and Secretaría de Gobierno, “INUNDACIONES.” Octubre 2009, Ciudad de México, p. 56, 2004.
- [4] R. Domínguez Mora, G. Esquivel Garduño, A. Baldemar Méndez, A. Mendoza Reséndiz, and E. Carrizosa Elizondo, *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Ciudad de México, 2008.
- [5] V. Magaña Rueda and C. Conde, “El fenómeno del el niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México,” *Revista de Cultura Científica - UNAM*, 1998. [Online]. Available: <https://www.revistaciencias.unam.mx/es/108-revistas/revista-ciencias-51/907-el-fenomeno-del-el-nino-y-la-oscilacion-del-sur-sus-impactos-en-mexico.html>. [Accessed: 05-Apr-2020].
- [6] F. J. Villarreal González and G. E. Fuentes Mariles, “EL NIÑO Y LA NIÑA, SUS EFECTOS EN LOS ESCURRIMIENTOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA.” p. 36.
- [7] M. Jiménez Espinosa, M. A. Salas Slinas, H. Eslava Morales, and O. Zepeda Ramos, “LAS INUNDACIONES DE PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA, DE ABRIL DEL 2004 (versión preliminar),” p. 12, 2004.
- [8] M. Gacia *et al.*, “El agua.” Bogotá D.C.
- [9] ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, “Hydrosphere EARTH SCIENCE.” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/hydrosphere#ref19029>. [Accessed: 13-Oct-2019].
- [10] J. Sánchez San Román, “Evapotranspiración,” Salamanca.
- [11] M. V. Vélez, *Hidrología para Ingenieros*. Medellín., 2001.
- [12] CONAGUA and Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, “ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO 2018,” p. 306, 2018.
- [13] F. J. Aparicio Mijares, *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE*. Ciudad de México, 1989.
- [14] F. Magaña Hernández, K. M. Bá, and V. H. Guerra Cobián, “ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE CRECIENTES CON MODELACIÓN DETERMINÍSTICA Y PRECIPITACIÓN DERIVADA DE RADAR.” *Agrociencia*, pp. 739–752, 2013.

- [15] F. J. Aparicio Mijares, *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE*. Ciudad de México: 2017, 1989.
- [16] P. L. Montalvo, "Modelación lluvia - escurrimiento de parámetros distribuidos para la cuenca Chicoasén," pp. 1–87, 2016.
- [17] G. Poveda Jaramillo, "CAUDALES MÍNIMOS EN COLOMBIA: RELACIONES MACROCLIMÁTICAS, ESCALAMIENTO Y BALANCES HIDROLÓGICOS.," *Seminario Internacional sobre Eventos Extremos mínimos en Regímenes de Caudales: Diagnóstico, Modelamiento y análisis*. Medellín., 2004.
- [18] Universidad de Buenos Aires, "Ciencia de la Atmósfera y los Océanos," 2008. [Online]. Available: <http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/enso/enso-que.htm>. [Accessed: 06-Nov-2019].
- [19] Inocar, "El Niño: Generalidades," 2011. [Online]. Available: https://www.inocar.mil.ec/modelamiento/elnino/nino_generalidades.php. [Accessed: 07-Nov-2019].
- [20] M. del C. Jiménez Quiroz, "INDICADORES CLIMÁTICOS. Una manera para identificar la variabilidad climática a escala global.," *Inapesca*. p. 29, 2014.
- [21] Golden Gate Weather Services., "El Niño and La Niña Years and Intensities," 2019. [Online]. Available: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>. [Accessed: 09-Nov-2019].
- [22] México Real - Historia Geografía Museos Infraestructura, "Estado de Coahuila, en la República Mexicana," 2017. [Online]. Available: <https://mr.travelbymexico.com/664-estado-de-coahuila/>. [Accessed: 06-Jun-2020].
- [23] Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, "Coahuila-Piedras Negras," 2010. [Online]. Available: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM05coahuila/municipios/05025a.html>. [Accessed: 04-Nov-2019].
- [24] INEGI, "Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)." [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>. [Accessed: 06-Jun-2020].
- [25] R. Domínguez Mora *et al.*, "ESTUDIO PARA REGIONALIZAR LOS GASTOS GENERADOS POR AVENIDAS MÁXIMAS, COMO BASE PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE PELIGRO POR INUNDACIONES FLUVIALES EN TODAS LAS CUENCAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA - TOMO II. Análisis estadístico regional de las precipitaciones." Ciudad de México, p. 65, 2017.
- [26] C. Baeza Ramírez, "Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia. Tesis Maestría," *Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería UNAM*. Ciudad de México, p. 58, 2007.

- [27] M. Mendoza Grande, "Factores de Regionalización de Lluvias Máximas en la República Mexicana. Tesis de Maestría," *Facultad de Ingeniería UNAM*. Ciudad de México, 2001.
- [28] R. Domínguez Mora, G. Esquivel Garduño, A. Baldemar Méndez, A. Mendoza Reséndiz, M. L. Arganis Juaréz, and E. Carrizosa Elizondo, *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Ciudad de México, 2008.
- [29] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, "SUELOS," *Inf. la situación del medio Ambient. en México. Comp. estadísticas Ambient. clave y desempeño Ambient.*, vol. 23, pp. 119–154, 2017.
- [30] J. J. Ibáñez and F. J. Manríquez Cosío, "Chernozems (Suelos de Praderas, Estepas y Pampas)," *madrid Blogs*, 2014. [Online]. Available: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2014/04/26/145061>. [Accessed: 08-Apr-2020].
- [31] Universidad de Extremadura, "Fluvisoles." [Online]. Available: <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/FAO/Fluvisol.htm>. [Accessed: 08-Apr-2020].
- [32] Microsoft, "Gráficos de dispersión, de burbujas y de trazado de punto de Power BI - Power BI | Microsoft Docs," 2019. [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/es-es/power-bi/visuals/power-bi-visualization-scatter>. [Accessed: 27-Mar-2020].
- [33] Servicios Hidrogeológicos Integrales SHI S.A.S., "PLAN DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO DE LOS PRINCIPALES TRIBUTARIOS DEL RÍO LEÓN (RÍOS APARTADÓ, CAREPA Y CHIGORODÓ), DE CONFORMIDAD CON LA GUÍA TÉCNICA PARA LA FORMULACIÓN DE PLANES DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO (2018)." Medellín, p. 204, 2018.
- [34] J. M. Guevara Díaz, "USO CORRECTO DE LA CORRELACIÓN CRUZADA EN CLIMATOLOGÍA: EL CASO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA ENTRE TAITÍ Y DARWIN.," *Terra NUEVA ETAPA*, pp. 79–102, 2014.
- [35] P. Labrada Montalvo, "Análisis regional para lluvias de diseño con duraciones menores a un día." Ciudad de México, p. 101, 2018.
- [36] V. Te Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays, "Hidrología Aplicada," *Hidrología aplicada*. p. 575 pp, 1994.
- [37] gidahatari, "índice de precipitación antecedente," 2013. [Online]. Available: <http://gidahatari.com/wh-es/indice-de-precipitacion-antecedente>. [Accessed: 09-Apr-2020].
- [38] Y. Zhao, F. Wei, H. Yang, and Y. Jiang, "Discussion on Using Antecedent Precipitation Index to Supplement Relative Soil Moisture data Series," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 10, no. PART B, pp. 1489–1495, 2011.

-
- [39] C. R. Suribabu and E. R. Sujatha, "Evaluation of Moisture Level Using Precipitation Indices as a Landslide Triggering Factor-A Study of Coonoor Hill Station," *Climate*, vol. 7, no. 9, 2019.
- [40] M. Alvarez, C. Varela, B. Soto, E. Lopez, and F. Díaz Fierros, "Análisis de la Respuesta Hidrológica en una Cuenca Fluvial y su Relación con la Precipitación," pp. 21–32.
- [41] A. Chavarría López, "Hidrología," *Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo*, 2010. [Online]. Available: https://es.slideshare.net/mivervdad/apuntes-hidrologa-superficial?qid=3ba9c4c7-e6c0-4136-976a-9ebf0646e3ae&v=&b=&from_search=7. [Accessed: 09-Apr-2020].
- [42] J. Amat Rodrigo, "Correlación lineal y Regresión lineal simple." [Online]. Available: https://www.cienciadatos.net/documentos/24_correlacion_y_regresion_lineal. [Accessed: 13-Jun-2020].

ANEXO A

Caudales de diseño par diferentes periodos de retorno:

Fecha	Hora	Caudal directo [m ³ /s] - diferentes periodos de retorno						
		2	5	10	20	50	100	500
3/07/2010	3:50:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/07/2010	7:50:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/07/2010	11:50:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/07/2010	15:50:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06
3/07/2010	19:50:00	0.04	0.16	0.29	0.53	1.23	1.57	2.89
3/07/2010	23:50:00	0.11	0.44	0.78	1.45	3.36	4.28	7.82
4/07/2010	3:50:00	0.16	0.61	1.10	2.11	4.99	6.40	11.87
4/07/2010	7:50:00	0.22	0.81	1.50	2.91	6.98	8.96	16.61
4/07/2010	11:50:00	0.38	1.30	2.32	4.35	10.07	12.83	23.18
4/07/2010	15:50:00	0.80	2.54	4.32	7.70	16.69	20.92	36.11
4/07/2010	19:50:00	3.92	10.16	15.67	25.10	46.96	57.05	89.08
4/07/2010	23:50:00	8.62	21.84	33.26	52.39	95.69	115.59	176.20
5/07/2010	3:50:00	12.14	31.30	48.03	76.21	139.99	169.13	256.64
5/07/2010	7:50:00	16.75	42.82	65.55	103.51	187.66	225.82	337.64
5/07/2010	11:50:00	24.27	58.94	88.67	137.36	242.51	290.14	426.21
5/07/2010	15:50:00	40.12	89.24	129.87	194.40	328.70	389.80	557.68
5/07/2010	19:50:00	101.80	196.74	271.20	383.37	602.14	703.13	959.42
5/07/2010	23:50:00	205.48	377.45	509.12	701.82	1063.66	1232.15	1638.36
6/07/2010	3:50:00	302.93	547.34	732.81	1001.04	1496.76	1728.40	2274.32
6/07/2010	7:50:00	375.32	671.06	894.33	1215.02	1802.40	2077.58	2717.56
6/07/2010	11:50:00	397.63	709.67	944.62	1281.23	1895.66	2183.69	2850.18
6/07/2010	15:50:00	367.34	657.15	875.18	1187.48	1757.31	2024.33	2641.91
6/07/2010	19:50:00	313.39	561.48	748.04	1015.28	1502.88	1731.30	2259.64
6/07/2010	23:50:00	256.36	459.14	611.58	829.87	1227.98	1414.49	1845.61
7/07/2010	3:50:00	206.17	368.63	490.69	665.38	983.68	1132.86	1477.24
7/07/2010	7:50:00	165.49	295.22	392.65	531.96	785.56	904.49	1178.58
7/07/2010	11:50:00	132.41	235.81	313.44	424.37	626.14	720.80	938.68
7/07/2010	15:50:00	104.76	186.50	247.86	335.51	494.89	569.67	741.72
7/07/2010	19:50:00	82.80	147.30	195.70	264.83	390.48	449.45	585.04
7/07/2010	23:50:00	66.06	117.34	155.81	210.72	310.46	357.29	464.84
8/07/2010	3:50:00	53.07	94.09	124.85	168.73	248.36	285.76	371.55
8/07/2010	7:50:00	42.93	75.94	100.68	135.94	199.87	229.91	298.69
8/07/2010	11:50:00	34.64	61.19	81.09	109.42	160.74	184.87	240.05
8/07/2010	15:50:00	27.53	48.64	64.46	86.98	127.76	146.94	190.78
8/07/2010	19:50:00	21.63	38.22	50.65	68.36	100.43	115.50	149.97
8/07/2010	23:50:00	16.86	29.81	39.50	53.32	78.34	90.10	116.99
9/07/2010	3:50:00	13.11	23.18	30.73	41.47	60.93	70.07	90.99
9/07/2010	7:50:00	10.20	18.03	23.90	32.25	47.39	54.50	70.77
9/07/2010	11:50:00	7.93	14.02	18.59	25.09	36.86	42.39	55.04
9/07/2010	15:50:00	6.17	10.91	14.46	19.51	28.67	32.97	42.81
9/07/2010	19:50:00	4.80	8.48	11.24	15.18	22.30	25.64	33.30