



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

“Estudio de sequías en la Cuenca Hidrológica del
río Balsas.”

T E S I S

Que para optar por el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Presenta

Ana Elena Martínez Melgarejo

Directora de Tesis:

Dra. Paulina Ordez Prez
Centro de Ciencias de la Atmósfera

Ciudad Universitaria, CD. MX

abril 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Código de Ética

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a rectangular frame defined by two vertical lines. The signature is stylized and appears to read 'Ana Elena Martínez Melgarejo'.

Ana Elena Martínez Melgarejo

“Sólo a través del ingenio puede el hombre vivir eternamente.”

Andreas Vesalius.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a mis tres pilares: Mi familia, mis papás que siempre me están dando su apoyo en cada paso. Por recordarme que soy capaz y puedo hacer cumplir cada objetivo que me proponga, y que ven todo lo bueno aunque a veces sólo vea lo malo. A mi hermano, que no se lo digo diario, pero lo admiro siempre, porque nos aventuramos a un mundo diferente y difícil, y sin embargo ahí la llevamos, ahí nos tenemos, paso a paso. Tiempo me va a faltar para agradecerles todo lo que han hecho y me han apoyado. Los amo siempre.

A las dos mejores amigas que pude encontrar hace más de ocho años, conociéndonos en la prepa, con un futuro incierto, llenas de sueños, y hoy, aquí estamos, juntando éxitos, sanando heridas, compartiendo risas, creando nuevos planes. Es verdad lo que dice aquel poema "Benditos sean esos iluminados que nos llegan como un ángel, como colibrí en una flor, que dan alas a nuestros sueños y que, teniendo la libertad para irse, escogen quedarse a hacer nido". Sé que hice algo bien por tenerlas a ustedes. Las amo y gracias por todo.

A mis amiguitos clashereros: Julio, Javi, Juan, Alma, Diana, Nem. Hicieron de la maestría de las mejores experiencias, gracias por estar ahí, con unas papitas, unas galletitas, unas pizzas. Porque con ustedes las risas nunca faltan, porque con ustedes me olvido de tomarme las cosas tan en serio y llevármela más leve. Dicen que lo especial no son los lugares si no las personas, y sí. A donde sea que vayan, yo estoy orgullosa de ustedes, los te cu eme.

A Paulina, por aventurarse en ser mi tutora otra vez, y estar ahí al pie del cañón, por enseñarme a dar ese paso extra y hacer las cosas bien. Por creer en nosotros y darnos la confianza de desarrollar nuevos proyectos, por abrirnos nuevas puertas, te admiro muchísimo.

A la Universidad de Vigo, a Rogert, Milica, Anita, Juliet, Elham, Iago, Deja, Jorge, Raquel y Luis. Por enseñarme tantas cosas, no sólo de la investigación, si no del compañerismo. Y cómo diferentes personas, de diferentes países pueden unirse y hacer un gran equipo. Llevo a los gofres en mi corazón.

A mi segunda casa, el CCA. Por tantos años, por toda la gente que conocí, los profesores, las clases, las oportunidades que me dio. Gracias, simplemente gracias.

Resumen

En este trabajo se analizaron las sequías más intensas ocurridas en la Región Hidrológico Administrativa IV Balsas en el periodo de 1980 a 2017.

En primer lugar, se calcularon los índices de sequía SPI (Standardized Precipitation Index) y SPEI (Standardized Precipitation - Evapotranspiration Index), en escala temporal de seis meses, dado que la temporada lluviosa en la región abarca desde mayo a octubre. Mediante estos índices se determinaron las cinco sequías más intensas en el periodo de estudio. Dichos episodios correspondieron a los años 1982, 1986, 1987, 1997 y 2005.

Se analizaron las anomalías de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial durante los periodos de sequía para cada mes de toda la temporada húmeda. Estas anomalías se compararon con los índices SPEI-1 y SPI-1 y se observó que las mayores anomalías de precipitación se corresponden con los mayores eventos de sequía meteorológica. De hecho, cada uno de los eventos presenta valores negativos de ambos índices en al menos cuatro de los seis meses que dura cada sequía

Las anomalías de precipitación encontradas pueden ser debidas a anomalías en el transporte de humedad que posteriormente precipita. Se decidió analizar cuáles son las principales fuentes que aportan humedad a la cuenca, para ello se utilizaron las salidas del modelo Lagrangiano FLEXPART. Se encontró que las tres principales fuentes son la cuenca misma, una región terrestre ubicada al sur de México y parte del mar Caribe. Posteriormente, se realizaron anomalías estandarizadas de evaporación en dichas zonas y se encontró que el único evento que presentó anomalías negativas en las tres regiones fue el evento de 2005, los demás eventos presentaron mayoritariamente anomalías positivas.

Con el objetivo de tratar de entender las condiciones sinópticas de cada evento, se analizaron las anomalías estandarizadas de altura geopotencial a 500 hPa y a nivel del mar. Se encontró que en los eventos de 1982, 1986 y 2005 se presentaron sobre la región de estudio anomalías neutras, mientras que en los casos restantes se observaron anomalías positivas. Durante el análisis de la presión a nivel del mar, particularmente en el Golfo de México, el único caso que presentó anomalías negativas fue el 2005.

Para profundizar en estos resultados, se estudiaron las anomalías de CAPE y velocidad vertical (Ω), con ellos se encontró que de manera general, los meses que presentan sequía corresponden con anomalías positivas de Ω (subsistencia). En cuanto a los valores de CAPE el único evento que presentó anomalías negativas fue el 2005, esto es causado por la presencia de la baja presión anómala en el golfo que inhibió la llegada de humedad hacia la cuenca, que corresponde con los valores de las anomalías de humedad.

Es decir, que a pesar de que existen las condiciones termodinámicas para detonar la precipitación, los movimientos de subsistencia actúan como inhibidor de la convección, lo que favorece la disminución de la precipitación. Por último, se destaca que si bien tres de los eventos de sequía se desarrollaron bajo condiciones de El Niño fuertes, no se encuentra un patrón claro entre ellos, en cuanto a los dos eventos restantes, se desarrollaron bajo condiciones neutras, por lo que una relación directa con el fenómeno de El Niño no es clara.

Índice general

Código de Ética	I
Agradecimientos	III
Resumen	v
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. El ciclo del agua	1
1.2. Sequía	4
1.3. Zona de estudio: Región Hidrológico Administrativa IV Balsas	6
1.4. Antecedentes	10
1.5. Objetivos	12
2. Datos y Métodos	13
2.1. Índices de Sequía	13
2.1.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	13
2.1.2. Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)	15
2.2. Transporte de humedad	17
2.3. Circulación Atmosférica	19
3. Análisis y Resultados	20
3.1. Selección de los Años de Sequías	20
3.2. Descripción de los Eventos de Sequía	25
3.3. El papel de la Precipitación	30
3.4. Transporte de Humedad hacia la cuenca del Balsas	38
3.4.1. Climatologías mensuales del transporte de humedad	38

3.4.2. Cuantificación del transporte de humedad	50
3.5. Circulación atmosférica	55
3.5.1. Análisis de estabilidad en la cuenca	60
4. Discusión y Conclusiones	67
A. Índices SPEI-1 y SPI-1 para cada mes	77
B. Circulación Atmosférica de cada mes	83

Índice de figuras

1.1.	Esquema del ciclo del agua. Obtenido de: MetOffice-UK (2019)	2
1.2.	Regiones Hidrológico Administrativas de México. Obtenido de: SEMARNAT (2018)	6
1.3.	Estados que forman parte de la RHA IV Balsas, la línea negra representa los límites de esta.	7
1.4.	Subregiones de planeación, superficies y municipios en la RHA IV, Balsas. Obtenido de: CONAGUA (2010)	8
2.1.	Esquema de una partícula que realiza un ciclo de evaporación y posterior precipitación. La línea gruesa representa la superficie y el eje vertical es la altura sobre ella. La partícula se señala como un círculo y su trayectoria es marcada con una línea con una flecha y la variación de humedad está representada por la línea señalada con una q . Al principio de la trayectoria la partícula gana humedad $\frac{dq}{dt} > 0$, es decir, hay evaporación en la zona. Posteriormente conforme la partícula se eleva pierde humedad $\frac{dq}{dt} < 0$ es decir, hay precipitación. Modificado de: Stohl and James (2004)	18
3.1.	Serie de precipitación para la RHA Balsas de 1980-2017, con datos de la base CRU.	21
3.2.	Serie de los índices SPI-6 y SPEI-6 de octubre para el periodo de 1980-2017.	22
3.3.	Serie de los índices SPI-1 y SPEI-1 para el periodo de 1980-2017. Las franjas amarillas representan los eventos de sequía seleccionados.	23
3.4.	Valores del índice SPEI-6 de octubre para cada evento de sequía.	25
3.5.	Valores del índice SPI-6 de octubre para cada evento de sequía.	26
3.6.	Diferencias de los índices SPEI-6 y SPI-6 para octubre de cada evento de sequía. Las diferencias son adimensionales	28
3.7.	Valores para el evento de 1982 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)	30

3.8. Valores para el evento de 1986 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)	31
3.9. Valores para el evento de 1987 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)	32
3.10. Valores para el evento de 1997 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)	33
3.11. Valores para el evento de 2005 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU.	34
3.12. Precipitación acumulada para cada uno de los eventos comparada con la climatología acumulada en ese mismo periodo.	35
3.13. Valores de $(E-P)_{>0}$ para enero 1980-2017	38
3.14. Valores de $(E-P)_{>0}$ para febrero 1980-2017	39
3.15. Valores de $(E-P)_{>0}$ para marzo 1980-2017.	40
3.16. Valores de $(E-P)_{>0}$ para abril 1980-2017	41
3.17. Valores de $(E-P)_{>0}$ para mayo 1980-2017	42
3.18. Valores de $(E-P)_{>0}$ para junio 1980-2017	43
3.19. Valores de $(E-P)_{>0}$ para julio 1980-2017	44
3.20. Valores de $(E-P)_{>0}$ para agosto 1980-2017	45
3.21. Valores de $(E-P)_{>0}$ para septiembre 1980-2017	46
3.22. Valores de $(E-P)_{>0}$ para octubre 1980-2017	47
3.23. Valores de $(E-P)_{>0}$ para noviembre 1980-2017	48
3.24. Valores de $(E-P)_{>0}$ para diciembre 1980-2017	49
3.25. Regiones fuente de humedad para la región de estudio en colores. Las zonas marcadas con líneas son las regiones que superan el percentil 99.5.	50
3.26. Climatología mensual de las integrales de área de $(E-P)_{>0}$ para cada región fuente de humedad en el periodo de estudio (1980-2017).	52
3.27. Anomalías estandarizadas acumuladas de $(E-P)_{>0}$ para las regiones obtenidas con el percentil 95. La estandarización fue con base en el periodo de 1981 - 2010.	53

3.28. Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para agosto de 1982.	55
3.29. Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para julio de 1986.	56
3.30. Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para octubre de 1987.	57
3.31. Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para agosto de 1997.	58
3.32. Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para junio de 2005.	59
3.33. Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul).	61
3.34. Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul). . .	62
3.35. Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul). . .	63
3.36. Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul). . .	64
3.37. Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul). . .	65
A.1. Índice SPI para cada mes de la sequía de 1982	77
A.2. Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1982	78
A.3. Índice SPI para cada mes de la sequía de 1986	78
A.4. Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1986	79
A.5. Índice SPI para cada mes de la sequía de 1987	79
A.6. Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1987	80
A.7. Índice SPI para cada mes de la sequía de 1997	80
A.8. Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1997	81
A.9. Índice SPI para cada mes de la sequía de 2005	81
A.10. Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 2005	82

B.1. Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1982.	84
B.2. Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1986.	85
B.3. Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1982.	86
B.4. Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1997.	87
B.5. Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 2005.	88

Índice de tablas

2.1. Valores para los índices SPI y SPEI, su significado y probabilidad. Modificado de WMO (2012); Ye et al. (2015)	16
3.1. Eventos de sequía más severos para la RHA IV, utilizando los índices SPI-6 y SPEI-6	22
3.2. Valores para cada mes de mayo a octubre con los índices SPI-1 y SPEI-1, en rojo se resalta el mes pico de cada evento.	24
3.3. Valores del SOI para los meses de cada evento de sequía. ¹	24

Capítulo 1

Introducción

1.1. El ciclo del agua

El agua es un elemento importante del sistema climático y se encuentra presente en diferentes reservorios conectados por la circulación del agua. Al evaporarse debido a la radiación solar, el agua va desde la superficie terrestre a la atmósfera, y después regresa a la superficie. Este proceso es denominado como el ciclo del agua, el cual mediante procesos de evaporación (en tierra, océano, o cuerpos de agua continentales), condensación para formar nubes, precipitación, infiltración, percolación, escurrimiento y re-evaporación mantiene al agua en constante movimiento en diferentes reservorios de la tierra ([Sorí, 2018](#)).

En la figura 1.1, se muestra a grandes rasgos las etapas del ciclo del agua. En la figura es notable la fuerte influencia de los océanos para proveer de humedad precipitable a los continentes, sin embargo, en promedio el 40% de la precipitación terrestre se origina de la evaporación terrestre conocido este proceso como "*recycling*" ([Van der Ent et al., 2010](#)).

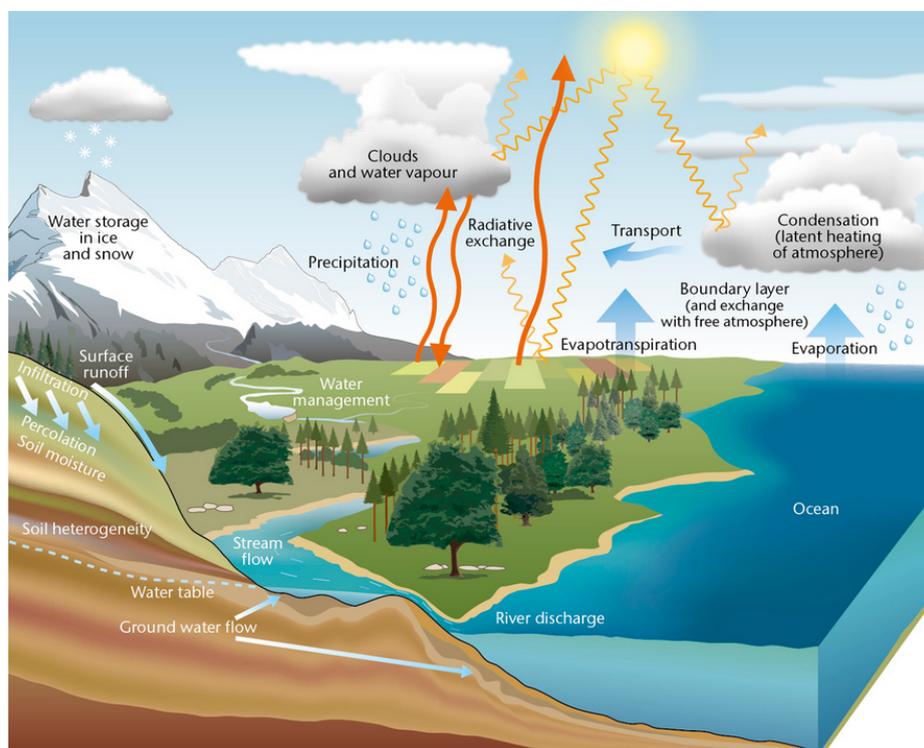


FIGURA 1.1: Esquema del ciclo del agua. Obtenido de: [MetOffice-UK \(2019\)](#)

Debido al alto número de interacciones que ocurren en el ciclo hidrológico, éste posee un alto grado de complejidad. Aunado a esto, las actividades humanas tales como el cambio de uso de suelo en una zona determinada, pueden alterar de manera considerable el ciclo hidrológico a nivel local, y posteriormente tener un efecto a escalas mayores ([Kuchment, 2004](#)).

En este trabajo se investigará el origen de la humedad que precipita en una región al sur de México mediante el estudio de la rama atmosférica del ciclo del agua. Las regiones tropicales tales como las de México, se caracterizan por poseer patrones convectivos sobre océano y continente. La identificación de los mecanismos físicos, así como de las fuentes de humedad que son responsables de los diferentes regímenes de precipitación, son cruciales para lograr un buen entendimiento del ciclo hidrológico en la zona de interés y así mejorar los modelos numéricos ([Durán-Quesada et al., 2010](#)).

En años recientes, las cuencas hidrográficas, que son unidades físico-naturales, son cada vez más utilizadas para el estudio y gestión de los recursos naturales en el mundo. En México, las condiciones orográficas y climáticas han provocado que las cuencas tengan una gran variedad de tamaños y formas, logrando así tener sistemas hidrográficos complejos como la cuenca del Río Bravo ([Cotler Ávalos and Garrido Pérez, 2010](#)). Para estudios del ciclo hidrológico, las cuencas se utilizan como territorios de análisis y gestión. Además, se considera que la cuenca constituye el espacio geográfico con “una identidad cultural y socio-económica originada por las formas de acceso y apropiación de los recursos naturales” ([Cotler Ávalos and Caire, 2009](#)).

De acuerdo con [Cotler Ávalos and Garrido Pérez \(2010\)](#), la principal razón y fundamento teórico por la que la cuenca hidrográfica se sitúa por encima de otras entidades de planeación ambiental, es porque la cuenca hidrográfica interconecta todo el espacio geográfico que la constituye a través de flujos hídricos superficiales y subterráneos, así como flujos de nutrientes, materia y energía. De esta forma, la cuenca constituye un complejo sistema con una gran variedad de componentes e interconexiones. Dando lugar así, a un sistema dinámico, interrelacionado, auto organizado, adaptativo y gobernado por procesos de retroalimentación ([Moreno Diaz and Renner, 2006](#)).

1.2. Sequía

Una de las definiciones más concisas para sequía fue dada por [Beran et al. \(1985\)](#) el cual indica que la principal característica de una sequía es una disminución de la disponibilidad de agua en ríos o cuencas en un periodo y área particulares.

En las cuencas hidrográficas pueden darse distintos tipos de sequías. De hecho, de acuerdo con [Tate and Gustard \(2000\)](#), no existe una definición de sequía que sea universalmente aceptada, puesto que dicha definición debería estar relacionada con la región de estudio y campo de aplicación. Por ejemplo, un meteorólogo podría estar interesado en periodos de precipitación por debajo de lo normal, mientras que un agrónomo está interesado en periodos donde la humedad del suelo es insuficiente como para sostener cultivos. Por otro lado, un economista enfoca su atención en cómo un bajo abastecimiento de agua puede afectar la productividad social y actividades de consumo ([Dracup et al., 1980](#)).

A pesar de las dificultades de encontrar una sola definición, [Tate and Gustard \(2000\)](#) categorizan las sequías en cinco tipos: climatológica, agro-meteorológica, del flujo del río, agua subterránea y operacional. En su artículo hace una amplia recopilación de características para cada una de ellas, pero en general se puede asumir de la siguiente forma:

- La sequía climatológica, hace referencia a la sequía que se explica en términos de un déficit de precipitación en relación a un promedio, y dependiendo de la definición, su duración podría ir del orden de días a meses.
- La sequía agro-meteorológica, se enfoca principalmente en la falta de agua para sostener los cultivos.

- La sequía del flujo del río, como lo dice su nombre, se relaciona a los efectos de periodos de escasez de lluvia en el suministro de agua superficial y sub-superficial. La unidad de tiempo generalmente usada para este tipo de sequía es el mes.
- La sequía de agua subterránea, se basa en la recarga anual menor al promedio por más de un año. Los acuíferos más pequeños y poco profundos son los más sensibles a este tipo de sequía.
- La sequía operacional es considerada como una combinación de una disminución de precipitación, el desarrollo de sistemas de recursos hídricos y decisiones administrativas.

Debido a los diferentes tipos de sequía que se pueden considerar, [Dracup et al. \(1980\)](#) propone cuatro decisiones que se deben de tomar al momento de estudiar una sequía:

- Definir el interés principal, ya sea la precipitación (sequía meteorológica) la corriente (sequía hidrológica) o la humedad del suelo (sequía agrícola).
- El periodo a promediar en la serie de tiempo: meses, estaciones o años.
- Distinguir en qué se diferencian analíticamente los eventos de sequía a otros eventos en la serie de tiempo.
- Evaluar cómo deben considerarse los aspectos regionales de las sequías en el estudio.

Independientemente de la definición que se quiera adoptar para la sequía, no cabe duda que éste es un problema que tiene impactos incluso fuera de la zona afectada directamente. La complejidad en el estudio de la sequía radica en que muchos sectores dependen del agua para producir bienes y servicios, y es por ello que es considerada uno de los peligros que más afectan a las actividades antropogénicas ([Dracup et al., 1980](#); [Wilhite et al., 2007](#)).

1.3. Zona de estudio: Región Hidrológico Administrativa IV Balsas

México es un país con una extensión territorial de 1,964 millones de km^2 , y en él se han delimitado: 757 cuencas hidrológicas que, con propósitos administrativos se agruparon en 37 regiones hidrológicas, que, a su vez, desde 1997 fueron agrupadas en trece llamadas Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) (CONAGUA, 2018b).

Dichas regiones se muestran en la figura 1.2, los límites geográficos se ajustaron a los márgenes municipales para facilitar la integración de datos socio-económicos. Las trece RHA son: (I) Península de Baja California, (II) Noreste, (III) Pacífico Norte, (IV) Balsas, (V) Pacífico Sur, (VI) Río Bravo, (VII) Cuencas Centrales del Norte, (VIII) Lerma-Santiago-Pacífico, (IX) Golfo Norte, (X) Golfo Centro, (XI) Frontera Sur, (XII) Península de Yucatán y (XIII) Aguas del Valle de México .



FIGURA 1.2: Regiones Hidrológico Administrativas de México.
Obtenido de: SEMARNAT (2018)

Para éste trabajo, se seleccionó como región de estudio a la RHA IV: Balsas. La cuenca está localizada en la zona centro del país, entre los meridianos $97^{\circ}12'$ y $103^{\circ}10'$ de longitud oeste, y entre los paralelos $17^{\circ}04'$ y $19^{\circ}58'$ de latitud norte. Colinda al norte con la RHA XIII (Aguas del Valle de México), al noroeste con la RHA VIII (Lerma-Santiago-Pacífico) y al sur, con la RHA V (Pacífico Sur).

La región Balsas comprende parcial o totalmente la superficie de ocho entidades federativas (Jalisco, Michoacán, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Guerrero, Estado de México y Oaxaca) como se muestra en la figura 1.3. De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2010), está constituida por 420 municipios. La región IV Balsas, está conformada por dos grandes provincias fisiográficas, La Sierra Madre del Sur y El Eje Volcánico Transversal. Dicho relieve permite que exista gran variedad de características orográficas, climáticas e hidrológicas en la cuenca (Ortiz Pérez et al., 2017).

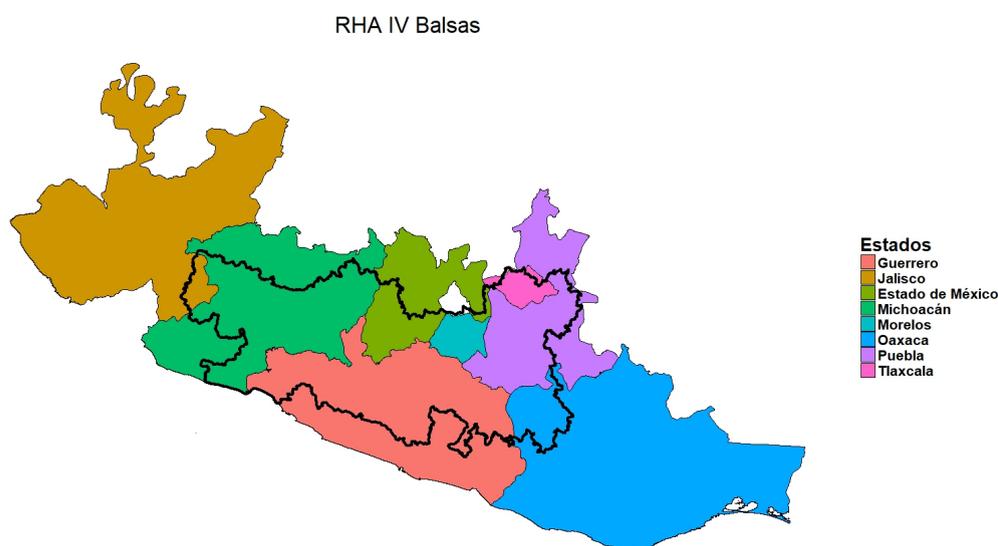


FIGURA 1.3: Estados que forman parte de la RHA IV Balsas, la línea negra representa los límites de esta.

La cuenca tiene una superficie continental de $116,436\text{km}^2$ (CONAGUA, 2018a) y como se muestra en la figura 1.4, se subdivide en tres regiones: Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas.

En la zona de estudio destaca la presencia del río Balsas, que es el río de la vertiente del Pacífico más importante de la República Mexicana con un escurrimiento natural medio superficial de $16,636.2\text{ hm}^3/\text{año}$, un área superficial de $112,039\text{ km}^2$ y una precipitación media anual de 947 mm . El agua renovable media de la región es de $16,798\text{ hm}^3/\text{año}$, y tiene un volumen de agua concesionado de $10\,874\text{ hm}^3/\text{año}$. Adicionalmente para el año 2017, presentó un grado de presión del 50.2%, considerado como fuerte.



FIGURA 1.4: Subregiones de planeación, superficies y municipios en la RHA IV, Balsas. Obtenido de: CONAGUA (2010)

La cuenca Balsas representa un lugar geográfico importante pues abastece a grandes zonas conurbadas como Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca-Cuautla y grandes ciudades como Uruapan y Chilpancingo.

La mayor parte del territorio está constituido por zonas serranas con pequeños valles, dichas características permiten que haya un gran potencial energético debido a las fuertes pendientes del río Balsas ([Valencia-Vargas, 2015](#)). De hecho, a escala nacional las RHA XI Frontera Sur y IV Balsas, tienen las concesiones de agua más importantes para el uso en centrales hidroeléctricas. En [CONAGUA \(2010\)](#) se menciona que la infraestructura dedicada a la generación de energía eléctrica ocupaba el 78 % del volumen de agua de la cuenca, y destaca la presencia de la presa Infiernillo por ser una de las más importantes de México, así como la planta termoeléctrica Petacalco. De acuerdo con [CONAGUA \(2018a\)](#) en el 2017 esta cuenca aportó cerca del 24.96 % de volumen declarado para la generación de energía eléctrica, que en ese año generó 11.7 % de la generación bruta de energía del país. Para este mismo año, la cuenca contaba con una población de 12.04 millones de habitantes y en el año 2016 aportó el 6.40 % del PIB nacional.

Adicionalmente [CONAGUA \(2018a\)](#) menciona que para el periodo de 2017–2030, más de la mitad del crecimiento poblacional total ocurrirá en las RHA IV Balsas, VI Río Bravo, VIII Lerma-Santiago-Pacífico y XIII Aguas del Valle de México. Sin embargo, de acuerdo con el índice global de vulnerabilidad por cambio climático desarrollado por [IMTA \(2015\)](#), la región de Alto Balsas presenta un alto grado de vulnerabilidad hídrica. Además en su trabajo [Valencia-Vargas \(2015\)](#) indica que fuertes procesos de erosión generados por la combinación de fuertes precipitaciones y una severa deforestación, han generado impactos en el ciclo hidrológico, un menor rendimiento en la producción agrícola y pecuaria, y pérdida de la biodiversidad entre otros.

1.4. Antecedentes

El clima de México varía entre condiciones secas y húmedas en la región norte a condiciones húmedas y tropicales en la zona sur. Durante el verano los vientos alisios son responsables de la precipitación a las regiones centro y sur. De igual importancia son los huracanes en las costas del Pacífico y del Atlántico, así como el efecto orográfico ([Liverman, 1999](#)).

[Velasco \(1999\)](#) menciona que de acuerdo a testimonios y récords históricos, en años recientes las sequías severas y extremas han sido más recurrentes en México, un tema delicado en un país en donde 85 % del agua disponible se destina a la agricultura.

La región IV Balsas no escapa a fenómenos naturales como ciclones y huracanes, sin embargo, en extremo opuesto es también una zona proclive a sequías en las regiones Alto y Bajo Balsas ([CONAGUA, 2010](#)). Por ejemplo, [Guerrero \(2015\)](#), comenta de una fuerte sequía en la cuenca del Río Balsas en el año 2015. Esta sequía provocó pérdidas de hasta un 80 % en la siembra de jamaica, ajonjolí, sorgo y maíz, aumentando el interés de estudiar las causas y efectos de las sequías en esta región.

Es conocido que El Niño-Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) es el fenómeno climático a escala global de mayor importancia que tiene un efecto en la precipitación en varias zonas del mundo ([Ropelewski and Halpert, 1987](#)). En México, condiciones de El Niño (La Niña) durante el verano, conllevan a menor (mayor) precipitación de lo normal. El aumento de precipitación en veranos La Niña, es debido a un desplazamiento hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés), además de vientos alisios débiles que favorecen la actividad de ondas del este y más ciclones tropicales en el Golfo de México y el Mar Caribe ([Cavazos and Hastenrath, 1990](#); [Salinas-Prieto, 2006](#)). En veranos El Niño, se inhibe la precipitación debido a un desplazamiento anómalo hacia el ecuador de la ITCZ, una intensificación de la Corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés), aumento de subsidencia sobre buena parte de la región continental y una

disminución de ondas del este así como de ciclones tropicales ([Waliser and Gautier, 1993](#); [Diaz and Bradley, 2004](#)).

Adicionalmente en su trabajo, [Méndez and Magaña \(2010\)](#) señalan una relación de las sequías con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés). Los autores mencionan que una fase negativa de PDO y positiva de AMO, generan sequías en el norte de México, mientras que una fase positiva de PDO y negativa de AMO generan sequías en el centro y sur de México. Esto quiere decir que las configuraciones de las oscilaciones en especial El Niño condicionan que exista mayor probabilidad de ocurrencia de sequías en la zona sur de México y por tanto en la cuenca del Río Balsas.

En general, existe una falta de estudios científicos en sobre la severidad, propagación e impactos socio-económicos de las sequías contemporáneas en México ([Ortega-Gaucin and Velasco, 2013](#)). Adicionalmente, la atención que se le da se basa en un enfoque reactivo, en donde la atención es enfocada en el alivio de la crisis provocada por la sequía y no en la gestión de riesgo, generando así que diversos sectores de la zona centro y norte sigan siendo altamente vulnerables ante las sequías ([Ortega-Gaucin and Velasco, 2013](#)).

1.5. Objetivos

Debido a la importancia que tiene la cuenca del Balsas y la falta de estudios que existe acerca de las sequías que han ocurrido en ella, este trabajo tiene como objetivo principal el estudio de las sequías en la región y su posible origen. Para ello, se realizarán una serie de objetivos particulares:

- Calcular el índice estandarizado de precipitación (SPI) y el índice estandarizado de precipitación- evaporación (SPEI) para la Región Hidrológico Administrativa IV Balsas y con base en ello determinas los periodos más intensos de sequía en la región de estudio.
- Estudiar las características espacio-temporales de cada evento de sequía determinados.
- Evaluar la posible influencia del déficit de precipitación y la temperatura en los eventos de sequía.
- Analizar las anomalías en el transporte de humedad que llega a la cuenca del Balsas como posible elemento clave para el entendimiento de los eventos de sequía.
- Analizar el papel que juega la circulación atmosférica y los sistemas sinópticos en cada uno los episodios de sequía.

Capítulo 2

Datos y Métodos

2.1. Índices de Sequía

Para identificar las sequías ocurridas en la cuenca del Balsas y detectar las más severas, se han empleado dos índices estandarizados de sequía.

2.1.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

[McKee et al. \(1993\)](#) propusieron definir la sequía basándose en la estandarización de la precipitación. El índice que definieron se calcula a partir de promedios mensuales de precipitación que idealmente tengan una serie temporal de al menos 30 años. Posteriormente se selecciona la escala temporal la cual según se calculará el índice para el periodo de i meses, en donde i puede ir de uno a 36 meses. Dicha escala temporal tiene un impacto en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos y afectación de diferentes elementos (humedad del suelo, vegetación, nivel de ríos y aguas subterráneas). Déficits relacionados a la humedad del suelo suelen responder en escalas temporales menores, a comparación de por ejemplo mantos acuíferos que tenderán a responder en escalas mayores.

Para calcular el SPI, la serie temporal de precipitación se ajusta a una distribución de probabilidad, usualmente Gamma o Pearson tipo III. Posteriormente, es transformada a una distribución normal, de tal modo que la media del SPI en ese periodo de tiempo es cero, los valores positivos corresponden con mayor precipitación y valores negativos corresponden con menor precipitación. Dependiendo de la escala temporal seleccionada para realizar el estudio, cada episodio de sequía tiene un inicio, fin y duración definidos, así como la severidad del episodio, la cual está definida como la suma de todos los valores mensuales que comprenden el episodio de sequía.

El SPI fue reconocido como el índice a nivel internacional preferido para el estudio de la sequía meteorológica ([Hayes et al., 2011](#)), debido a su sencillez de cálculo y flexibilidad temporal. Cabe notar que al ser estandarizado, el índice permite el estudio de no sólo episodios secos, también el de episodios húmedos. Sin embargo, más recientemente ha crecido la preocupación en cuanto a su utilidad en análisis de cambio climático, puesto que no toma en cuenta variables como la evapotranspiración o la temperatura ([WMO, 2012](#); [NCAR, 2018](#)). Es por ello que una alternativa ha sido desarrollada para lidiar con dichos inconvenientes, la cual se describe a continuación.

2.1.2. Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)

Ante la advertencia que algunos autores habían hecho sobre omitir el efecto de la temperatura en condiciones de sequía, el índice estandarizado de precipitación - evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés), desarrollado por [Vicente-Serrano et al. \(2010\)](#), surge como alternativa al SPI.

El SPI se basaba en dos suposiciones: 1) La variabilidad de la precipitación es mucho mayor que la de cualquier otra variable (por ejemplo, la temperatura o la evapotranspiración potencial), y 2) Las otras variables son estacionarias, es decir que no tienen una tendencia temporal. Sin embargo el SPEI está diseñado para tomar en cuenta la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP) para la determinación de sequías. Éste índice logra capturar el impacto de la temperatura en la demanda del agua. Existen diferentes métodos para el cálculo de ETP, como el método de [Thornthwaite \(1948\)](#) que sólo necesita la temperatura para poder realizarse, o bien otros métodos más sofisticados con más variables pero que incrementan su incertidumbre ([NCAR, 2015](#)).

En este caso, se ha empleado una variante del método de Penman-Monteith, llamado el método de FAO Penman-Monteith el cual requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Este método surge como resultado de una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, en donde se recomienda usarlo como estándar para la definición y cálculo de la evapotranspiración de referencia, además, se consideró tenía los mejores resultados con el mínimo error posible ([Allen, 2006](#)).

Para calcular el SPEI, se utiliza una metodología similar a la del SPI, sólo que en vez de ajustar la precipitación a una distribución, lo que se ajusta es la diferencia entre la precipitación y ETP, a una distribución Log-Logística.

El SPEI logra cumplir los requerimientos de un índice de sequía, al ser multi-escalar puede ser utilizado en diferentes áreas de conocimiento para analizar sequías y al igual que el SPI se puede determinar claramente la duración, el inicio, el término y severidad de cada evento de sequía. En general, para categorizar a ambos índices, se utilizan los valores presentados en el cuadro 2.1, así como la probabilidad que presentan.

SPI/SPEI	Categoría	Probabilidad (%)
2.0+	Extremadamente húmedo	2.3
1.5 a 1.99	Muy húmedo	4.4
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo	9.2
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal	68.2
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco	9.2
-1.5 a -1.99	Severamente seco	4.4
-2 y menor	Extremadamente seco	2.3

CUADRO 2.1: Valores para los índices SPI y SPEI, su significado y probabilidad. Modificado de [WMO \(2012\)](#); [Ye et al. \(2015\)](#)

Para calcular tanto el SPI como el SPEI a escala mensual y estacional, se utilizó la base de datos CRU TS v.4.02 ([Harris et al., 2014](#)) que es desarrollada por la universidad de East Anglia, en Reino Unido. Dicha base es creada a partir de datos de más de 4000 estaciones meteorológicas y posee datos mensuales para el periodo de tiempo de 1901-2017, con una malla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ que cubre todas las áreas continentales del mundo (exceptuando la Antártica). Para este trabajo, en el caso del SPI se utilizó la precipitación y para el SPEI la precipitación y evapotranspiración potencial. La base CRU frecuentemente es utilizada para hacer estudios de variabilidad climática y eventos extremos ([NCAR, 2017](#)). En este trabajo se determinó cuál era la temporada húmeda sobre la región de estudio y con base en dicho periodo se decidió utilizar los índices SPI-6 y SPEI-6 para determinar las sequías más intensas en el periodo de estudio. Adicionalmente, también se ha utilizado la variable temperatura de la base de datos CRU TS v.4.02 de manera independiente.

2.2. Transporte de humedad

Para determinar los aportes de humedad hacia la cuenca hidrológica, se utilizó el modelo Lagrangiano FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model) (Stohl et al., 1998). En un principio, dicho modelo había sido empleado para el estudio de dispersión de contaminantes, sin embargo, ha sido adaptado para ser utilizado en el diagnóstico de fuentes de humedad que provocan precipitación en determinadas zonas (Stohl and James, 2004, 2005). Como prueba de ello, existen varios artículos en donde el modelo se empleó en el diagnóstico de fuentes de humedad en: Centroamérica (Durán-Quesada et al., 2010) o la India (Ordóñez et al., 2012). Para el caso específico de cuencas hidrológicas se cuenta con trabajos en: la Amazonía (Sorí et al., 2018), la Cuenca del Níger (Sorí et al., 2017), el Danubio (Stojanovic et al., 2017) entre otras.

Para determinar las fuentes de humedad de una región, el algoritmo de FLEXPART, se basa en la división homogénea de la atmósfera en N “partículas”, dichas partículas poseen una masa igual y aproximadamente constante que se mueven con el viento. El modelo permite saber cuál es la posición exacta de cada partícula así como el valor de humedad específica en un determinado tiempo. Los únicos cambios posibles de humedad que puede presentar la partícula son por medio de precipitación p o de evaporación e . Si denominamos q a la humedad específica de la partícula, en la ecuación 2.1, $(e - p)$ representa los aportes por evaporación en la partícula menos las pérdidas por precipitación y será igual a la tasa neta de cambio de vapor de agua dq en la partícula a lo largo de su trayectoria dt por la masa de la partícula m_p .

$$e - p = m_p \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

En la figura 2.1, se presenta un esquema de la trayectoria de una partícula en un ciclo de evaporación ($e - p > 0$) y precipitación ($e - p < 0$). A partir de esta idea, para determinar las fuentes de humedad de cierta región, se localizan las partículas que se dirigen hacia ella atrás en el tiempo. En este trabajo se utilizaron las trayectorias durante 10 días hacia atrás en el tiempo de todas las partículas que inicialmente se encontraban en la cuenca del Balsas, ya que diez días es el tiempo medio de residencia de vapor de agua en la atmósfera (Numaguti, 1999). Mediante el cálculo de incrementos o decrementos de humedad específica de cada partícula, se pueden determinar las áreas geográficas en donde las partículas ganan o pierden humedad.

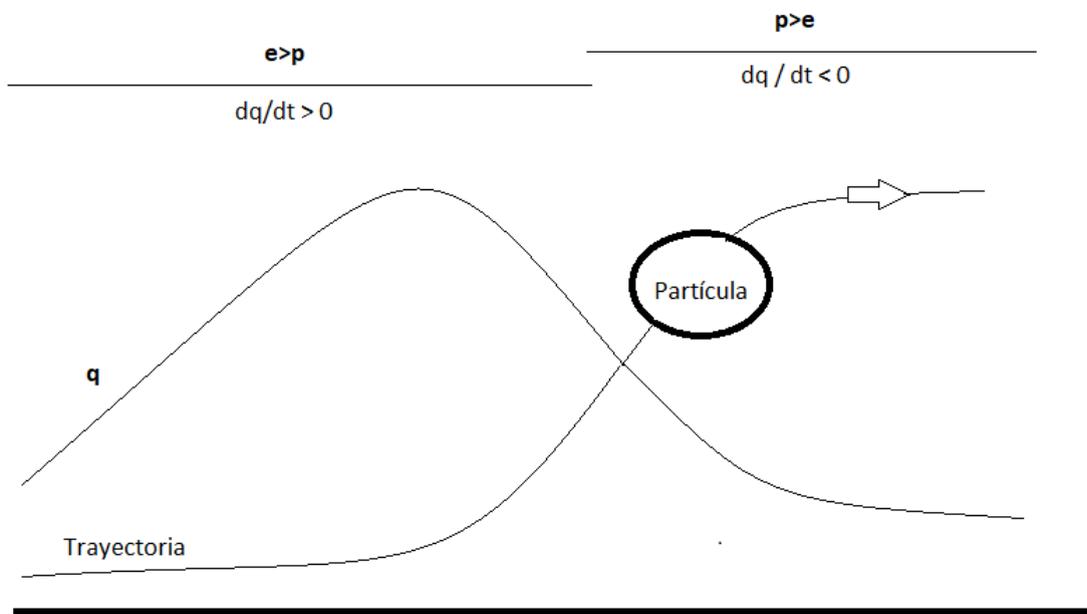


FIGURA 2.1: Esquema de una partícula que realiza un ciclo de evaporación y posterior precipitación. La línea gruesa representa la superficie y el eje vertical es la altura sobre ella. La partícula se señala como un círculo y su trayectoria es marcada con una línea con una flecha y la variación de humedad está representada por la línea señalada con una q . Al principio de la trayectoria la partícula gana humedad $\frac{dq}{dt} > 0$, es decir, hay evaporación en la zona. Posteriormente conforme la partícula se eleva pierde humedad $\frac{dq}{dt} < 0$ es decir, hay precipitación. Modificado de: [Stohl and James \(2004\)](#)

Todas las variaciones se promedian sobre una malla de grid de 1° de latitud por 1° de longitud. En lo sucesivo E y P representan la evaporación y la precipitación por unidad de área, y por tanto, $(E - P)$ será el flujo de agua disponible. Como se ha mencionado, para obtener una visión general de las fuentes de humedad, se sumaran los flujos netos de $(E - P)$ desde el día -1 hasta el día -10 , y de aquí en adelante esa suma se le dominará: $(E - P)_{10}$.

En este trabajo se realizaron promedios mensuales de $(E - P)_{10}$, para determinar la climatología de las fuentes de humedad para cada mes durante el periodo 1980-2017. Posteriormente, con el objetivo de cuantificar estos aportes de humedad, durante la estación húmeda se obtuvo el percentil 95 de las zonas con valores positivos de $(E - P)_{10}$. A partir de dichos valores, se seleccionaron las principales regiones fuente de área fija, lo que permitió realizar integrales de área sobre cada una de ellas.

2.3. Circulación Atmosférica

Con el objetivo de entender la circulación atmosférica relacionada con el origen de la sequía, se utilizaron promedios mensuales de altura geopotencial a 500 hPa así como datos de presión a nivel del mar, todas estas variables fueron obtenidas del Reanálisis ERA-Interim del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés) el cual abarca un periodo de tiempo desde 1979 en adelante (Dee et al., 2011), con una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$ para el periodo de 1980-2017. Para cada variable se graficó la anomalía mensual estandarizada con respecto al periodo de 1981 a 2010 durante los eventos de sequía. Esto con el objetivo de encontrar similitudes y diferencias entre cada evento de sequía y tratar de determinar una posible explicación dinámica a la causa de cada sequía.

Capítulo 3

Análisis y Resultados

3.1. Selección de los Años de Sequías

Para identificar los eventos de sequía del año hidrológico, se determinó en qué meses ocurre la temporada de precipitación en la región de estudio. En la figura 3.1, se muestra la precipitación promedio para cada mes en el periodo de 1980-2017, obtenida con la base de datos CRU.

En dicha figura se puede observar que el periodo de mayor precipitación en la cuenca comienza en mayo y se mantiene hasta octubre, en estos meses es en donde se recibe cerca del 95 % de la precipitación anual en la cuenca.

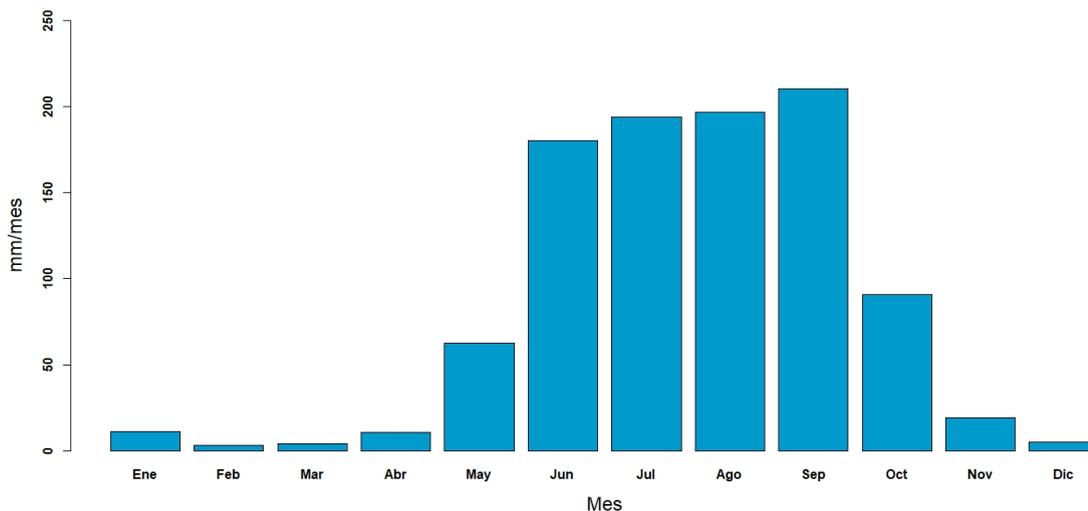


FIGURA 3.1: Serie de precipitación para la RHA Balsas de 1980-2017, con datos de la base CRU.

Dado que la temporada húmeda tiene una duración de seis meses (mayo a octubre), se decidió utilizar los índices SPI-6 y SPEI-6. Al utilizar los índices en una escala temporal de seis, se toma el acumulado de seis meses anteriores, es decir que al utilizar el SPI/SPEI-6 de octubre, se está tomando el acumulado desde mayo hasta octubre.

Los índices SPEI y SPI en una escala temporal de 6 meses podrían indicar el impacto inicial en los niveles de reserva de los cuerpos de agua. En la figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos para los índices SPEI-6 y SPI-6 de octubre, promediando su valor en los puntos de grid contenidos en la región representativa de la cuenca del Balsas. Como se puede observar ambos índices son muy similares y concuerdan en los mismo periodos secos, de hecho, la correlación entre ambos índices en el mes de octubre es de $\rho = 0.99$, sin embargo en determinadas ocasiones alguno de los dos índices muestra eventos más severos a comparación del otro. Adicionalmente, se observa que la cuenca pasa por periodos en donde hay sequías severas y transiciona a periodos sin ella, aunque es notable que ninguno de los dos índices presenta valores por arriba de dos desviaciones estándar positivas, mientras que negativas sí lo hace en

un caso. Para este estudio se seleccionaron los cinco eventos de sequía más intensas que se encontraran con el valor de los índices SPI-6 y SPEI-6 de octubre.

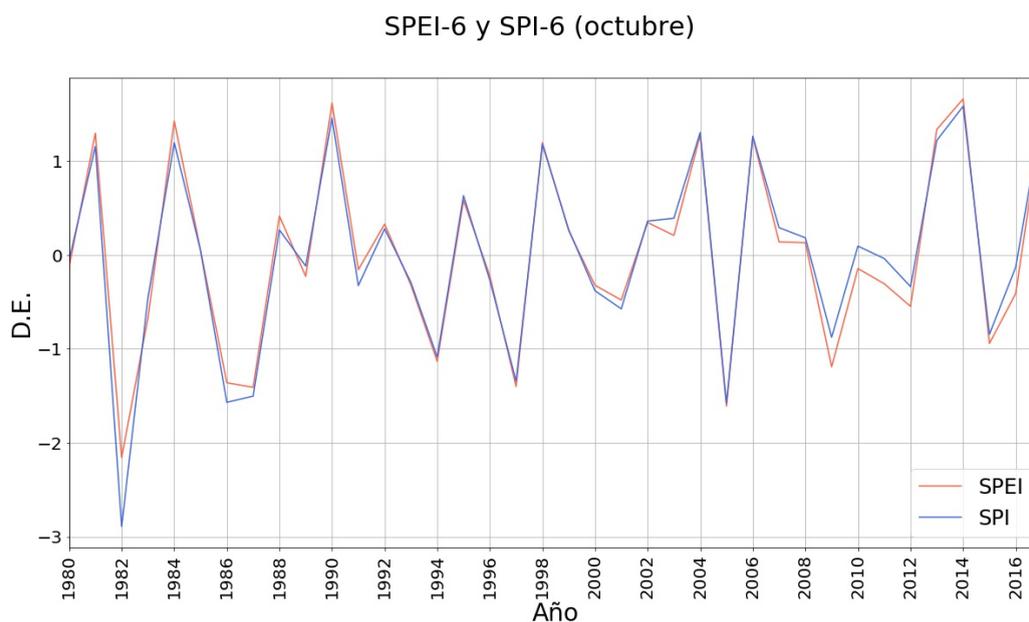


FIGURA 3.2: Serie de los índices SPI-6 y SPEI-6 de octubre para el periodo de 1980-2017.

En el cuadro 3.1, se muestran los años seleccionados junto con la intensidad de cada evento de sequía con ambos índices, los cuales concuerdan para todos los casos, siendo la sequía de 1982 la más intensa en de los cinco casos y la de 1986 la menos intensa.

Cinco eventos más severos de sequía	SPI-6	SPEI-6
1982	-2.14	-2.15
2005	-1.66	-1.61
1987	-1.35	-1.41
1997	-1.34	-1.40
1986	-1.31	-1.36

CUADRO 3.1: Eventos de sequía más severos para la RHA IV, utilizando los índices SPI-6 y SPEI-6

En la figura 3.3 se muestran los índices SPI-1 y SPEI-1 en el periodo de estudio, de igual manera se marcan con las franjas amarillas los cinco eventos de sequía mencionados anteriormente.

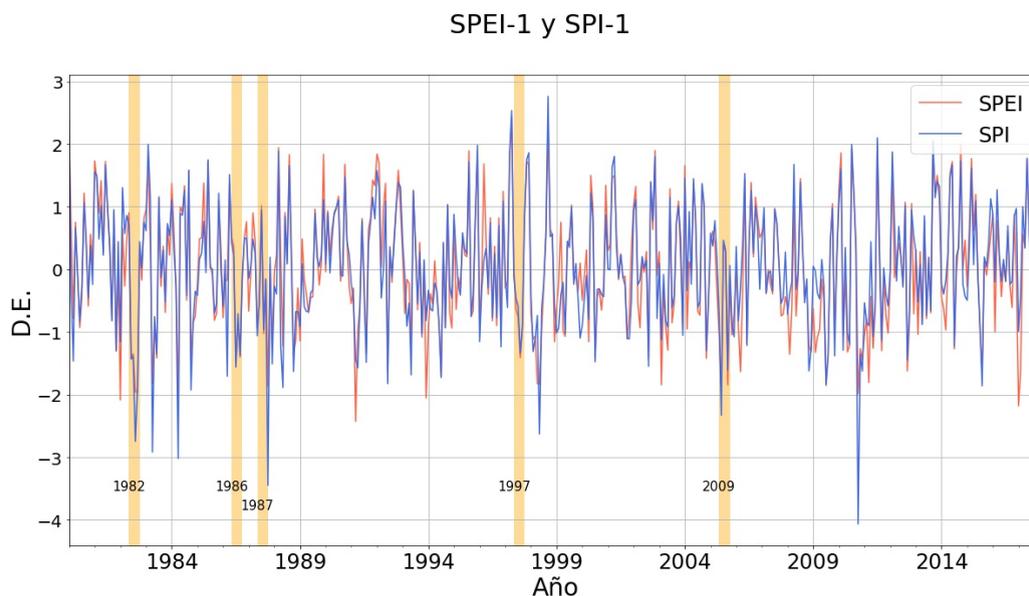


FIGURA 3.3: Serie de los índices SPI-1 y SPEI-1 para el periodo de 1980-2017. Las franjas amarillas representan los eventos de sequía seleccionados.

En el cuadro 3.2, se muestran los valores de los índices SPI-1 y SPEI-1, para cada uno de los eventos de sequía, adicionalmente en rojo se resaltan los valores de los meses pico para cada evento. En todos los casos ambos índices coinciden en el mes pico, que son junio (2005), julio (1986), agosto (1982 y 1997) y octubre (1987). Adicionalmente, se observa que no todos los meses de cada estación los valores de los índices son negativos, es decir, que hay casos como la sequía de 2005 en donde la sequía se interrumpe dos meses pero se vuelve a presentar, sin embargo, en todos los eventos, la sequía dura en total al menos cuatro meses.

	M		J		J		A		S		O	
	SPI-1	SPEI-1	SPI-1	SPEI-1	SPI-1	SPEI-1	SPI-1	SPEI-1	SPI-1	SPEI-1	SPI-1	SPEI-1
1982	0.71	0.90	-1.43	-1.34	-1.39	-1.35	-2.74	-1.96	-1.88	-1.95	0.44	0.32
2005	-0.742	-1.04	-2.33	-1.89	0.46	0.38	0.31	0.29	-1.61	-1.84	0.06	-0.17
1987	-1.06	-0.93	-0.51	-0.55	0.94	1.01	-0.97	-1.03	-0.16	-0.15	-3.45	-1.86
1997	-0.12	0.03	-0.46	-0.65	-0.59	-0.76	-1.34	-1.41	-0.90	-0.92	0.87	0.79
1986	0.42	0.51	0.23	0.362	-1.56	-1.45	-0.71	-0.85	-1.37	-1.40	-0.06	-0.19

CUADRO 3.2: Valores para cada mes de mayo a octubre con los índices SPI-1 y SPEI-1, en rojo se resalta el mes pico de cada evento.

Dado que se sabe que en eventos El Niño se presenta menor precipitación de lo normal en el centro-sur de México durante el verano (Melgarejo et al., 2017), los valores del Índice de la Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés) se muestran en el cuadro 3.3, los valores en rojo corresponden a meses que presentan valores El Niño fuertes y los valores en azul a valores La Niña fuertes, se puede apreciar que las sequías de los años: 1982, 1987 y 1997 se desarrollan bajo la influencia de un evento El Niño fuerte, mientras que las sequías de 2005 y 1986 se desarrollan bajo eventos neutros.

	M	J	J	A	S	O
1982	-0.3	-1.0	-1.5	-1.7	-1.7	-1.7
2005	-0.8	+0.4	+0.2	-0.3	+0.4	+1.2
1987	-1.3	-1.1	-1.4	-0.9	-1.0	-0.4
1997	-1.3	-1.4	-0.8	-1.4	-1.4	-1.5
1986	-0.2	+1.0	+0.3	-0.4	-0.5	+0.6

CUADRO 3.3: Valores del SOI para los meses de cada evento de sequía.¹

¹<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>

3.2. Descripción de los Eventos de Sequía

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran los valores para los índices SPEI-6 y SPI-6 del mes de octubre respectivamente. En el apéndice A, se muestran los valores de los índices SPI-1 y SPEI-1 para cada mes de cada evento. Ambos índices muestran patrones espaciales similares, sin embargo presentan algunas diferencias.

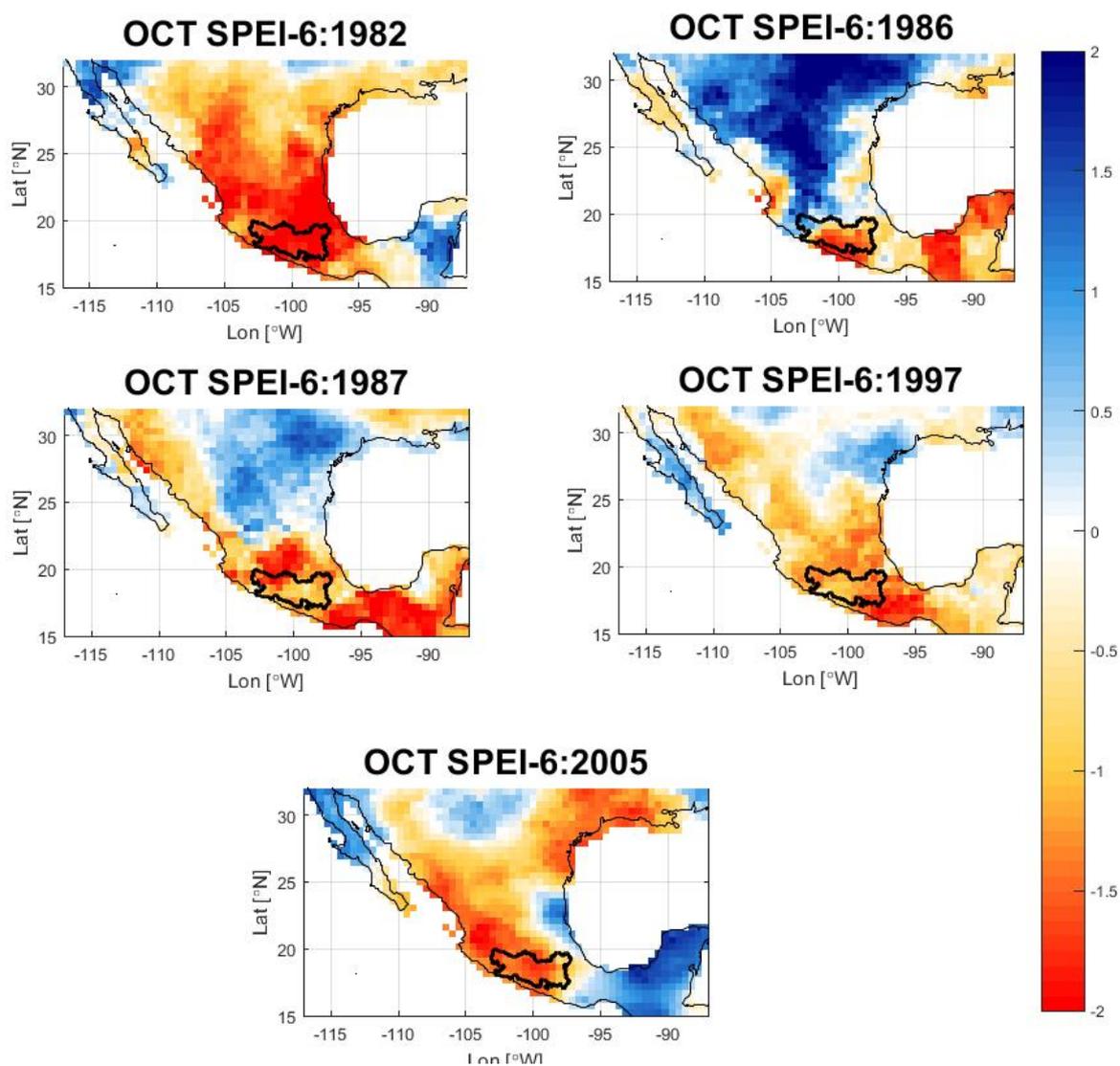


FIGURA 3.4: Valores del índice SPEI-6 de octubre para cada evento de sequía.

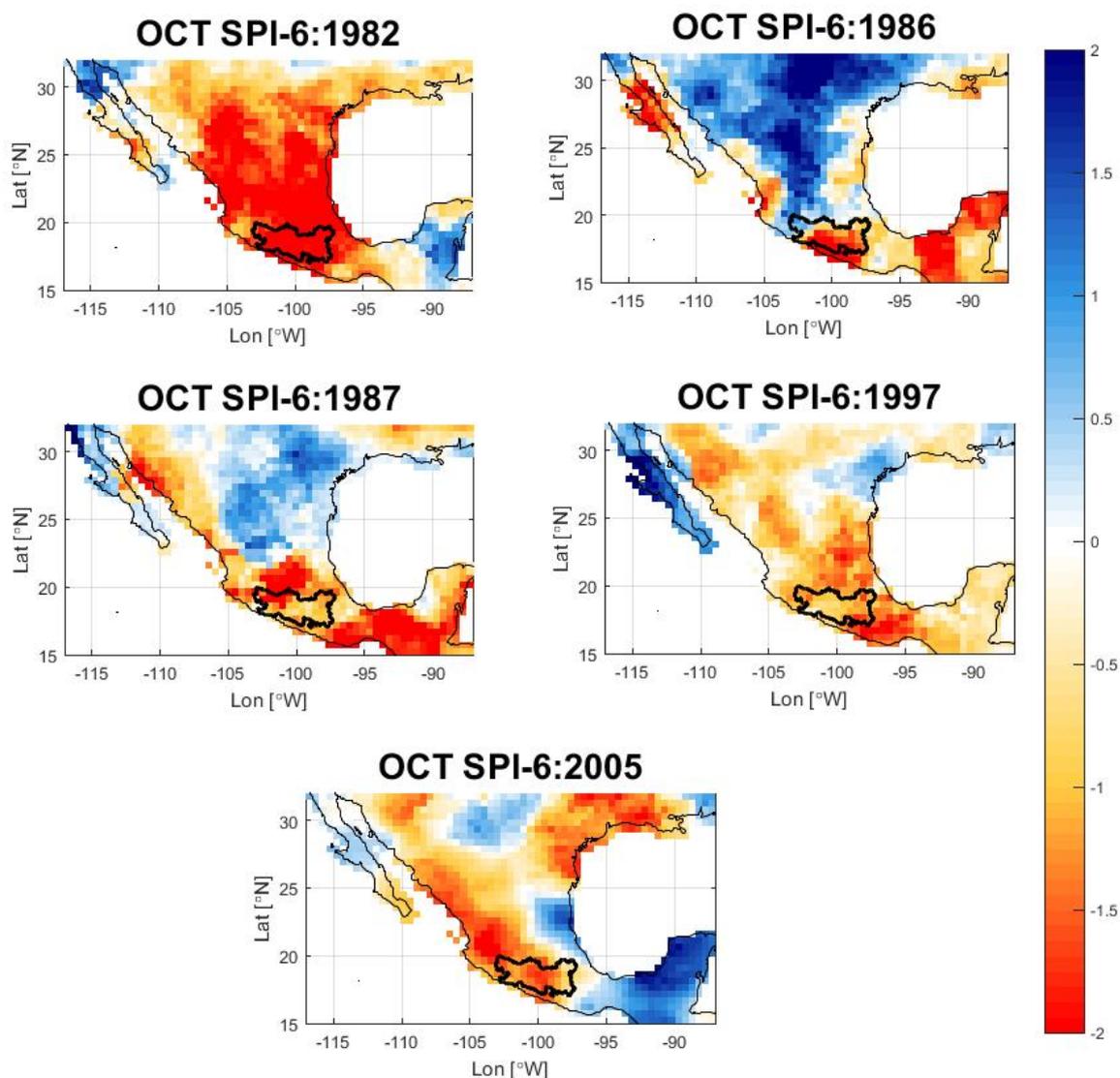


FIGURA 3.5: Valores del índice SPI-6 de octubre para cada evento de sequía.

Comenzando por el evento de 1982 existe una sequía generalizada en prácticamente todo el país a excepción de parte de la península de Yucatán y en el extremo noroeste del territorio. El resto del país presenta sequía de severa a extrema, sin embargo, el área afectada luce más intensa con el SPI-6, lo que indica que los procesos de evapotranspiración influyen en la modulación de la magnitud de las condiciones de sequía.

Prosiguiendo con la sequía de 1986, ésta se encuentra localizada en tres regiones al sur del país. Adicionalmente se observan otros dos puntos de sequía más moderados ubicados uno en la costa del Pacífico, y otro más en la península de Baja California. Sin embargo, en el resto del país no hay presencia de sequía, por el contrario condiciones húmedas en gran parte del territorio.

Un año después, en 1987, se presenta otra sequía que mayormente afecta la costa oeste y sur del territorio nacional. Sin embargo, la zona de mayor afectación es al norte de la región de estudio y al sur de la península de Yucatán. En la región noreste no hay señal de sequía.

La sequía de 1997, presenta al igual que el evento de 1982, un patrón de menos precipitación en la mayor parte del territorio, excepto por la península de Baja California en donde el índice es positivo. Las zonas en donde la sequía es más severa se localizan en al sur de la región de estudio, y parte de la costa del golfo de México.

Finalmente, la sequía de 2005 muestra un patrón bien definido entre zonas con valores positivos y negativos del índice. Las regiones en donde se observa menor precipitación abarcan primordialmente la costa oeste del país llegando a abarcar la mayor parte de la cuenca, así como el noreste del territorio. La región de la península de Yucatán y parte de la costa del golfo son las regiones en donde la sequía no está presente.

En la figura 3.6, se muestra la diferencia del SPEI-6 menos el SPI-6 en el mes de octubre, para cada evento. En esta figura se puede observar que en general las diferencias son pequeñas en todos los casos.

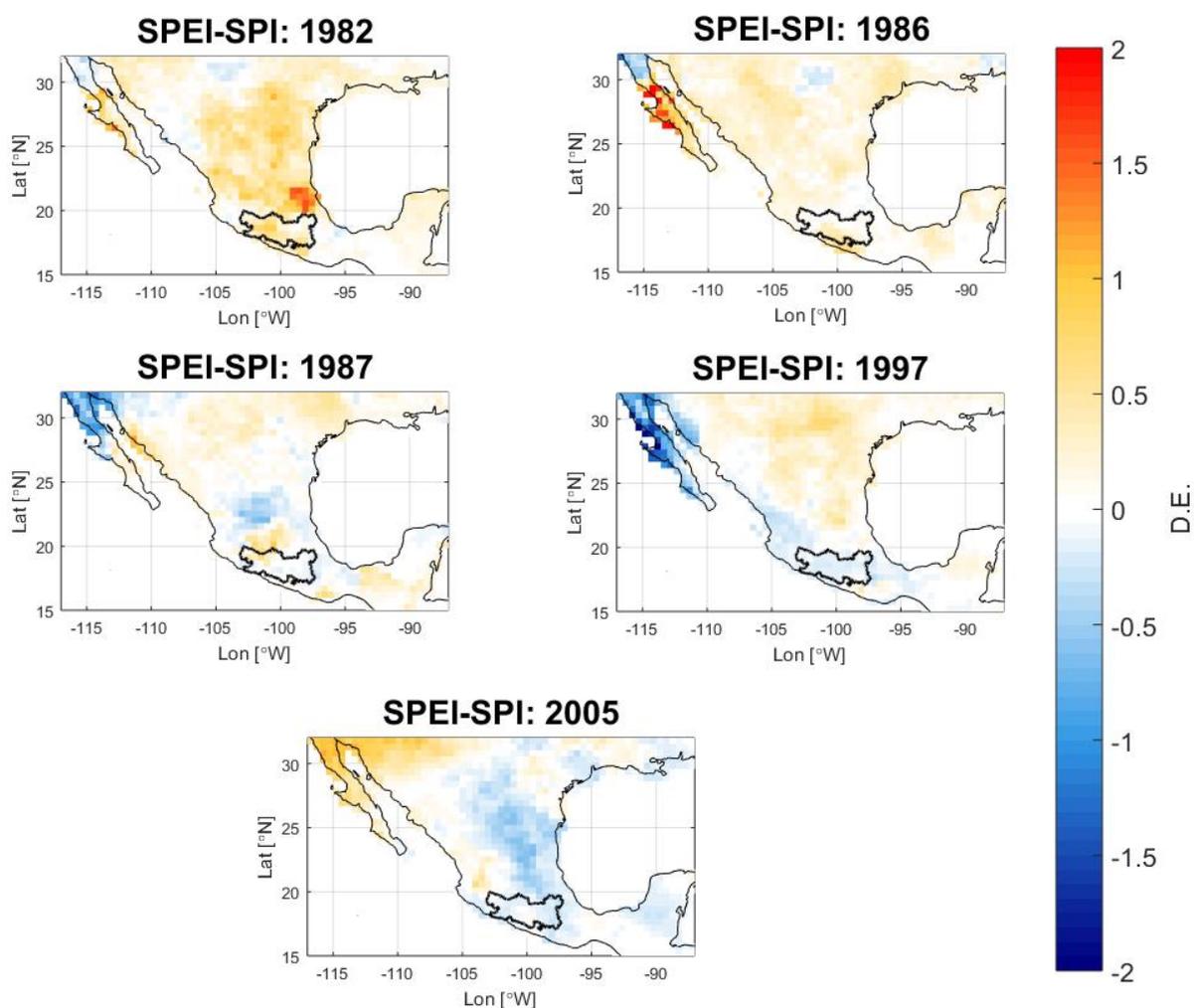


FIGURA 3.6: Diferencias de los índices SPEI-6 y SPI-6 para octubre de cada evento de sequía. Las diferencias son adimensionales

A nivel nacional, los eventos de 1982 y 1986 presentan anomalías mayoritariamente positivas, las cuales, son indicativo de que el SPEI-6 es menos intenso que el SPI-6. Los eventos de 1987 y 1997 presentan zonas positivas y negativas siendo éstas últimas ubicadas particularmente en el sector noroeste. Finalmente el evento de 2005 presenta mayoritariamente anomalías negativas sobre gran parte del territorio nacional lo que revela que el fenómeno no sólo destacó a escala regional.

La diferencia entre los índices SPEI y SPI indica el rol de la evapotranspiración en la modulación de la intensidad de las condiciones húmedas/secas. En las zonas en donde la diferencia es negativa, se puede inferir que hubo una demanda evaporativa atmosférica importante que exacerbó la sequía. Sin embargo, en regiones en donde la diferencia es positiva, ocurre que la magnitud de las condiciones secas según los déficit de precipitación acumulados es mayor que lo estimado según el SPEI; lo que sugiere que el SPI para caracterizar las condiciones húmedas/secas puede no ser el más adecuado si tenemos en cuenta el rol de la evapotranspiración en el contenido de la humedad del suelo y la propagación de las sequías.

Si nos fijamos específicamente en la región de estudio, es decir, la cuenca del Balsas podemos apreciar que durante las sequías de 1982 y 1986 la diferencia entre SPEI-6 y SPI-6 es ligeramente positivo, durante las sequías de 1997 y 2005 es ligeramente negativa y durante la sequía de 1987 esta diferencia es aproximadamente neutra. No obstante, las diferencias en todos los casos son muy reducidas, por lo que se podría concluir que, de forma aproximada SPEI y SPI en la escala de 6 meses son similares. En la siguiente sección se analizan estas diferencias desde un punto de vista de las posibles sequías meteorológicas que pudieran tener lugar durante estos eventos, es decir, con base en los índices de sequía con escala temporal de un mes.

3.3. El papel de la Precipitación

Como primera aproximación, para tratar de determinar la contribución de las anomalías de precipitación en los eventos de sequía, se comparan los índices SPEI-1 y SPI-1, así como las anomalías estandarizadas de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura, para cada mes que duró cada evento de sequía tomando como periodo base 1981-2010. Tanto los valores de los índices de sequía, como los de temperatura, ETP y precipitación se han promediado para la cuenca del Balsas. Estos resultados se muestran en las siguientes figuras.

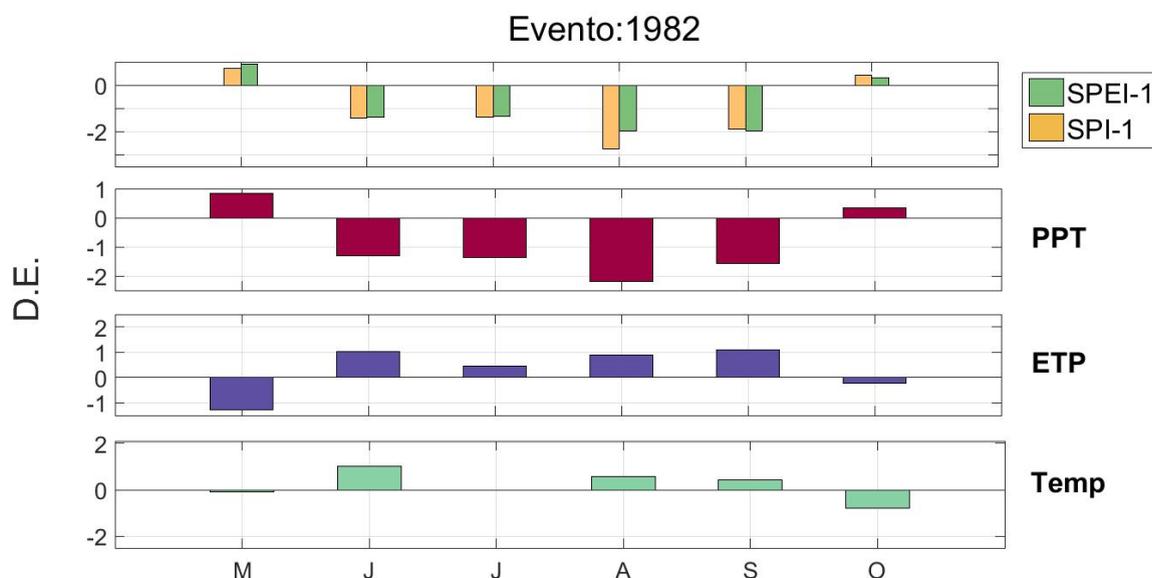


FIGURA 3.7: Valores para el evento de 1982 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)

En el evento de 1982 (figura 3.7) se presentó una sequía meteorológica de cuatro meses de duración, desde junio hasta septiembre, y con una severidad de -6.61 de acuerdo al índice SPEI-1. Durante estos cuatro meses, de forma general se presentaron anomalías negativas de precipitación. En cuanto a la evapotranspiración potencial, ésta muestra un comportamiento similar pero inverso al de la precipitación, teniendo

valores positivos desde junio hasta septiembre, comportamiento que va de la mano con las anomalías de temperatura. El mes de agosto fue el mes con mayor intensidad de la sequía o mes pico, que presentó valores de -2.0 y -2.7 para SPEI-1 y SPI-1 respectivamente. Las anomalías de precipitación durante este mes fueron las más negativas del periodo, y en cambio, la anomalía de la temperatura durante este mes es reducida.

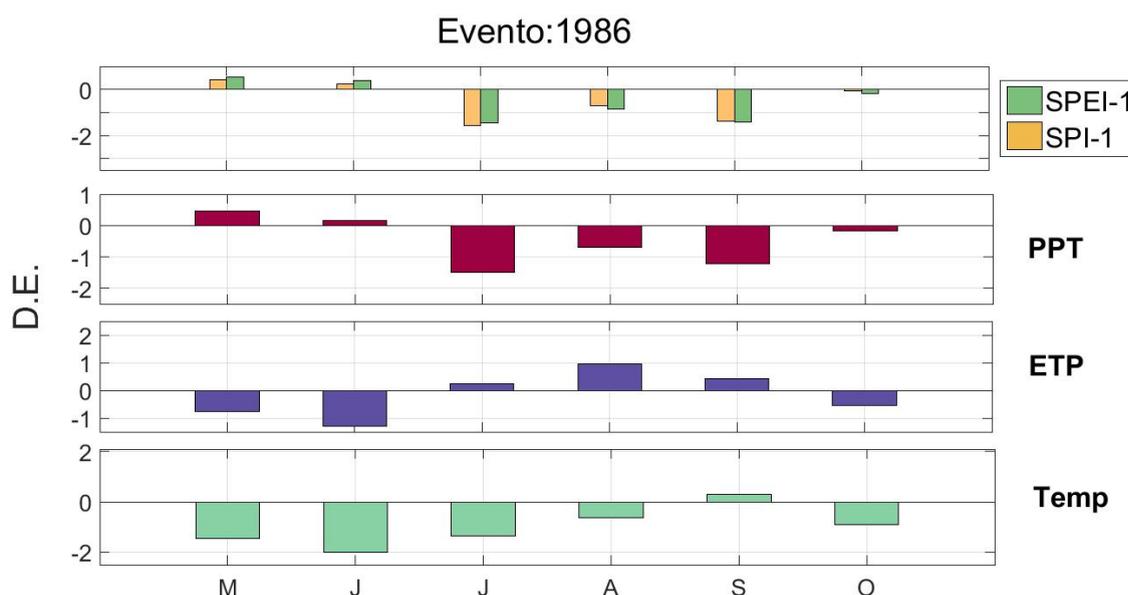


FIGURA 3.8: Valores para el evento de 1986 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)

Seguendo en 1986 (figura 3.8), se aprecia que durante este evento tuvieron lugar dos sequías meteorológicas de un mes de duración cada una. La primera en julio y la segunda en septiembre, con intensidades de -1.4 y -1.3 respectivamente de acuerdo con el índice SPEI-1. Además, durante el mes intermedio de agosto también se presentaron anomalías negativas de ambos índices de sequía, pero con valores más cercanos a lo normal. Durante el resto de los meses (mayo, junio y octubre) los valores fueron normales. En cuanto a precipitación, el valor más bajo se presenta en el mes de julio, que como se ha visto anteriormente es el mes pico, y se mantiene negativo hasta el

mes de octubre. Desde julio hasta septiembre las anomalías de ETP fueron positivas, pero muy reducidas. Se produjeron anomalías negativas de temperatura durante todo el periodo lluvioso, excepto durante el mes de septiembre. Cabe destacar que incluso durante julio se mantuvieron las anomalías negativas de temperatura.

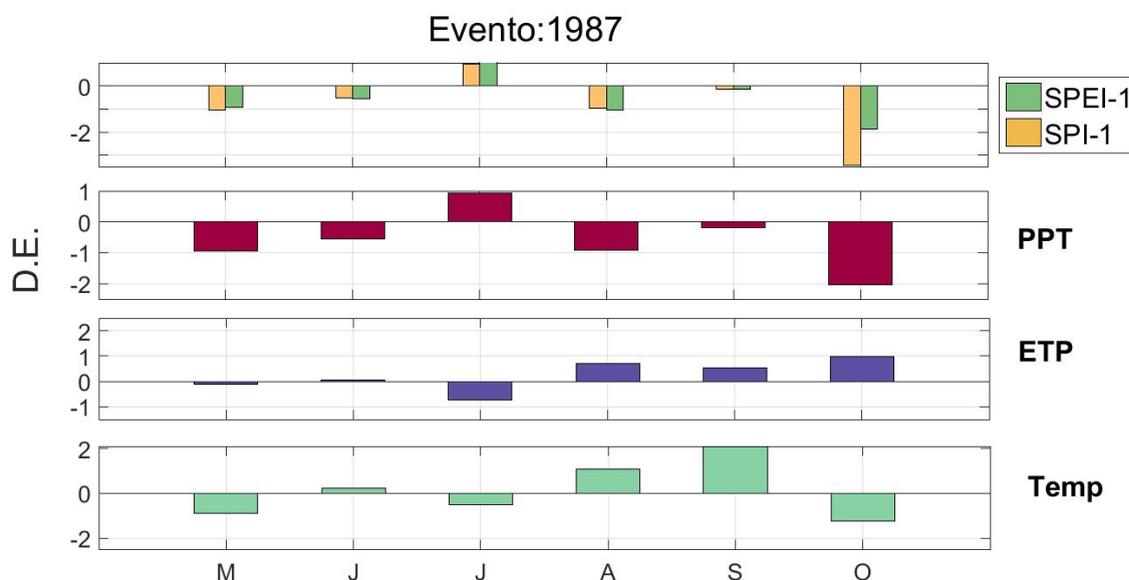


FIGURA 3.9: Valores para el evento de 1987 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)

El siguiente evento de sequía ocurre en 1987 (figura 3.9) y está caracterizado por poseer dos sequías meteorológicas, una moderada en el mes de julio y otra severa en octubre, ésta última extremadamente severa desde el punto de vista del SPI-1. No obstante, ambos índices de sequía son negativos para el resto de los meses, exceptuando el mes de julio, al igual que las anomalías de precipitación. Este evento posee la segunda anomalía negativa más intensa después de la de 1982, ocurriendo en el mes pico, octubre. La anomalía de ETP se mantiene positiva desde el mes de agosto hasta el fin de la sequía. En cuanto a temperatura, este evento presenta la anomalía positiva de temperatura más intensa en el mes de septiembre, aunque durante ese mes las

anomalías de precipitación y ETP son muy reducidas y los índices de sequía son normales.

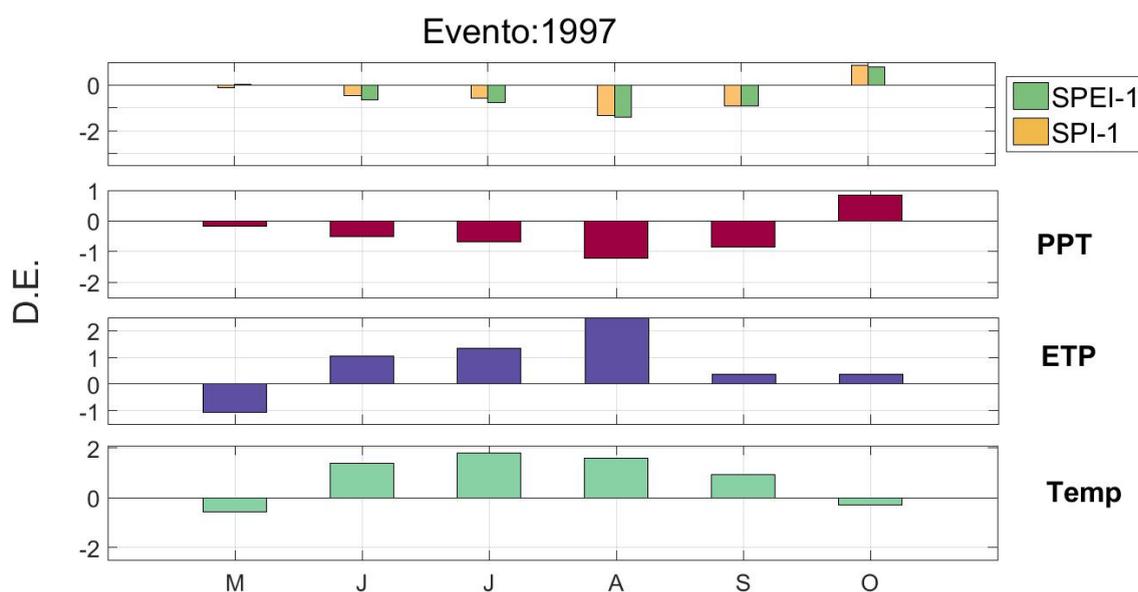


FIGURA 3.10: Valores para el evento de 1997 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU. Las anomalías se reportan en desviaciones estándar (D.E.)

Posteriormente, para la sequía de 1997 (figura 3.10) se presenta una sequía meteorológica moderadamente seca durante el mes de agosto. Desde mayo a septiembre los índices de sequía son negativos, pero en el resto de los meses son más cercanos a valores normales que en agosto. Las anomalías negativas de la precipitación comienzan en mayo y continúan hasta el mes de septiembre. En cuanto a ETP, este evento presenta anomalías positivas desde junio hasta octubre. El comportamiento de la temperatura es similar, sin embargo, las anomalías positivas se presentan desde junio hasta septiembre. Durante el mes de agosto que se produce la sequía meteorológica se encuentra la mayor anomalía negativa de precipitación así como las anomalías positivas más intensas de ETP y temperatura del evento.

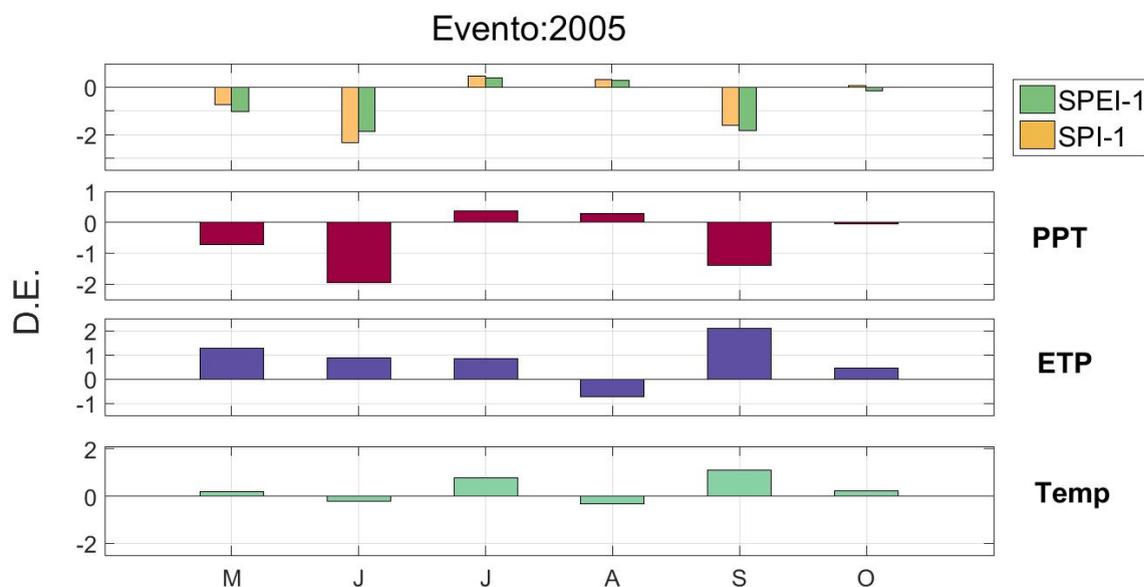


FIGURA 3.11: Valores para el evento de 2005 de SPEI-1 y SPI-1 y de las anomalías estandarizadas en el periodo de 1981-2010 (adimensionales) para precipitación (PPT), evapotranspiración potencial (ETP) y temperatura (Temp) de la base de datos CRU.

Finalmente, en la sequía de 2005 (figura 3.11), se aprecian dos sequías meteorológicas, la primera de dos meses de duración al principio de la temporada lluviosa (mayo y junio) con una severidad de -3.0 según el SPEI-1, y la segunda en septiembre, al final del periodo húmedo con una severidad de -1.9 también en función del mismo índice de sequía. Esta sequía comienza teniendo anomalías negativas de precipitación durante mayo y junio en donde presenta su pico, posteriormente se detiene por julio y agosto, pero regresa en septiembre, y octubre muestra una anomalía cercana a cero. En cuanto a ETP, presenta la segunda anomalía más intensa de todos los periodos en septiembre, la cual coincide con la anomalía positiva de temperatura más intensa para este evento.

A modo de resumen cabe mencionar que los eventos de sequía de 1982, 1986 y 1997 tienden a presentar sequías meteorológicas en la parte central de la estación húmeda. En cambio, los eventos de 1987 y 2005 muestran las mayores sequías meteorológicas al principio y al final del periodo lluvioso. En cualquier caso, todos los eventos presentaron anomalías negativas de precipitación en al menos cuatro de los seis meses que abarca la temporada húmeda, ya sean interrumpidos o continuos. Además, los valores del SPEI-1 y del SPI-1 en general son muy similares. En los casos en los que se presentan mayores diferencias, el valor absoluto del SPI-1 supera al del SPEI-1, por lo que se confirma la importancia del déficit de precipitación durante estos eventos.

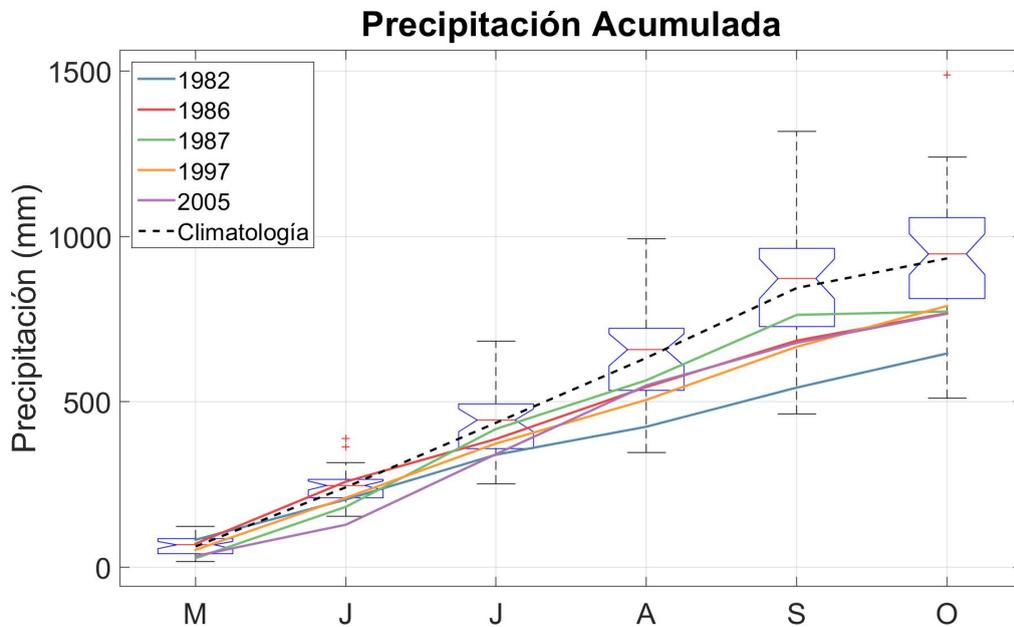


FIGURA 3.12: Precipitación acumulada para cada uno de los eventos comparada con la climatología acumulada en ese mismo periodo.

En la figura 3.12, se muestra la evolución de la precipitación acumulada para cada evento. Todos los eventos comienzan en mayo y terminan en octubre, y la climatología de la precipitación acumulada se muestra con la línea punteada.

Comenzando con el evento de 1982, éste comienza con precipitación por encima de la mediana, casi en el borde superior de la caja, posteriormente en junio baja hasta llegar al límite inferior de la caja, comportamiento que vuelve a repetir para el mes de julio, es en agosto en donde muestra una caída importante de precipitación, que hace que para los meses de septiembre y octubre caiga por debajo del límite inferior de la caja.

Al igual que el evento de 1982, el evento de 1986 comienza por encima del promedio en mayo, comportamiento que continúa para el mes de junio, sin embargo es en julio cuando la precipitación cae por debajo del promedio, continuando con esta tendencia en agosto llegando al límite inferior de la caja, siguiendo en septiembre la precipitación cae por debajo del límite inferior, aunque se recupera en octubre, el valor final cae por debajo del límite inferior de la caja.

En el evento de 1987, a diferencia de los dos anteriores, éste comienza cerca del límite inferior de la caja, ocurriendo lo mismo para el mes de junio, sin embargo en el mes de julio recupera precipitación, en agosto vuelve a bajar. Cabe mencionar que a pesar de que este evento presento los valores más altos de precipitación acumulada para los meses de julio, agosto y septiembre, en octubre el acumulado se mantuvo prácticamente igual, haciendo que el déficit para octubre haya sido similar al evento anterior.

Prosiguiendo con la sequía de 1997, ésta comienza por debajo de la climatología y mantiene este comportamiento en mayo, junio y julio, sin embargo en agosto es cuando queda por debajo del límite inferior, para el mes de septiembre se mantiene en esta misma situación pero al llegar a octubre recupera un poco de precipitación.

Finalmente el evento de 2005 comienza por debajo del límite inferior en mayo, sin embargo en junio presenta una disminución importante de precipitación quedando incluso como valor extremo. Sin embargo, para el mes de julio recupera precipitación, aunque sigue quedando por debajo del límite inferior, en agosto vuelve a aumentar la precipitación logrando quedar por encima del límite inferior, sin embargo para septiembre y octubre pierde precipitación quedando por debajo del límite inferior.

Al final del periodo de estudio, el evento que recibió menos precipitación acumulada en todo el periodo fue 1982, recibiendo un 69.1 % del total de la climatología, en segunda posición está el evento de 2005 con un total del 82.02 % de precipitación, en tercer lugar se encuentra la sequía de 1986 recibiendo un total del 82.11 %, el penúltimo lugar lo ocupan el evento de 1987 recibiendo un total del 82.80 %, finalmente el evento que recibió mayor precipitación fue el evento de 1997 con un total de 84.47 %. Por tanto, en todos los eventos se recibió menos del 85 % de la precipitación acumulada del valor promedio a largo plazo (1980 a 2017).

3.4. Transporte de Humedad hacia la cuenca del Balsas

Para entender mejor el origen de las anomalías de precipitación, se analizan las anomalías del transporte de humedad hacia la cuenca durante estos eventos.

3.4.1. Climatologías mensuales del transporte de humedad

A continuación se presentan las climatologías de las fuentes de humedad para cada mes del año en el periodo de 1980-2017. Se tomaron en cuenta las integrales de 1-10 días atrás en el tiempo. Adicionalmente se tomó el percentil 95 de cada mes y se graficaron los valores que estuvieran por encima de dicho valor.

- Enero

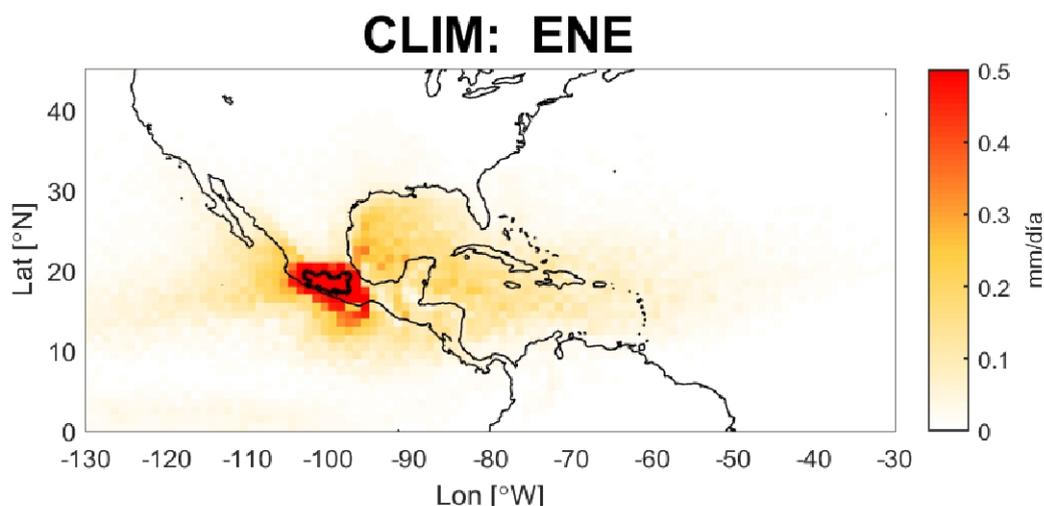


FIGURA 3.13: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para enero 1980-2017

En la figura 3.13 se muestra la climatología para enero, para este mes se pueden dividir las fuentes de humedad en cuatro regiones principales, siendo tres de ellas

oceánicas y una terrestre. Una de las fuentes oceánicas proviene del Pacífico, abarcando la costa oeste del país. La siguiente fuente proviene del golfo de México, la cual ocupa casi todo el golfo y se alarga hacia una parte del Caribe. La siguiente fuente se encuentra al sur de la cuenca cerca de la zona del Istmo de Tehuantepec. Finalmente la última región fuente de humedad es terrestre y proviene de la cuenca misma abarcando toda la zona y sus alrededores.

- Febrero

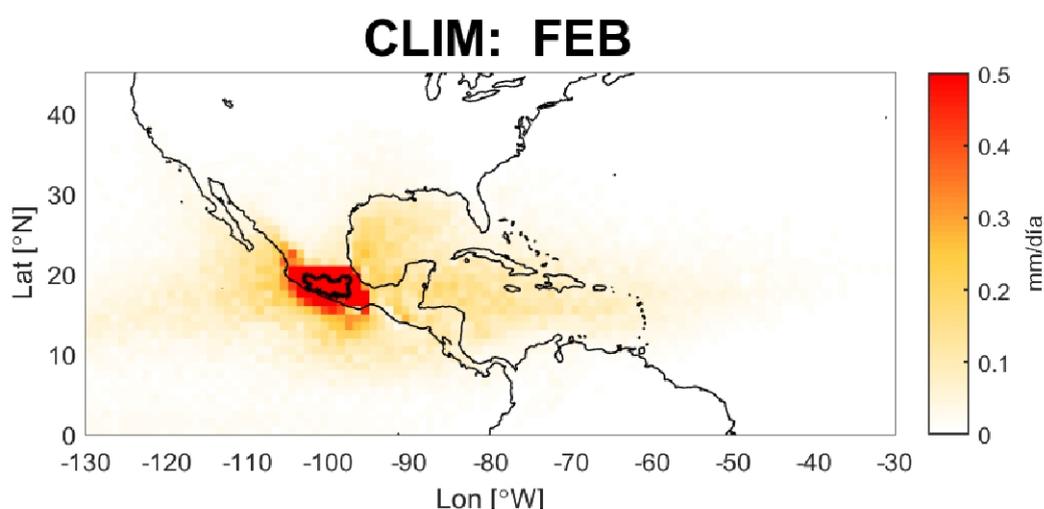


FIGURA 3.14: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para febrero 1980-2017

En la figura 3.14 se muestra la climatología para febrero, en ella se aprecian fuentes similares a las de enero. En la zona del golfo de México el aporte se debilita y la región fuente disminuye su tamaño. En la parte sur de la cuenca la fuente también disminuye y queda más localizada en la costa. El vapor de agua procedente de la zona terrestre sigue siendo muy importante abarcando más allá del área delimitada de la cuenca.

- Marzo

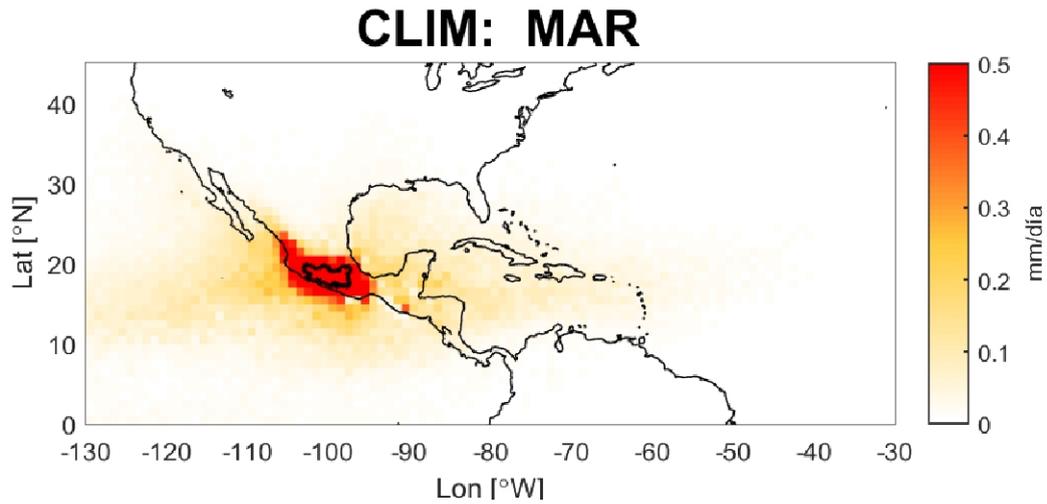


FIGURA 3.15: Valores de $(E-P)_{>0}$ para marzo 1980-2017.

Marzo se representa en la figura 3.15, este mes muestra fuentes semejantes a los meses anteriores, pero la fuente proveniente del Pacífico se extiende hacia al oeste intensificándose a lo largo de la costa de la cuenca. De la misma manera que ocurrió en febrero, en marzo la fuente proveniente del golfo de México se debilita, al igual que la humedad proveniente del sur de la cuenca. En cuanto a la contribución terrestre, ésta se extiende aún más, a alrededor de la cuenca que en febrero, indicando que las regiones adyacentes son más importantes.

- Abril

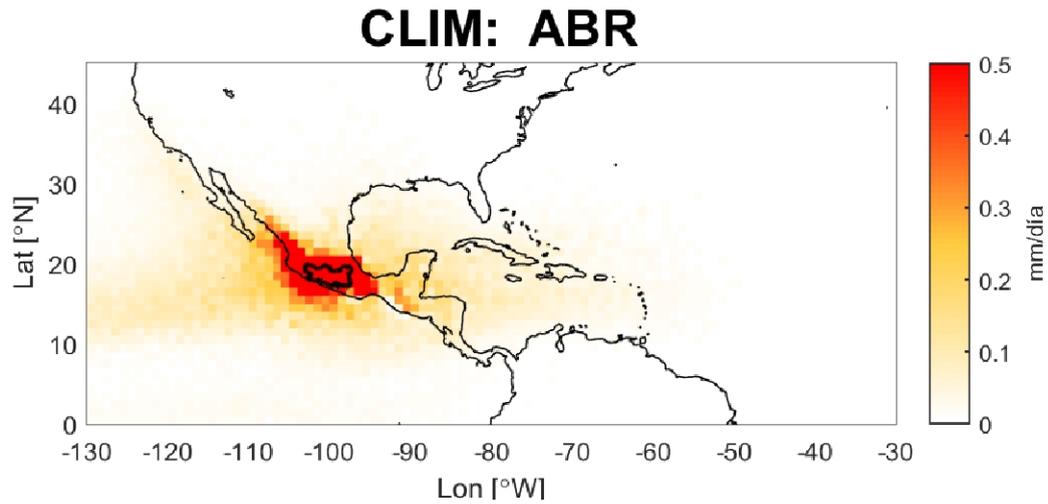


FIGURA 3.16: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para abril 1980-2017

En la figura 3.16, se muestran los promedios para abril, en donde la fuente proveniente del Pacífico se intensifica en la zona anexa a la costa. La fuente del golfo de México continúa debilitándose en toda el área. La fuente localizada al sur, deja de estar definida. La fuente terrestre se sigue extendiendo por buena parte de la zona centro del país más allá de la propia cuenca.

- Mayo

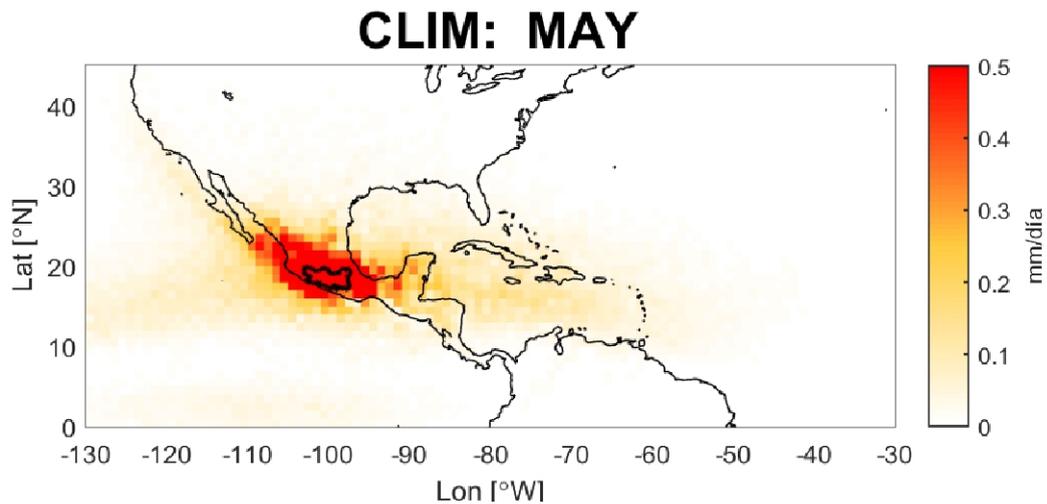
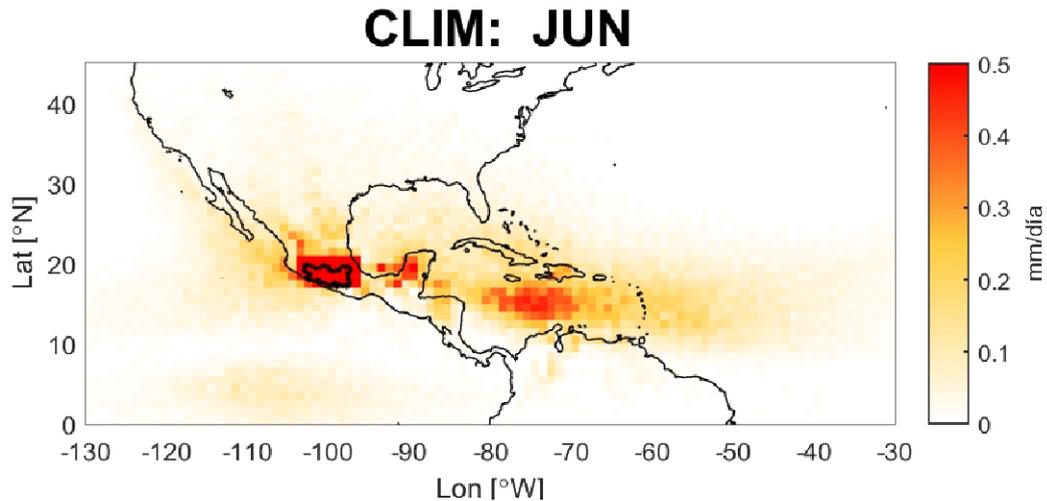


FIGURA 3.17: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para mayo 1980-2017

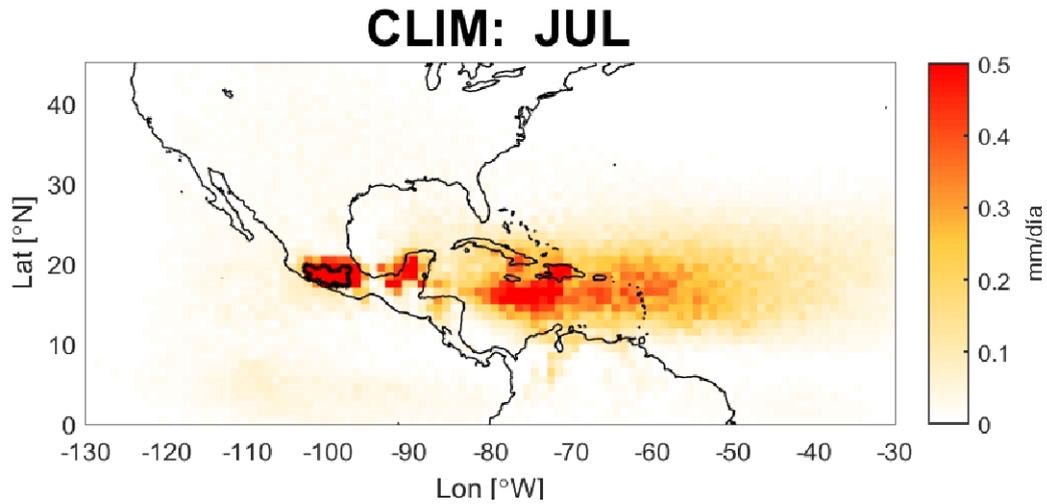
El mes de mayo es representado en la figura 3.17, en donde ocurre una diferenciación de dos ramas en la zona del pacífico, la que proviene del océano se vuelve más angosta que el mes anterior, y aparece otra rama localizada hacia la zona noroeste de la cuenca paralela a Baja California. En la parte del golfo de México, la fuente deja de abarcar todo el golfo y se comienza a localizar más en la zona del Caribe cerca de Yucatán. La fuente que se encontraba al sur de la cuenca deja de distinguirse. La fuente terrestre que incluye a la propia cuenca sigue extendiéndose un área importante en la zona centro.

■ Junio

FIGURA 3.18: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para junio 1980-2017

En la figura 3.18, se observa que en junio se presenta un cambio drástico a comparación de la progresión que había ocurrido en los meses anteriores. La fuente proveniente del Pacífico se debilita, tanto en la parte del océano como en la zona cercana a la costa oeste del país. Por la parte del Caribe se percibe una fuente definida entre el norte de Sudamérica y el sur de las Antillas, así como una pequeña parte de Yucatán. Al sur de la cuenca ya no hay una fuente definida, en cuanto a la fuente terrestre, deja de abarcar un área tan amplia de la zona centro y vuelve a estar más centrada en la propia cuenca.

■ Julio

FIGURA 3.19: Valores de $(E-P)_{\neq 0}$ para julio 1980-2017

El mes de julio se muestra en la figura 3.19, en este mes ya no hay presencia de la fuente de humedad del Pacífico. La única fuente notable es la proveniente del Caribe, la cual, a comparación del mes anterior es más intensa. En cuanto a la cuenca misma, la fuente de humedad disminuyó su área aún más a comparación del mes anterior, quedando más justa a los límites de la cuenca.

- Agosto

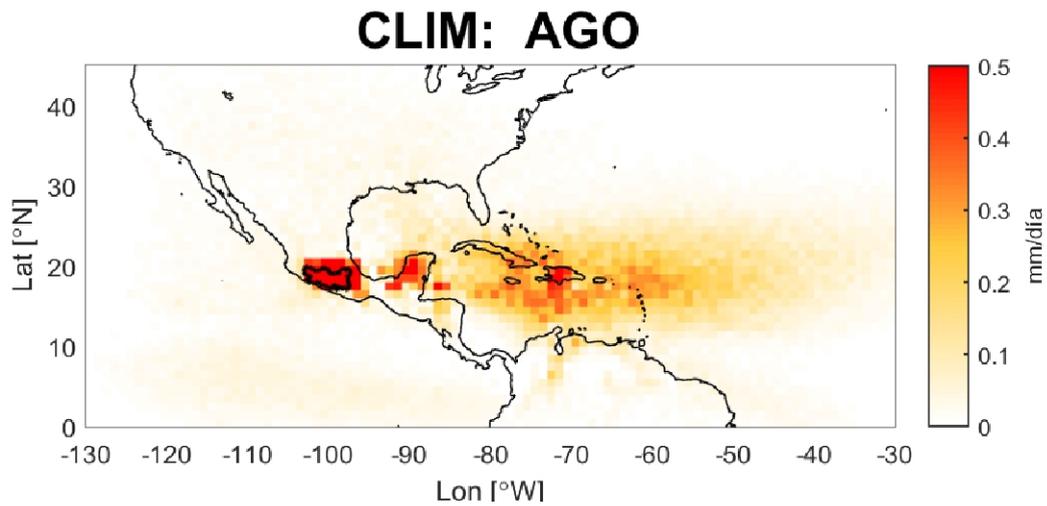


FIGURA 3.20: Valores de $(E-P)_{\leq 0}$ para agosto 1980-2017

En la figura 3.20, se muestra la climatología de agosto, en donde al igual que en julio, la única fuente de humedad notable es la que proviene del Caribe. Aunque, a comparación del mes anterior, es de menor tamaño. Por su parte la zona localizada en Yucatán sigue presente. La fuente terrestre vuelve a extenderse hacia el exterior de la propia cuenca aumentando su área a comparación del mes pasado.

- Septiembre

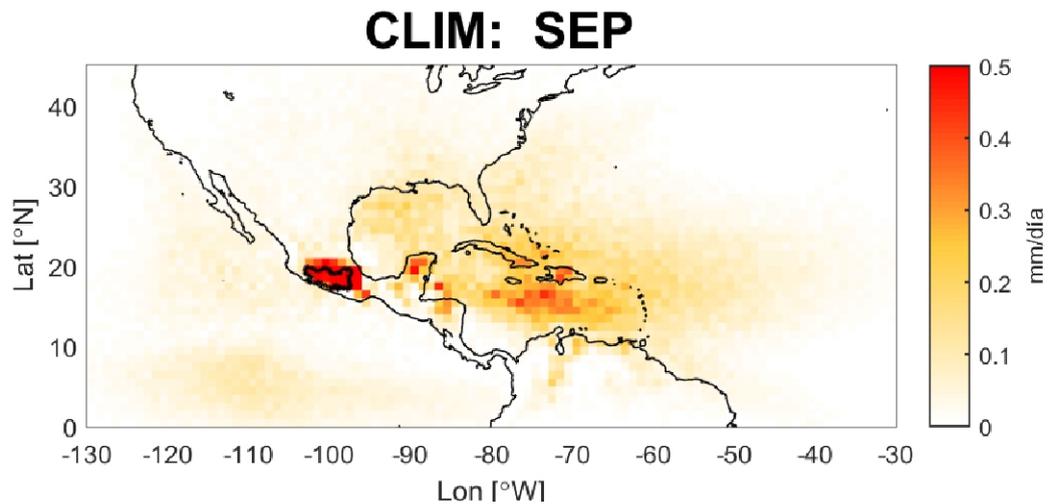
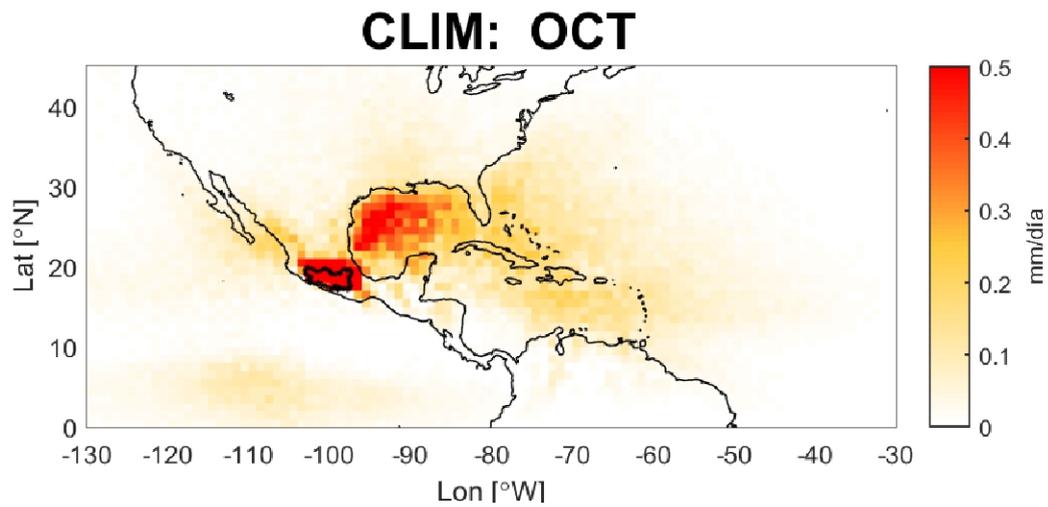


FIGURA 3.21: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para septiembre 1980-2017

Para septiembre en la figura 3.21, se observa que se la zona delimitada del Caribe que se había mantenido en los meses anteriores se debilita, al mismo tiempo, la zona del golfo de México comienza a ganar notoriedad a comparación de los meses anteriores. Así mismo, en el Pacífico comienza a haber señal de una fuente en dicha región, en el caso de la fuente proveniente de la cuenca, a pesar de que está cubriendo un área similar al mes anterior, ha disminuido su intensidad.

■ Octubre

FIGURA 3.22: Valores de $(E-P)_{\neq 0}$ para octubre 1980-2017

En la figura 3.22 se muestra octubre, en este mes ocurren cambios importantes, puesto que la fuente proveniente del Caribe se curva ya completamente hacia el golfo de México generando un mayor aporte desde la costa este del país. Hay un aumento de humedad por la costa oeste del país aunque son de orden menor a comparación de la fuente del golfo. En cuanto a la cuenca misma, vuelve a ganar intensidad a comparación del mes anterior.

- Noviembre

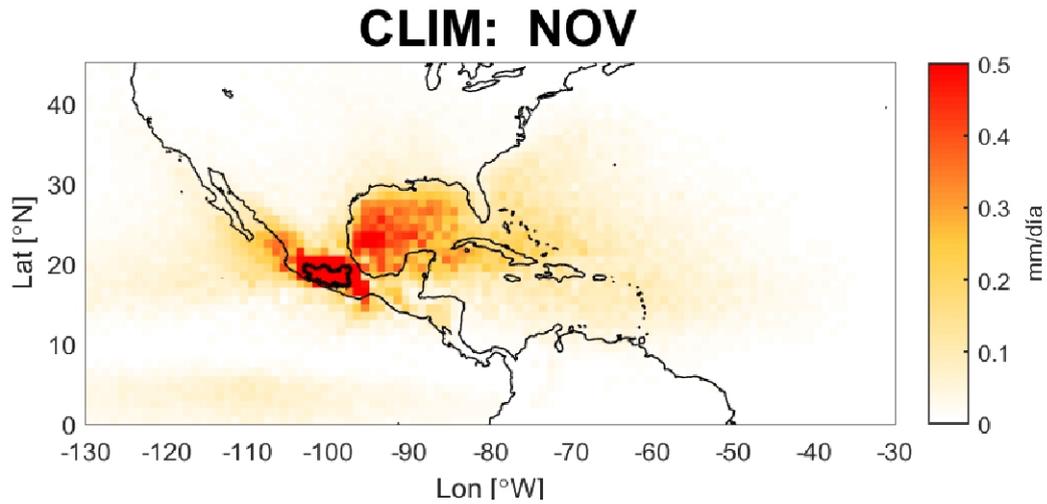


FIGURA 3.23: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para noviembre 1980-2017

Para noviembre, en la figura 3.23 se aprecia que la fuente proveniente de la costa oeste comienza a aumentar su tamaño, aportando más humedad para la zona noroeste de la cuenca. En cuanto a la fuente del golfo de México, ésta amplía su área abarcando casi por completo el golfo. Comienza a aparecer una fuente al sur de la cuenca, cerca del Istmo de Tehuantepec. Finalmente la fuente de la cuenca misma sigue manteniendo su intensidad.

- Diciembre

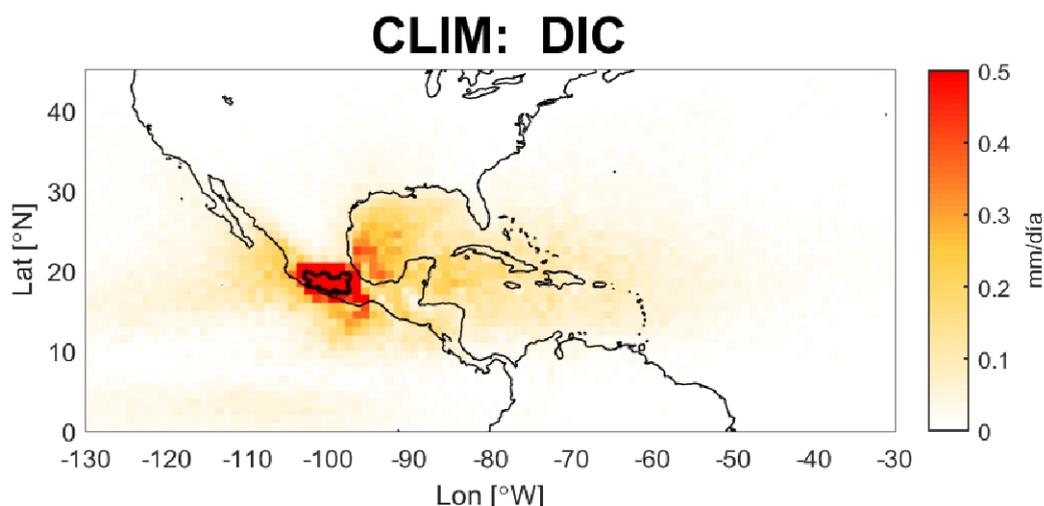


FIGURA 3.24: Valores de $(E-P)_{\geq 0}$ para diciembre 1980-2017

Finalmente en la figura 3.24 se muestra diciembre, la fuente proveniente del golfo de México se debilita y disminuye su área. La fuente de la zona del Pacífico aumenta su área con respecto al mes anterior. La fuente ubicada en la zona sur de la cuenca se define más y comienza abarcar un área mayor. En cuanto a la cuenca misma, sigue aportando una gran cantidad de humedad.

Cabe mencionar que el patrón en la región del Caribe, en donde se observa una señal clara de aporte de humedad en los meses de junio, julio y agosto mostrado en las figuras 3.18, 3.19 y 3.20 respectivamente, concuerdan con los estudios de Muñoz et al. (2008) y Wang (2007). En estos estudios, mencionan que en estos meses la corriente de chorro de bajo nivel del Caribe presenta un pico de intensidad. Dicho pico se ubica justamente en la región que las figuras muestran, es decir al sur de las Antillas y norte de Sudamérica. Este comportamiento es explicado debido a un gradiente de temperatura provocado entre la orografía de ambas zonas y el mar Caribe.

3.4.2. Cuantificación del transporte de humedad

La determinación de las regiones fuente de área fija permite realizar integrales de área de los flujos de humedad desde cada una de las regiones. Para determinar estas áreas fijas, se han considerado las zonas que superan el percentil 95 del promedio estacional de $(E-P) \neq 0$ para la temporada lluviosa (mayo a octubre).

En función del resultado obtenido se han seleccionado para su análisis siete regiones fuente de humedad que se presentan en la figura 3.25. Las regiones se han definido sobre una malla de $1^\circ \times 1^\circ$ de resolución con objeto de compatibilizarla con el modelo de dispersión.

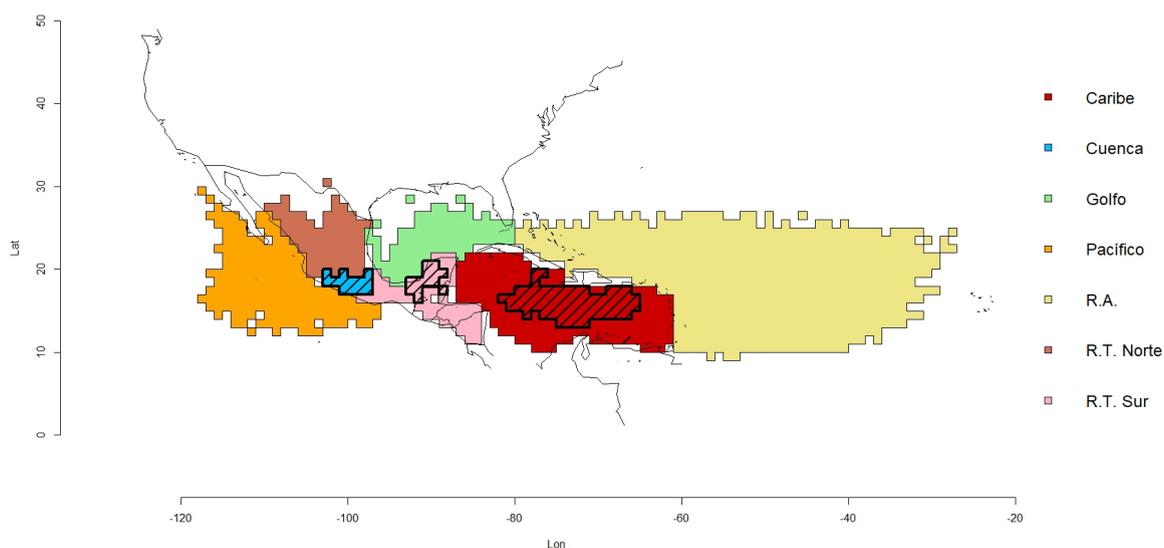


FIGURA 3.25: Regiones fuente de humedad para la región de estudio en colores. Las zonas marcadas con líneas son las regiones que superan el percentil 99.5.

- Región Caribe : Ubicada en la zona del mar Caribe.
- Región Cuenca: Abarca únicamente la región de estudio.
- Región Golfo: Ubicada sobre parte del golfo de México.
- Región Pacífico: Ubicada en el Océano Pacífico, cerca de las costas del país.
- Región Resto del Atlántico: Porción correspondiente a el resto del Océano Atlántico.
- Región Terrestre Norte: Abarca la porción terrestre al norte de la cuenca, lo que comprende parte de los estados centro-norte del país.
- Región Terrestre Sur: Abarca la porción terrestre ubicada al sur de la cuenca, comprendiendo la parte sur del país y porción de Centroamérica.

En la figura 3.26, se muestran los valores de las integrales de área en promedio mensual desde los días -1 a -10 para cada una de las regiones listadas anteriormente, en el periodo de mayo a octubre.

Se observa que la cuenca misma representa por mucho la fuente más importante, seguido de las regiones: Caribe y regiones terrestres sur y norte. En el caso de las primeras dos, están íntimamente relacionadas puesto que la humedad del Caribe atraviesa parte del sur de México. La región terrestre sur se mantiene prácticamente constante de junio a octubre, mientras que el Caribe tiene su valor mínimo en mayo, alcanza su pico en julio y gradualmente disminuye, concordando con lo obtenido y anteriormente descrito en la figura 3.19. En el caso de la región terrestre norte, comienza en su máximo como se observa en la figura 3.17 y disminuye hasta alcanzar un mínimo en el mes de julio, posteriormente vuelve a aumentar progresivamente.

A estas fuentes le siguen las regiones pacífico, golfo y resto del Atlántico, en donde la primera presenta su máximo en mayo similar a la región terrestre norte y disminuye continuamente hasta agosto. La segunda presenta un comportamiento similar pero comienza a aumentar a partir de julio finalizando con su máximo en octubre como se observa en la figura 3.22. Finalmente el resto del Atlántico tiene su mínimo en mayo (figura 3.17) y aumenta hasta julio (figura 3.19) en donde posteriormente disminuye.

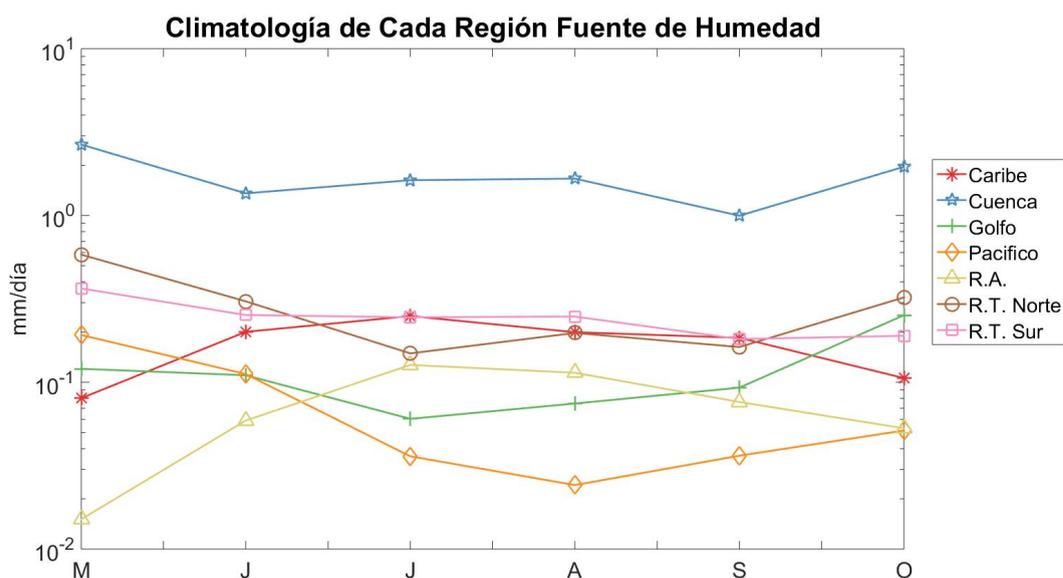


FIGURA 3.26: Climatología mensual de las integrales de área de $(E-P)_{\geq 0}$ para cada región fuente de humedad en el periodo de estudio (1980-2017).

En la figura 3.27, se muestran las anomalías estandarizadas acumuladas de las regiones que se obtuvieron con el percentil 99.5 de la climatología de mayo a octubre mostradas en la figura 3.25. Dichas regiones son la cuenca, Caribe y región terrestre sur.

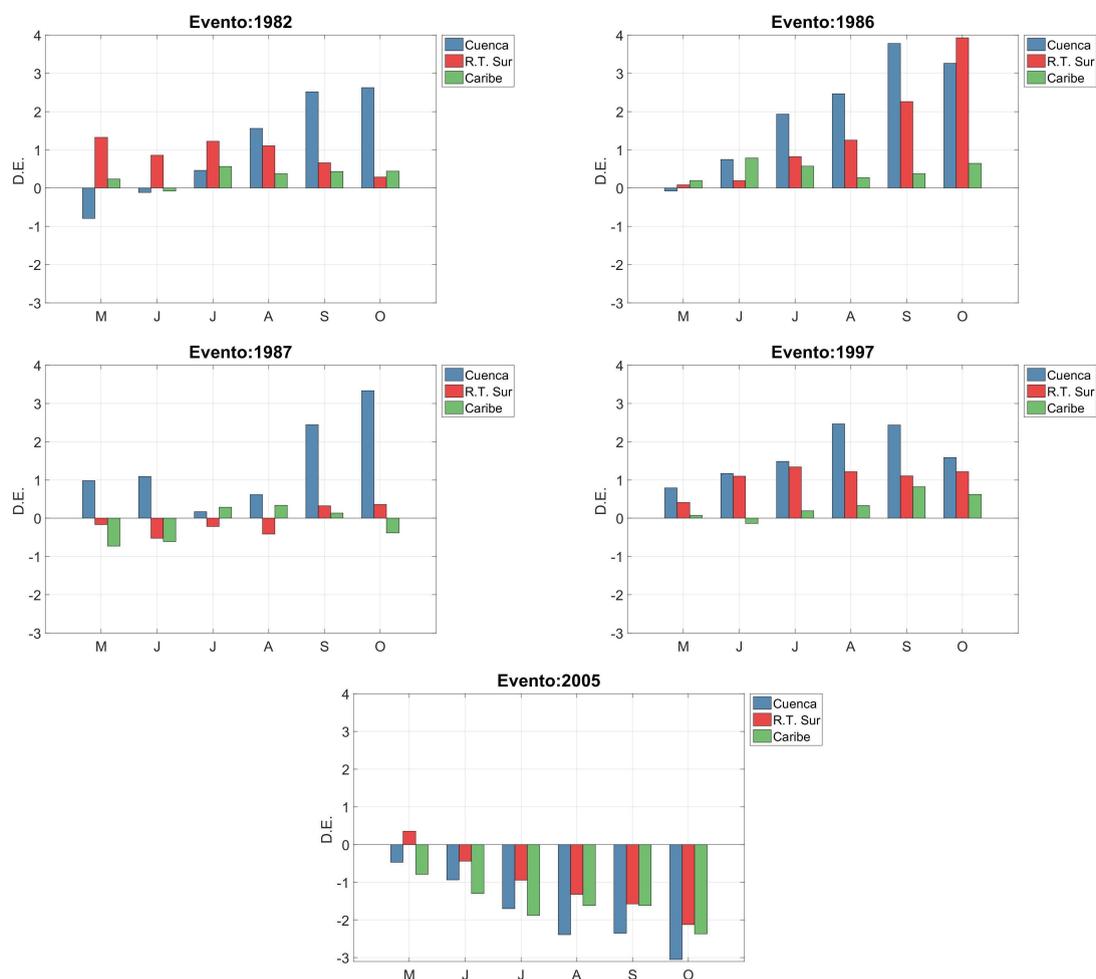


FIGURA 3.27: Anomalías estandarizadas acumuladas de $(E-P)_{\geq 0}$ para las regiones obtenidas con el percentil 95. La estandarización fue con base en el periodo de 1981 - 2010.

Para el evento de 1982 se observa que las anomalías son mayoritariamente positivas en las tres regiones, siendo las de la cuenca las más grandes, seguida de la región terrestre sur y las más pequeñas pertenecen a la región del Caribe.

Siguiendo al evento de 1986, éste evento posee el mayor acumulado positivo en la región terrestre sur, en el caso de la cuenca ésta es constantemente positiva llegando a su máximo en septiembre. En cuanto a la zona del Caribe, posee los valores más bajos pero son constantemente positivos a lo largo de todo el periodo.

Para la sequía de 1987, la región de la cuenca tiene dos máximos, uno en los meses de mayo-junio y otro en los meses de septiembre-octubre, sin embargo en general todos son constantemente positivos a lo largo del todo el periodo. Para la región Caribe los primeros dos meses presenta anomalías negativas, posteriormente se vuelve positivo para el periodo de julio a septiembre y finaliza con una anomalía negativa en octubre.

Prosiguiendo al año de 1997, las anomalías de la cuenca son constantemente positivas y poseen su máximo en el mes de agosto donde posteriormente disminuyen. En el caso de la región terrestre sur al igual que la cuenca es constantemente positiva y posee su pico en julio. Finalmente la región Caribe presenta las anomalías más pequeñas las cuales a partir de julio son constantemente positivas.

Finalmente el evento de 2005, es el único que presenta constantemente anomalías negativas (a excepción de mayo en la región terrestre sur). Al finalizar el periodo de precipitación, la anomalía más intensa la presenta la cuenca seguida del Caribe y finalmente la región terrestre sur.

En resumen, los eventos de 1982, 1986 y 1997 presentan en la mayor parte del periodo de estudio anomalías positivas en las tres regiones, siendo las dos más intensas la cuenca y la región terrestre sur. El evento de 1987 presenta las anomalías más intensas en la cuenca misma, mientras que la región terrestre sur y Caribe son más pequeñas y oscilan entre valores positivos y negativos. Finalmente el evento del 2005, presenta constantemente anomalías negativas durante todo el periodo.

3.5. Circulación atmosférica

Existe una considerable variabilidad intermensual de la circulación atmosférica en la zona del centro y sur de México desde mayo a octubre. En la presente sección se muestran las anomalías estandarizadas de altura geopotencial a 500 hPa (sombreado) y de presión a nivel del mar (líneas) para los meses pico de cada evento. Adicionalmente, en el apéndice B se muestran las anomalías para cada mes de cada evento. En los mapas presentados los tonos amarillos-naranjas corresponden a anomalías positivas de geopotencial y los tonos azules representan anomalías negativas (adimensionales). Las anomalías se han calculado con respecto a la climatología de 1981-2010 para cada mes.

- Agosto de 1982:

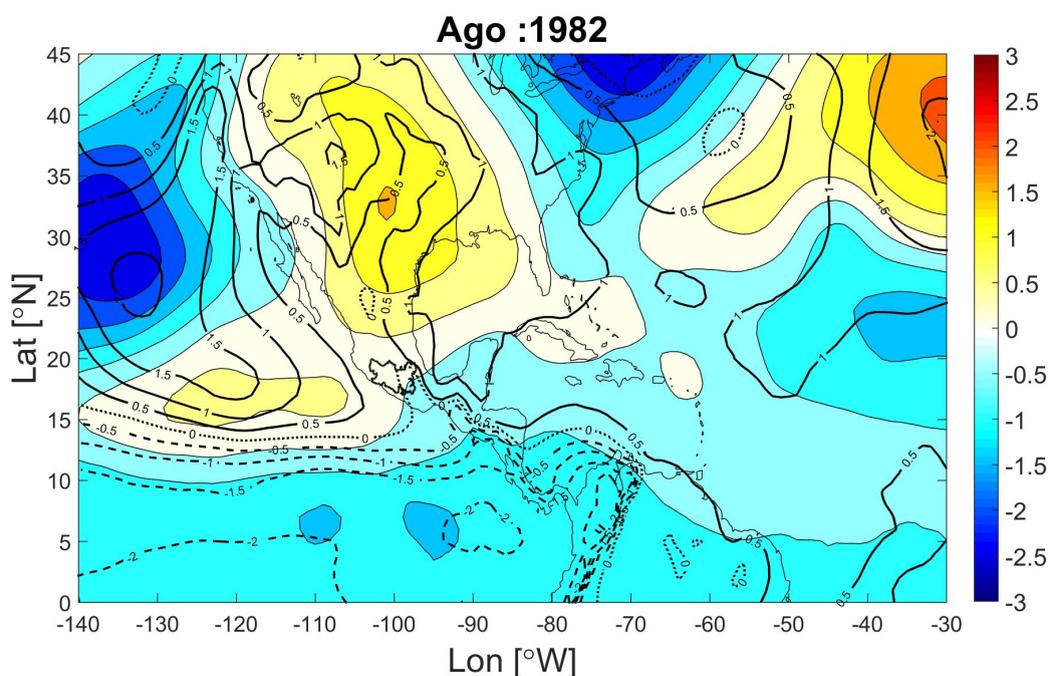


FIGURA 3.28: Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isólinas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para agosto de 1982.

Para este evento, el mes pico fue agosto mostrado en la figura 3.28. En este mes se observa que hay una ligera anomalía positiva de altura geopotencial sobre gran parte del territorio mexicano. Sin embargo, en la región de la península de Yucatán y parte de la península de Baja California dicha alta presión anómala no presenta influencia. Las anomalías de presión a nivel del mar siguen un patrón similar a las de geopotencial, mostrando anomalías positivas en la costa del Pacífico y sobre parte del territorio mexicano. Esto quiere decir que el patrón de alta presión presente, es lo suficientemente estable a lo largo de la columna atmosférica.

- Julio de 1986:

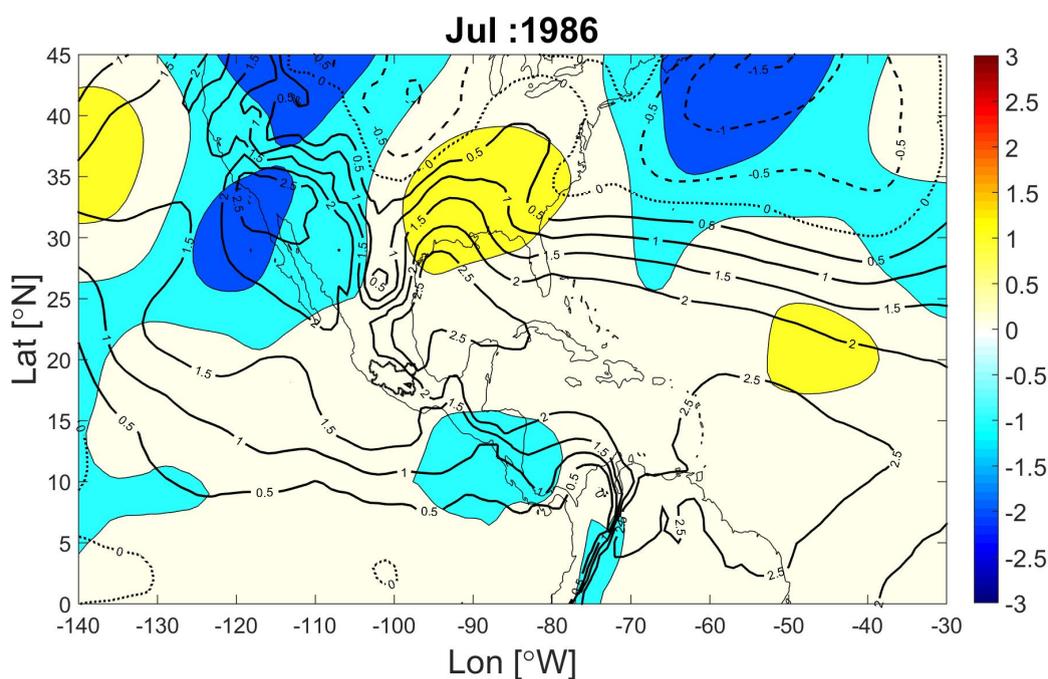


FIGURA 3.29: Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para julio de 1986.

El mes pico para la sequía de 1986 se muestra en la figura 3.29. En ella se observa que en la troposfera media hay una ligera anomalía positiva de presión sobre gran parte del territorio con excepción de la porción noroeste. Comparando con

las anomalías de presión a nivel del mar, la estructura no es tan clara como en el caso de 1982. La presencia de la baja presión al noroeste del territorio sugiere que en esa región no se presente sequía.

- Octubre de 1987:

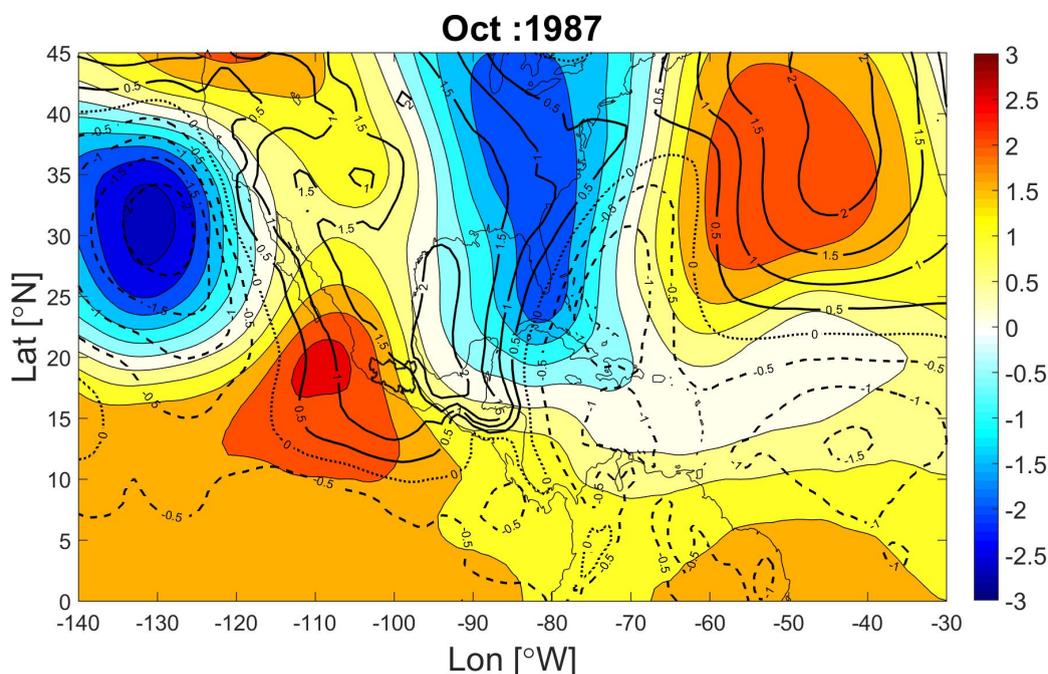


FIGURA 3.30: Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para octubre de 1987.

Octubre es el mes pico para la sequía de 1987, en este caso se presentan anomalías positivas del campo de geopotencial a 500 hPa, que cubre una gran parte del territorio mexicano, exceptuando la punta extrema de la península de Yucatán. Este patrón se dio debido a la presencia de dos vaguadas que dan lugar a la dorsal inducida. La configuración mostrada para este mes concuerda con la presencia de la sequía más intensa a lo largo de la costa oeste del territorio. Los contornos de anomalías de presión a nivel del mar, coinciden también con los patrones presentes en altura.

- Agosto de 1997

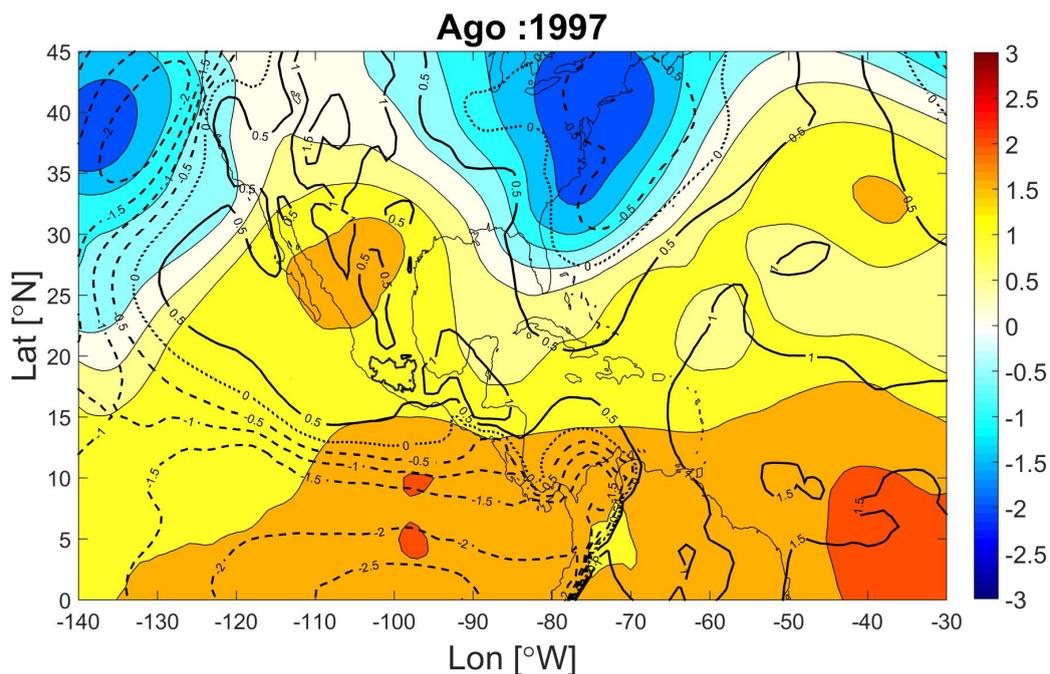


FIGURA 3.31: Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para agosto de 1997.

Al igual que el evento de 1982, la sequía de 1997 presenta su mes pico en agosto. En este caso ocurre una situación similar a la de 1987, en donde hay dos bajas presiones anómalas y a los lados dos altas presiones. Si bien la alta presión anómala se presenta en la mayor parte del territorio, presenta su máximo al noroeste del mismo. Los contornos de anomalías de presión nivel del mar, muestran también un patrón similar al presente en altura, mostrando anomalías positivas de presión en la mayor parte del territorio.

- Junio de 2005

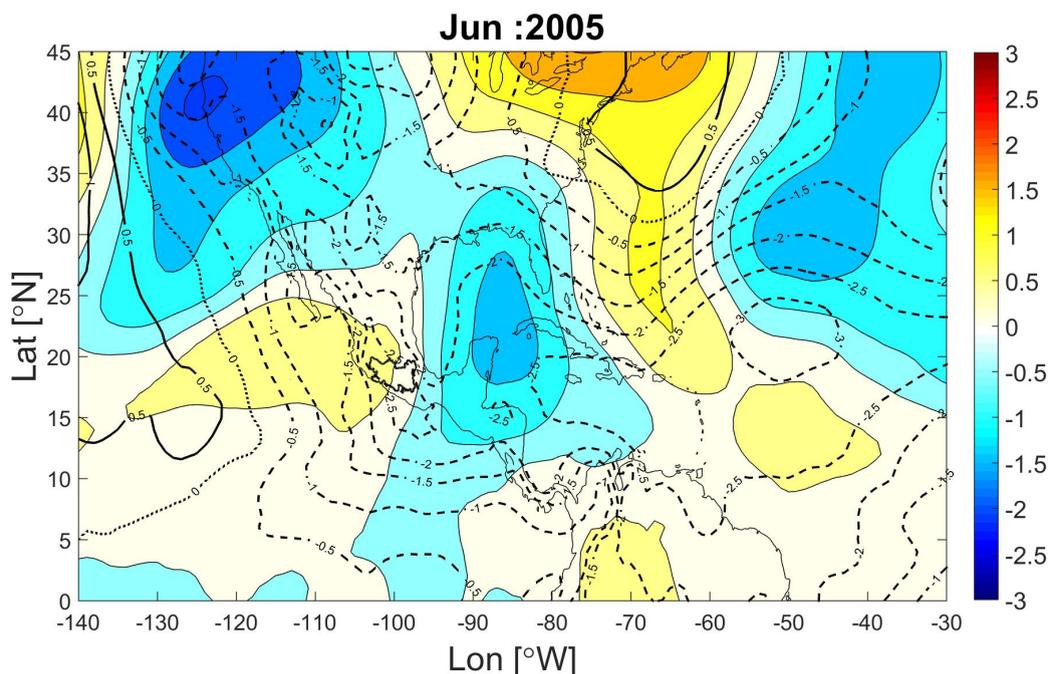


FIGURA 3.32: Se muestran con áreas sombreadas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de altura geopotencial en 500 hPa y con isolíneas las anomalías estandarizadas (adimensionales) de presión a nivel del mar para junio de 2005.

El último evento es el de 2005, el cual tiene su mes pico en junio. Para este mes, se presentan en el nivel de 500 hPa dos bajas presiones anómalas ubicadas en el extremo noroeste del país y en la península de Yucatán. En el resto del territorio incluyendo la cuenca del Balsas se encuentra la presencia de una ligera alta presión anómala. Adicionalmente, los contornos de anomalías de presión a nivel del mar en general muestran valores negativos en todo el territorio por lo que la estructura vertical de las presiones anómalas no logra ser tan estable como en los otros cuatro casos.

En resumen, los eventos de 1982 y 1986 presentan anomalías de altura geopotencial prácticamente neutras sobre la región de estudio. En las sequías de 1987 y 1997 en la troposfera media existen altas presiones localizadas encima de la cuenca, mientras que a nivel del mar hay altas presiones sobre el golfo de México lo que favorece una

circulación anticiclónica así como advección de humedad en la parte sur hacia el Balsas. Finalmente el evento de 2005 es diferente en altura y superficie. En la troposfera media no hay una anomalía importante sobre la región de estudio mientras que en superficie hay una circulación ciclónica en el golfo por lo que llega menos humedad a la cuenca.

3.5.1. Análisis de estabilidad en la cuenca

Con el fin de tratar de explicar la razón por la que hay una inhibición de la convección en la región de estudio, a continuación se muestran las anomalías estandarizadas de la velocidad vertical (Ω) del viento a 500 hPa, así como de la energía potencial convectiva disponible (CAPE, por sus siglas en inglés). Adicionalmente se graficaron los valores de SPEI-1 y SPI-1 con el objetivo de comparar.

Cabe mencionar que valores negativos de Ω están asociados a movimientos de ascenso mientras que valores positivos están relacionados a movimientos de descenso. Valores altos de CAPE son indicativos de una alta inestabilidad atmosférica y mayor potencial para generar convección.

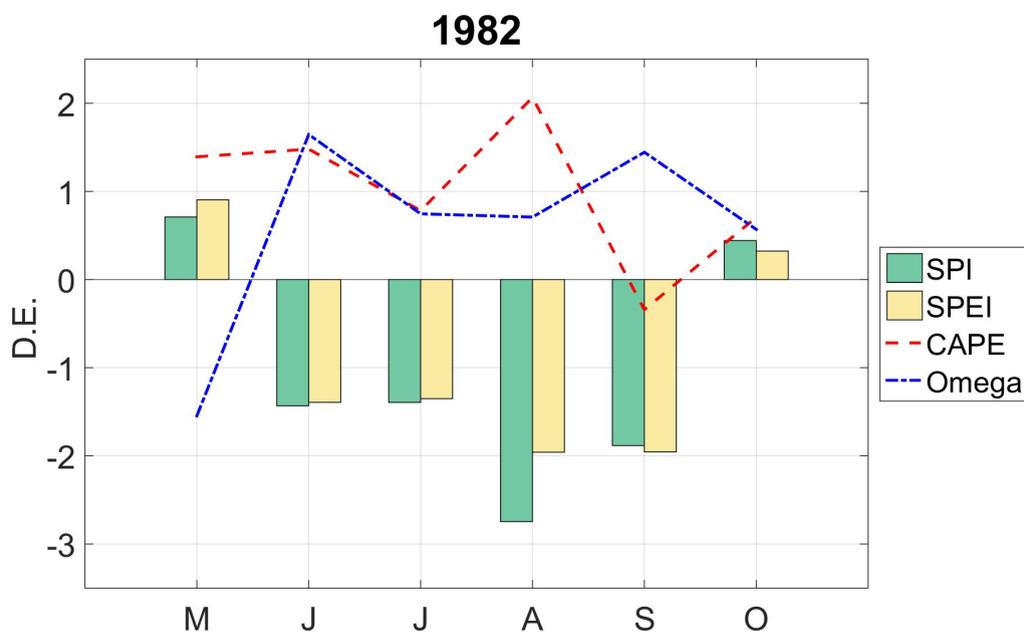


FIGURA 3.33: Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul).

En la figura 3.33, se muestra el comportamiento de CAPE y Omega durante la sequía de 1982. Al comienzo y final de el evento no hay presencia de sequía. Coincidiendo con dicho comportamiento en mayo es el único mes que presenta una anomalía negativa de Omega, los demás meses constantemente presentan anomalías positivas. Si bien en el mes pico la anomalía de Omega no es la más intensa, de CAPE sí lo es, indicando aunque condiciones favorables para la precipitación, la alta presión mostrada en la figura 3.28, evita que haya procesos de convección.

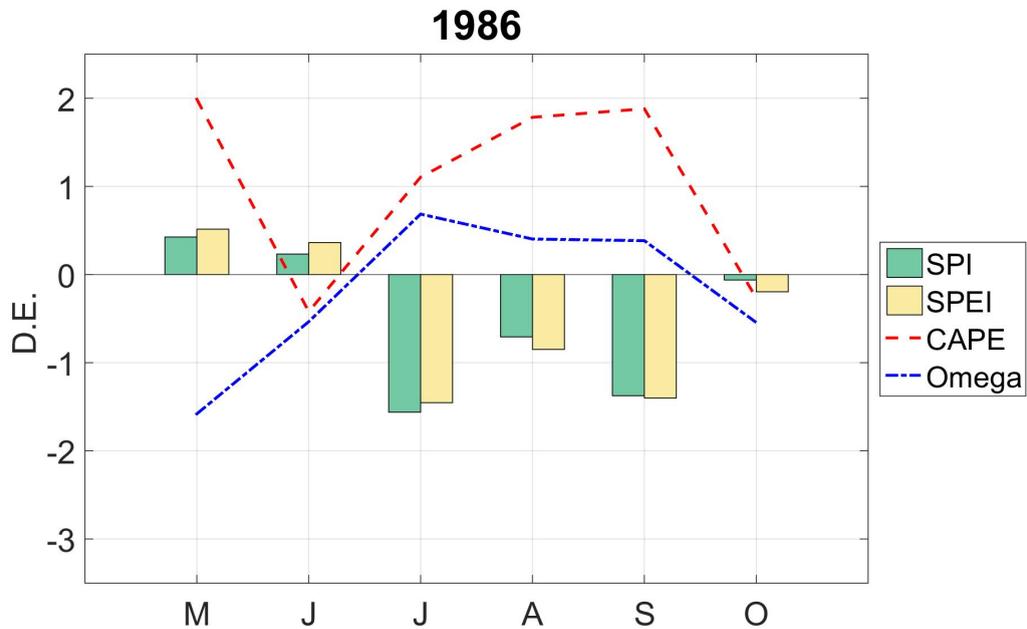


FIGURA 3.34: Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul).

Para el evento de 1986, éste no muestra sequía en los primeros de meses del periodo, sin embargo para los últimos cuatro sí. En el mes pico, se obtiene la mayor anomalía de Omega, y un valor positivo de CAPE, sin embargo, el valor más intenso lo presenta para el mes de septiembre.

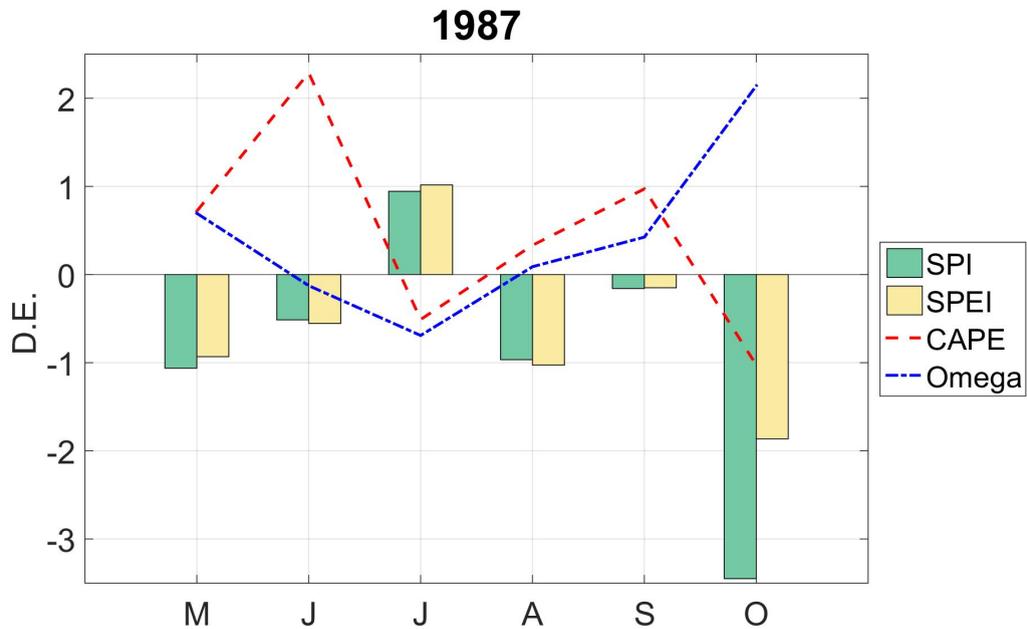


FIGURA 3.35: Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul).

La sequía de 1987, es la única que presenta su pico en octubre, en donde adicionalmente el SPI es más intenso que el SPEI. Ésta sequía se interrumpe solamente en el mes de julio, en donde presenta la mayor anomalía negativa de Omega, indicando un movimiento de ascenso. En el caso de octubre, se presenta la anomalía negativa más intensa de CAPE, así como la anomalía positiva más intensa de Omega, esto quiere decir que aunado a un movimiento de descenso relacionado a la presencia de la alta presión mostrada en la figura 3.30, hay una poca disponibilidad de energía para la convección.

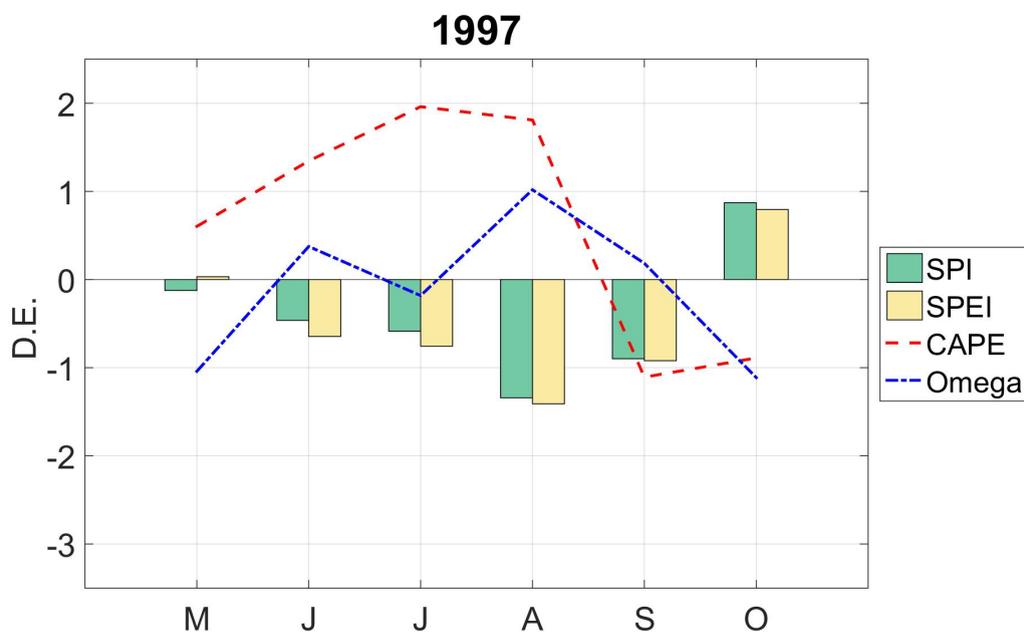


FIGURA 3.36: Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul).

La sequía de 1997 comienza desde mayo se intensifica hasta llegar a su mes pico que es agosto, y para octubre se interrumpe. A lo largo del periodo de estudio hay mayoritariamente anomalías positivas de CAPE desde mayo a junio, sin embargo en septiembre y octubre cambian su comportamiento. A diferencia de los valores de CAPE, los valores de Omega varían más a lo largo del periodo de sequía, sin embargo en el mes pico de la sequía se obtiene la mayor anomalía positiva de Omega concordando con la presencia de la alta presión mostrada en la figura 3.31, de la misma manera, en octubre donde se interrumpe la sequía se obtiene la anomalía negativa más intensa de Omega de todo el periodo, concordando con la presencia de una baja presión que ocupa la mayor parte del territorio la cual se observa en la figura B.3.

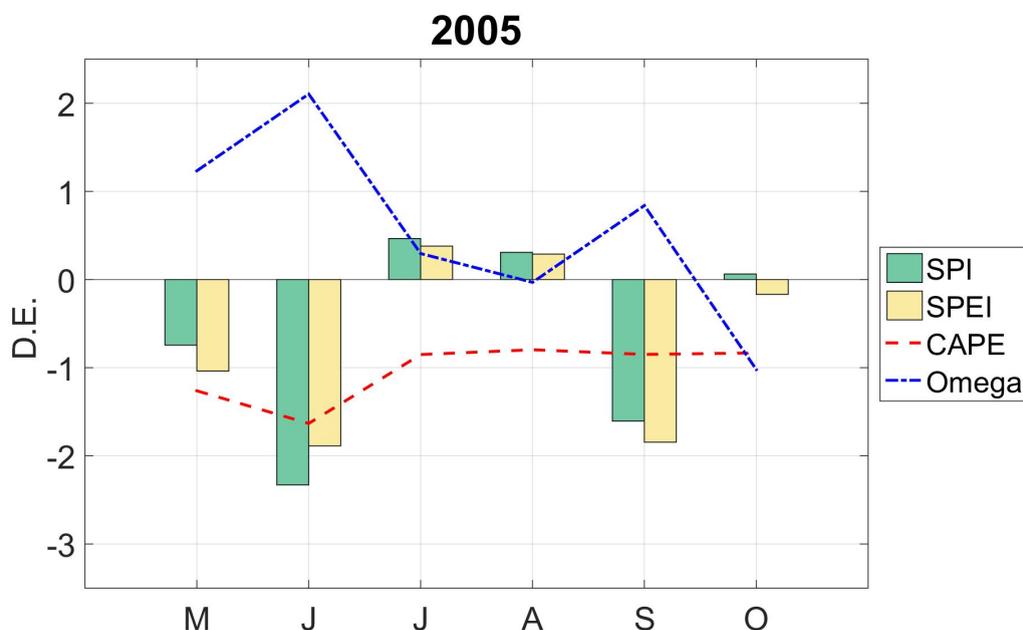


FIGURA 3.37: Valores de SPI-1 y SPEI-1 (barras), y anomalías estandarizadas (adimensionales) de CAPE (línea roja) y velocidad vertical (línea azul).

El último evento es el del año 2005, en éste el mes pico se presenta en el mes de junio, el cual muestra tener los valores negativos más intensos de los índices SPI-1 y SPEI-1. Esta sequía comienza en mayo, se interrumpe por dos meses y regresa en septiembre y octubre. Este evento es el único que a comparación de los demás, presenta anomalías negativas de CAPE en todo el periodo de estudio, alcanzando el valor mínimo en junio. En cuanto a los valores de Omega, presentan las anomalías positivas más intensas durante los meses de mayo y junio, teniendo el pico en el mes de junio. Los valores positivos de Omega, están relacionados con la presencia de la alta presión mostrada en la figura 3.32.

De manera general hay subsidencia sobre la cuenca los meses de sequía meteorológica. Sobre los valores de CAPE se observa que, al contrario de lo que cabría esperar, sí hay energía potencial disponible para que se desarrolle convección durante los meses de sequía en los cuatro primeros casos (1982, 1986, 1987 y 1997). Lo que esto indicaría es

que se producen condiciones termodinámicas adecuadas para desarrollar la convección, pero no es suficiente.

En el caso del año 2005, el comportamiento del CAPE es lo esperado, es decir valores negativos durante el periodo de sequía. Esto muestra un comportamiento similar al encontrado con las anomalías acumuladas de $(E - P)_{1-10}$ en la figura 3.27. Se puede observar que mientras en los cuatro primeros casos las anomalías de humedad son positivas, durante la sequía de 2005, las tres regiones muestran anomalías negativas de $(E - P)_{1-10}$, lo que probablemente esté relacionado con que también hay menos advección de humedad desde el océano hacia la cuenca.

Lo que estos resultados sugieren es que aunque haya cierta inestabilidad termodinámica (valores positivos de CAPE) y exista un grado de humedad en la atmósfera, al existir descensos relativos, la parcela de aire no logra elevarse para generar convección.

Capítulo 4

Discusión y Conclusiones

En el presente trabajo se han analizado las mayores sequías acontecidas en la cuenca del río Balsas durante el periodo de tiempo de 1980 hasta 2017.

Para seleccionarlas se emplearon los índices SPEI y SPI con una escala temporal de seis meses (SPEI-6 y SPI-6) que son indicadores de condiciones de sequía agrícola e hidrológica. Se eligió el mes de octubre puesto que la temporada lluviosa tiene lugar desde mayo hasta octubre en la cuenca del río Balsas. Se eligieron para su análisis los cinco eventos con las sequías más severas registradas durante el periodo de estudio y resultaron ser los años 1982, 2005, 1987, 1997 y 1986. Tres de los periodos de sequía seleccionados se desarrollaron bajo la influencia de eventos El Niño fuertes (1982, 1987 y 1997) y los dos restantes bajo condiciones neutras (1986 y 2005).

En cuanto a las características espacio-temporales, estacionalmente en cuatro de los cinco casos hubo sequías marcadas que afectaban buena parte del territorio mexicano, a diferencia de la sequía de 1986 en donde la sequía parece concentrarse solamente al sur del país. Estos resultados son consistentes utilizando ambos índices.

Se analizaron las anomalías de precipitación, temperatura y ETP durante los periodos de sequía. Se observó que las mayores anomalías de precipitación se corresponden con los mayores eventos de sequía meteorológica (SPEI-1 y SPI-1). En todos los casos se recibió una cantidad de precipitación acumulada inferior a los valores normales al final del periodo lluvioso. El evento de 1982 recibió un 69.1 % del total del promedio climatológico, seguido de la sequía de 2005 que recibió un 82.02 % de precipitación, finalmente, las sequías de 1986, 1987 y 1997 recibieron un 82.11 %, 82.80 % y 84.47 % de los valores promedio respectivamente.

Se analizaron las principales fuentes de humedad de la cuenca del Balsas a lo largo del año mediante el uso del modelo de dispersión lagrangiana FLEXPART. En donde se obtuvieron y cuantificaron los aportes desde siete regiones fuente. Adicionalmente se calcularon las anomalías estandarizadas en el transporte de humedad de las tres principales fuentes durante los periodos de sequía, de manera general se encontró que la cuenca misma presenta anomalías positivas, esto ocurre en cuatro de los cinco casos, siendo el evento de 2005 la excepción puesto que presenta constantemente anomalías negativas en la cuenca misma y la región Caribe.

Se analizaron las anomalías estandarizadas de altura geopotencial en la troposfera media y de la presión a nivel del mar durante los meses de mayor intensidad de las sequías obteniendo que dinámicamente durante los eventos de 1982, 1986 y 2005 las anomalías son prácticamente neutras en la troposfera media y durante 1987 y 1997 son positivas sobre la región de estudio. En cuanto a presión a nivel del mar, en cuatro casos (1982, 1986, 1987 y 1997) se presentan anomalías positivas (giro anticiclónico) en el golfo de México lo cual hace que haya advección de humedad, mientras que en la sequía de 2005, es el único caso en donde hay anomalías negativas (giro ciclónico) lo cual impide la advección de humedad por parte del Caribe, este comportamiento concuerda con las anomalías negativas de humedad obtenidas anteriormente.

Debido a estos resultados, se analizó con más detalle la razón por la cual se inhibe la convección en la región de estudio. Para ello se realizaron anomalías estandarizadas

de CAPE así como velocidad vertical Omega en la región de estudio y se compararon con los valores de SPI-1 y SPEI-1.

En estas figuras se encontró que hay una concordancia entre Omega y los eventos de sequía. Es decir, que cuando hay anomalías positivas de Omega, se presentan eventos de sequía meteorológica. Sin embargo, las anomalías de CAPE no concuerdan de manera tan directa. En los eventos de 1982, 1986 y 1997 las anomalías de CAPE para el mes pico son positivas, esto quiere decir que termodinámicamente existe la energía para desarrollar convección sin embargo debido a la subsidencia ésta no se produce. Para el caso de las sequías de 1987 y 2005, son las únicas que en su mes pico presentan un CAPE negativo, por lo que en estos casos adicionalmente a la subsidencia, no existen las condiciones termodinámicas para el desarrollo convectivo. Estos resultados concuerdan con los valores de las anomalías de humedad anteriormente obtenidos, ya que en estos dos eventos en su mes pico son los únicos que presentan una anomalía negativa de humedad en la región Caribe.

Finalmente, se ha observado que no hay diferencias entre los patrones sinópticos asociados a eventos El Niño fuertes y eventos neutros. Por tanto, los resultados encontrados sugieren que la potencial ocurrencia de sequía en la cuenca del río Balsas no está condicionada por eventos El Niño a pesar de que en gran parte de la República Mexicana se presentó menos precipitación de lo normal.

Adicionalmente, los resultados presentados muestran la importancia de monitorear sequías no sólo en la región norte de México, sino que también al sur, debido a los potenciales impactos en diferentes sectores socio-económicos que una sequía puede afectar. Se puede observar que las sequías no afectan una zona en específico, si no que usualmente lo hacen abarcando extensiones territoriales considerables. Este tipo de análisis sería interesante realizarlos en diferentes cuencas hidrológicas sobre todo aquellas que presentan un grado de presión hídrica alta o muy alta, como una herramienta de diagnóstico y mejora de la predicción útil para el tomador de decisiones.

Bibliografía

- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, volume 56. Food & Agriculture Org.
- Beran, M. A., Rodier, J. A., et al. (1985). *Hydrological aspects of drought: a contribution to the International Hydrological Programme*, volume 39. Unesco.
- Cavazos, T. and Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4):377–386.
- CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas, 2010. http://centro.paot.org.mx/documentos/conagua/RIO_BALSAS_.pdf.
- CONAGUA (2018a). Estadísticas del agua en México. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- CONAGUA (2018b). Situación de los recursos hídricos, edición 2018.b. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>.
- Cotler Ávalos, H. and Caire, G. (2009). *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, WWF, la Organización Mundial de Conservación., México, D.F. ISBN 978-968-817-904-8.

-
- Cotler Ávalos, H. and Garrido Pérez, A. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Fundación Gonzalo Río Arronte, México, D.F. ISBN 978-607-7655-07-7.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, d. P., et al. (2011). The era-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656):553–597.
- Diaz, H. F. and Bradley, R. S. (2004). The hadley circulation: present, past, and future. In *The Hadley circulation: present, past and future*, pages 1–5. Springer, Dordrecht.
- DOF (2010). Acuerdo por el que se determina la circunscripción territorial de los organismos de cuenca de la comisión nacional del agua. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5551163&fecha=26/02/2019.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., and Paulson Jr, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water resources research*, 16(2):297–302.
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., Amador, J., and Nieto, R. (2010). Moisture sources for central america: Identification of moisture sources using a lagrangian analysis technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D5).
- Guerrero, Ó. (2015). Vive cuenca del río balsas la peor sequía de los últimos 50 años. <https://agua.org.mx/vive-cuenca-del-rio-balsas-la-peor-sequia-de-los-ultimos-50-anos/>.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., and Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the cru ts3.10 dataset. *International journal of climatology*, 34(3):623–642.

-
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., and Widhalm, M. (2011). The lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4):485–488.
- IMTA (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. ISBN 978-607-9368-09-8.
- Kuchment, L. S. (2004). *The Hydrological cycle and human impact on it*, chapter Water Resources Management. Encyclopedia of Life Support. Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Liverman, D. M. (1999). Vulnerability and adaptation to drought in mexico. *Nat. Resources J.*, 39:99.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., et al. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, volume 17, pages 179–183. American Meteorological Society Boston, MA.
- Melgarejo, A., Ordoñez, P., Nieto, R., Gimeno, L., and Ribera, P. (2017). Moisture transport related to the enso effects in the mexican precipitation. In *First International Electronic Conference on the Hydrological Cycle*, page 4884. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Méndez, M. and Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over mexico and central america. *Journal of Climate*, 23(5):1175–1188.
- MetOffice-UK (2019). The water cycle. <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/water-cycle>.
- Moreno Diaz, A. and Renner, I. (2006). *Gestión Integral de Cuencas: La experiencia del Proyecto Regional Cuencas Andinas*. Centro Internacional de la Papa.

-
- Muñoz, E., Busalacchi, A. J., Nigam, S., and Ruiz-Barradas, A. (2008). Winter and summer structure of the caribbean low-level jet. *Journal of Climate*, 21(6):1260–1276.
- NCAR (2015). The climate data guide: Standardized precipitation evapotranspiration index (spei). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei>.
- NCAR (2017). The climate data guide: Cru ts gridded precipitation and other meteorological variables since 1901. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cru-ts-gridded-precipitation-and-other-meteorological-variables-1901>.
- NCAR (2018). Standardized precipitation index (spi). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>.
- Numaguti, A. (1999). Origin and recycling processes of precipitating water over the eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D2):1957–1972.
- Ordóñez, P., Ribera, P., Gallego, D., and Peña-Ortiz, C. (2012). Major moisture sources for western and southern india and their role on synoptic-scale rainfall events. *Hydrological Processes*, 26(25):3886–3895.
- Ortega-Gaucin, D. and Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en méxico. *Aqua-lac*, 5(2):78–90.
- Ortiz Pérez, M. A., Hernández Santana, J. R., and Figueroa Mah Eng, J. M. (2017). Cambios de la línea costera en el delta del río balsas, pacífico mexicano, entre los años 1943-2009. *Investigaciones geográficas*, (94):0–0.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the el niño/southern oscillation. *Monthly weather review*, 115(8):1606–1626.

-
- Salinas-Prieto, J. A. (2006). *Dinámica de ondas del este y su interacción con el flujo medio en el Caribe*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la atmósfera.
- SEMARNAT (2018). Atlas digital geográfico del medio ambiente. <https://ideinfoteca.semarnat.gob.mx/AtlasD/Atlas.html>.
- Sorí, R. (2018). *Atmospheric moisture transport: the bridge between ocean evaporation and hydrological extremes in major tropical river basins*. PhD thesis, PhD dissertation, Universidad de Vigo. https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/06/Tesis_Rogert.pdf.
- Sorí, R., Marengo, J., Nieto, R., Drumond, A., and Gimeno, L. (2018). The atmospheric branch of the hydrological cycle over the negro and madeira river basins in the amazon region. *Water*, 10(6):738.
- Sorí, R., Nieto, R., Drumond, A., and Gimeno, L. (2017). The niger river basin moisture sources: A lagrangian analysis. *Atmosphere*, 8(2):38.
- Stohl, A., Hittenberger, M., and Wotawa, G. (1998). Validation of the lagrangian particle dispersion model flexpart against large-scale tracer experiment data. *Atmospheric Environment*, 32(24):4245–4264.
- Stohl, A. and James, P. (2004). A lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. part i: Method description, validation, and demonstration for the august 2002 flooding in central europe. *Journal of Hydrometeorology*, 5(4):656–678.
- Stohl, A. and James, P. (2005). A lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. part ii: Moisture transports between earth’s ocean basins and river catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6):961–984.
- Stojanovic, M., Drumond, A., Nieto, R., and Gimeno, L. (2017). Moisture transport anomalies over the danube river basin during two drought events: A lagrangian analysis. *Atmosphere*, 8(10):193.

-
- Tate, E. and Gustard, A. (2000). Drought definition: a hydrological perspective. In *Drought and drought mitigation in Europe*, pages 23–48. Springer.
- Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*, volume 66. LWW.
- Valencia-Vargas, J. C. (2015). Desarrollo de la región hidrológica del balsas mediante la modificación de su veda. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1):81–97.
- Van der Ent, R. J., Savenije, H. H., Schaeffli, B., and Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46(9).
- Velasco, I. (1999). Severe droughts becoming recurrent, more persistent in Mexico. *Drought Network News (1994-2001)*, note = "<https://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/88/>".
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7):1696–1718.
- Waliser, D. E. and Gautier, C. (1993). A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of climate*, 6(11):2162–2174.
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate dynamics*, 29(4):411–422.
- Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., and Hayes, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water resources management*, 21(5):763–774.
- WMO (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide*. In [WMO \(2012\)](#). ISBN 978-92-63-11091-6.

Ye, X.-c., Li, Y.-l., Li, X.-h., Xu, C.-y., and Zhang, Q. (2015). Investigation of the variability and implications of meteorological dry/wet conditions in the poyang lake catchment, china, during the period 1960–2010. *Advances in Meteorology*, vol. 2015.

Apéndice A

Índices SPEI-1 y SPI-1 para cada mes

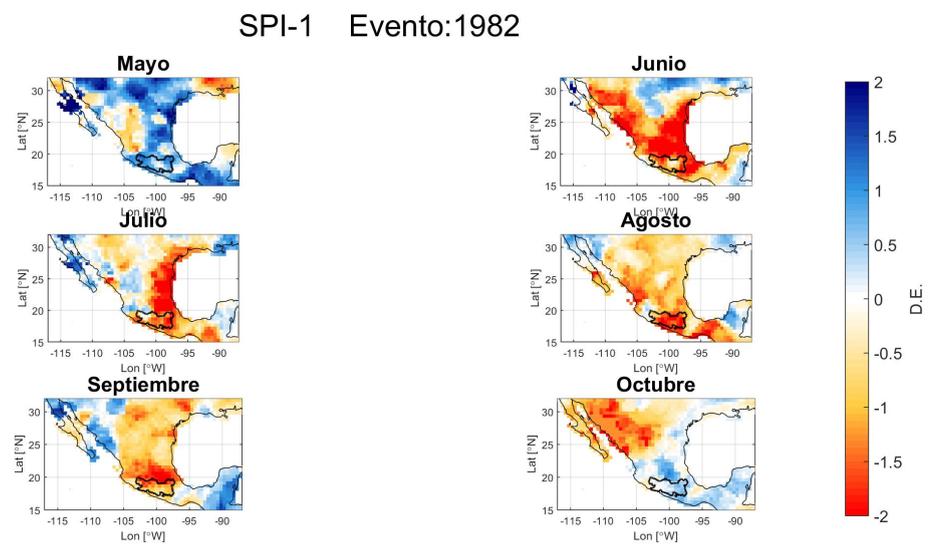


FIGURA A.1: Índice SPI para cada mes de la sequía de 1982

SPEI-1 Evento:1982

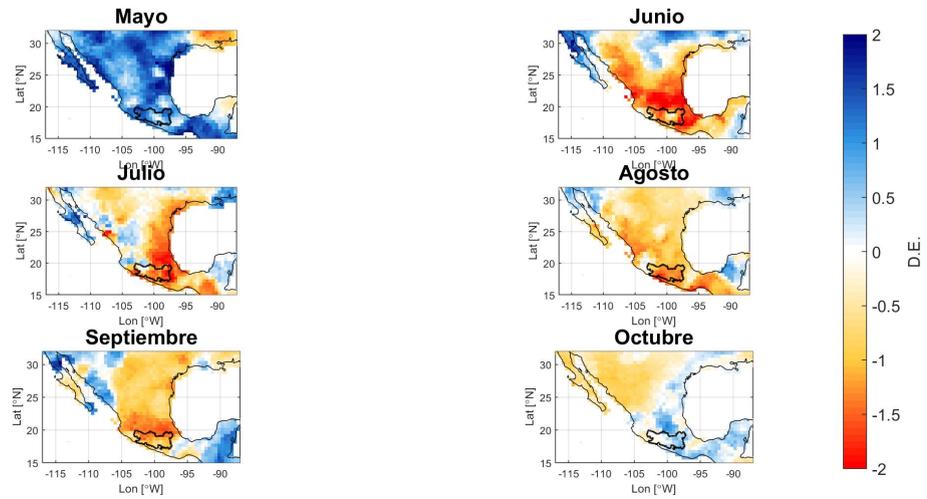


FIGURA A.2: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1982

SPEI-1 Evento:1986

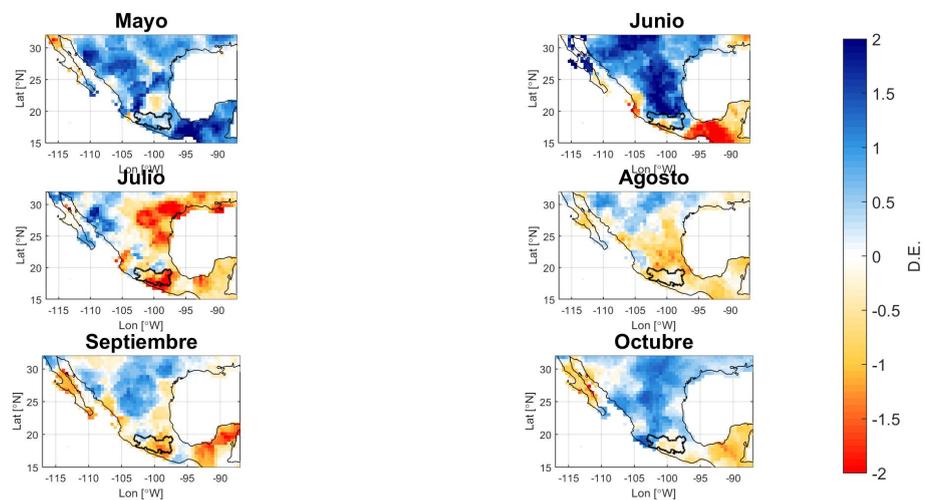


FIGURA A.3: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1986

SPEI-1 Evento:1986

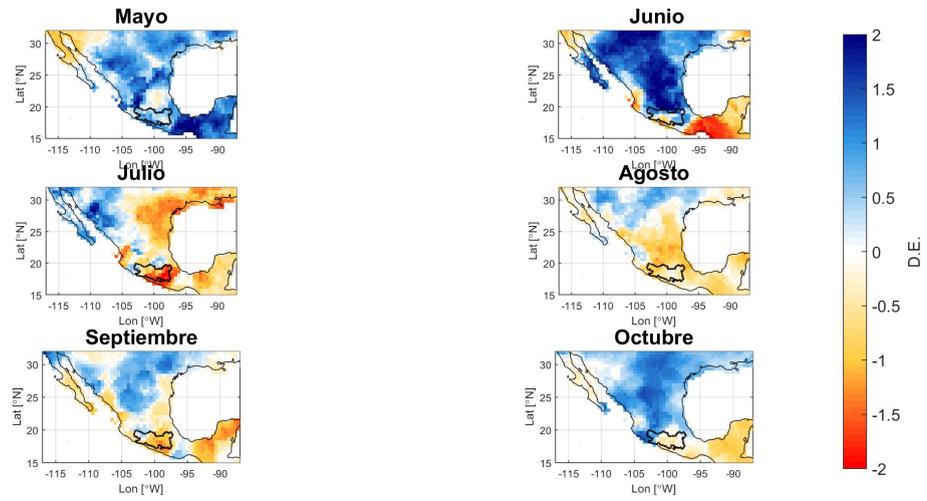


FIGURA A.4: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1986

SPEI-1 Evento:1987

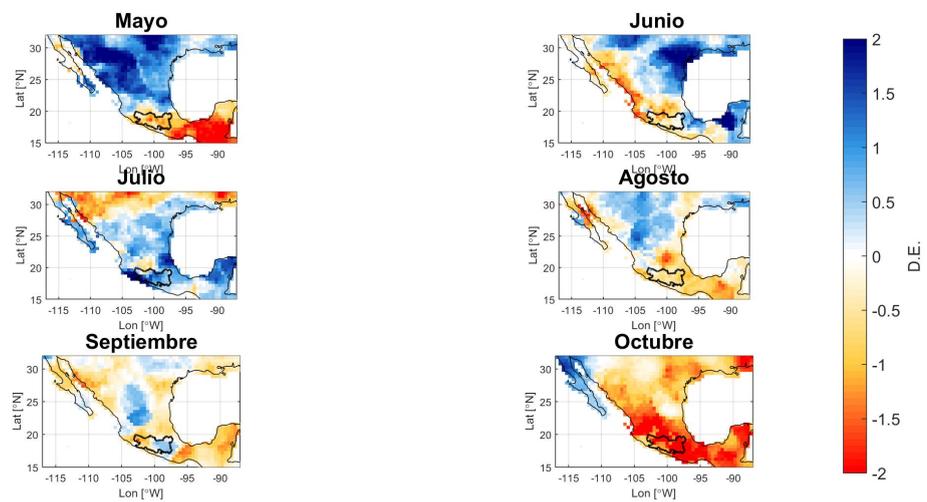


FIGURA A.5: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1987

SPEI-1 Evento:1987

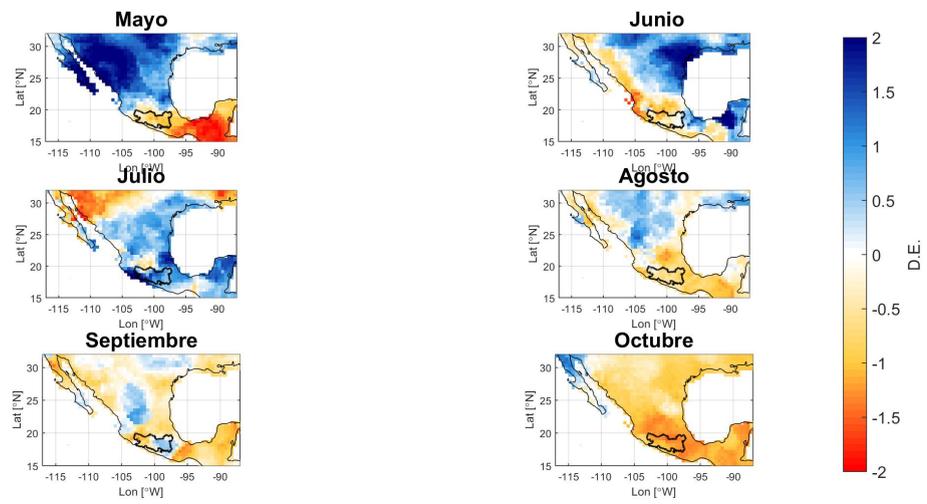


FIGURA A.6: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1987

SPEI-1 Evento:1997

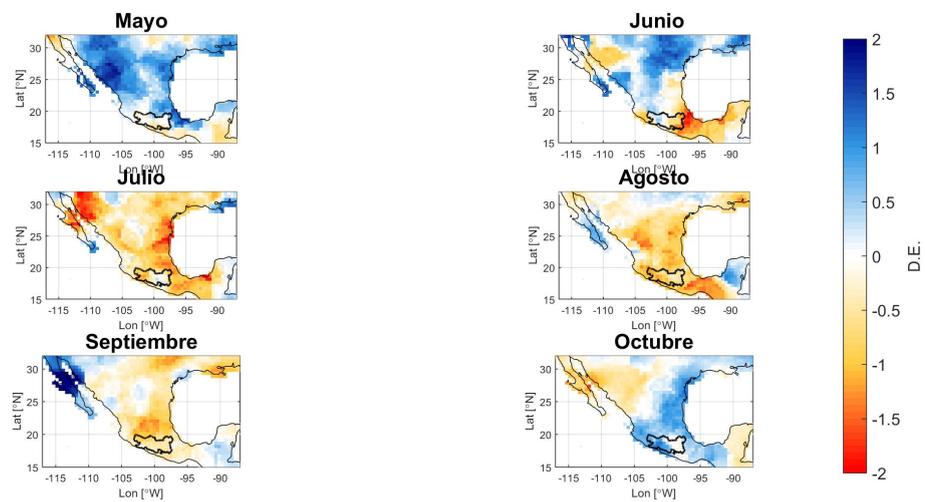


FIGURA A.7: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1997

SPEI-1 Evento:1997

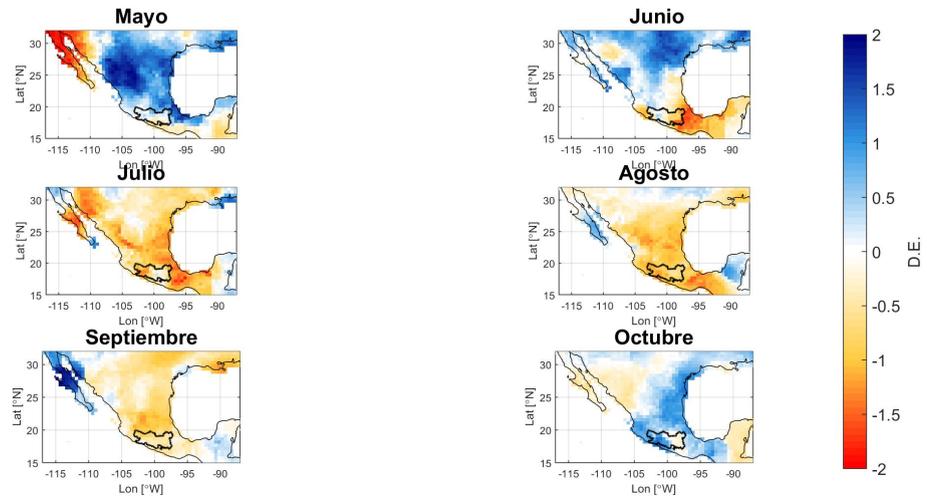


FIGURA A.8: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 1997

SPI-1 Evento:2005

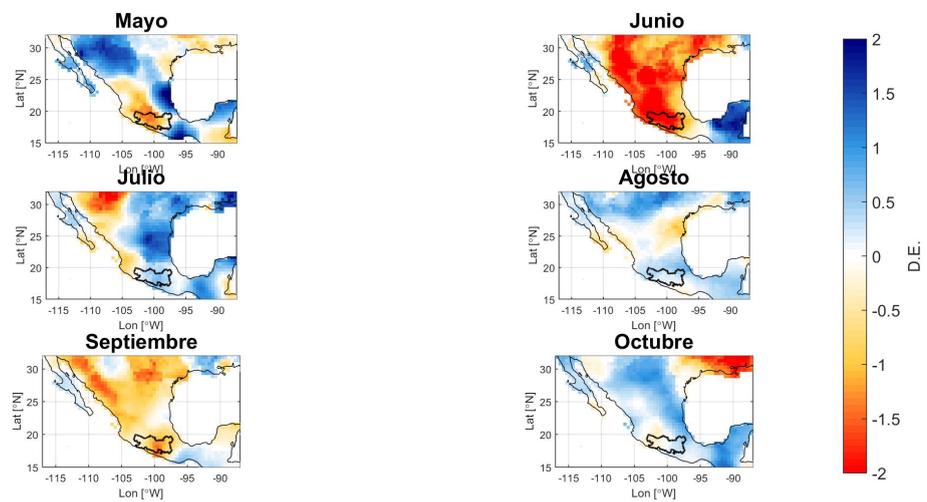


FIGURA A.9: Índice SPI para cada mes de la sequía de 2005

SPEI-1 Evento:2005

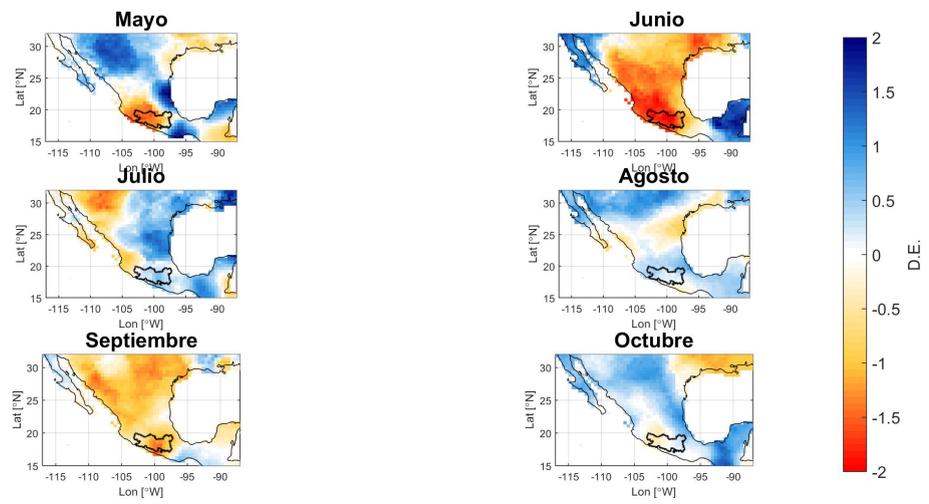


FIGURA A.10: Índice SPEI-1 para cada mes de la sequía de 2005

Apéndice B

Circulación Atmosférica de cada mes

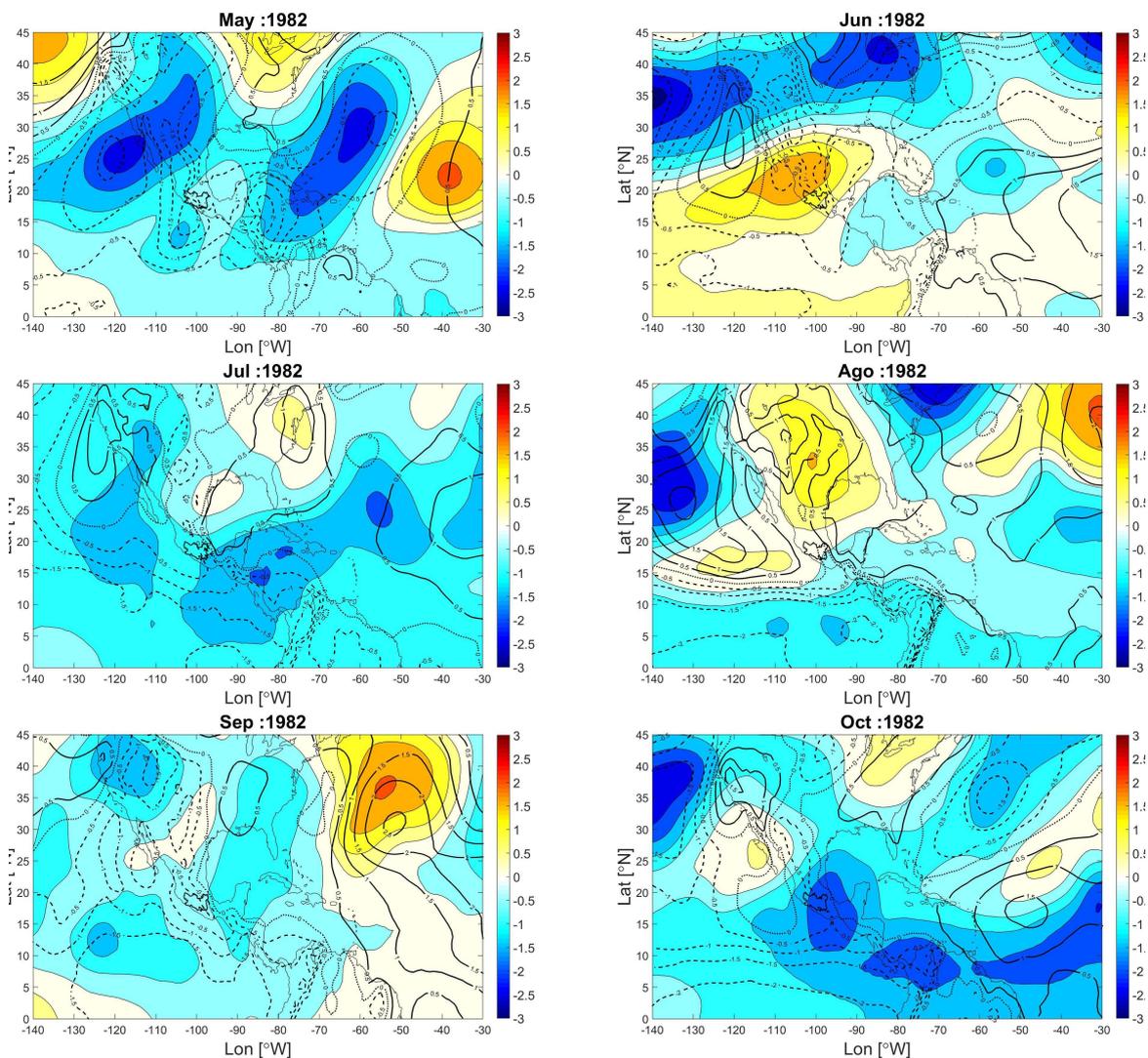


FIGURA B.1: Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1982.

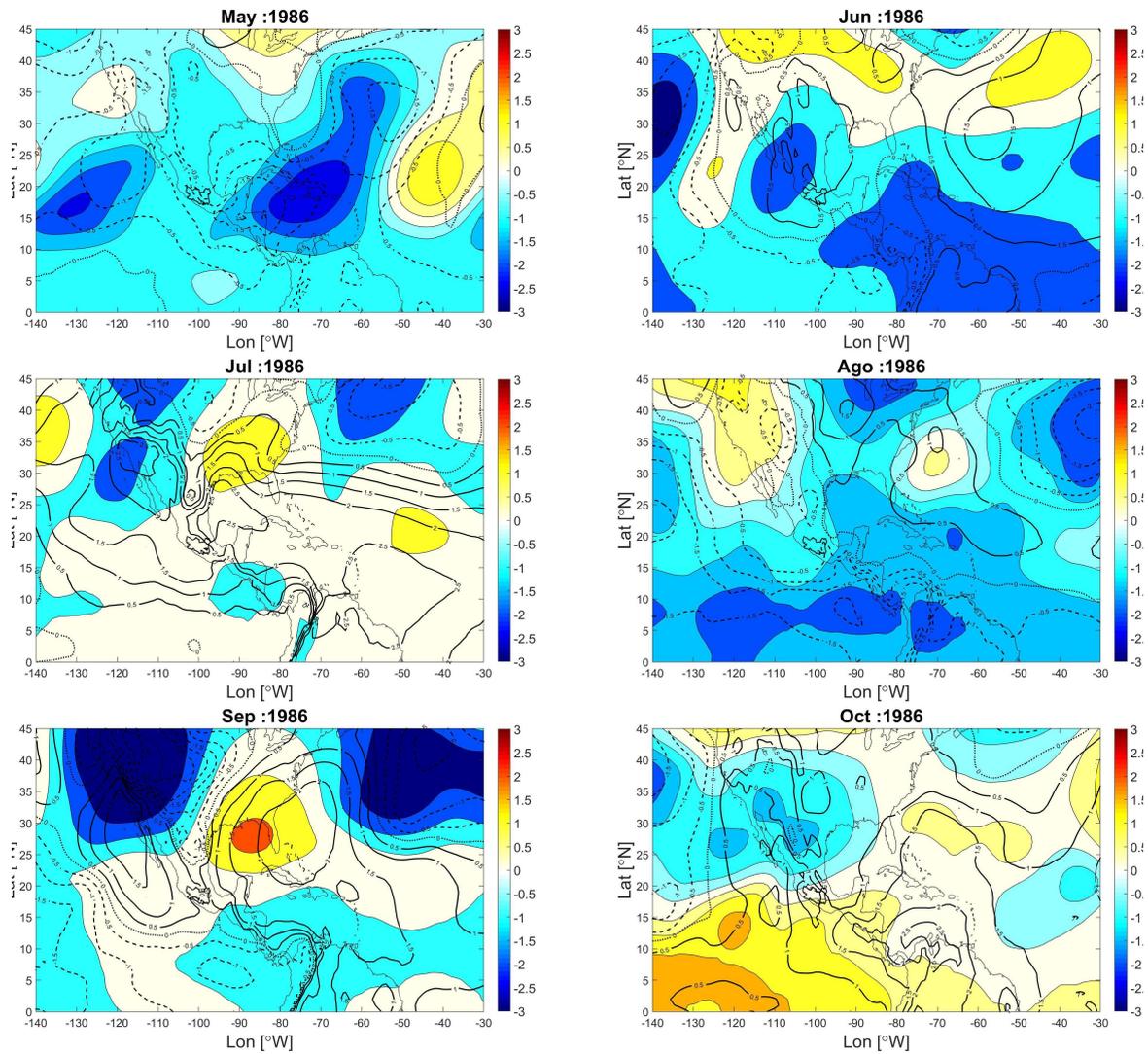


FIGURA B.2: Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1986.

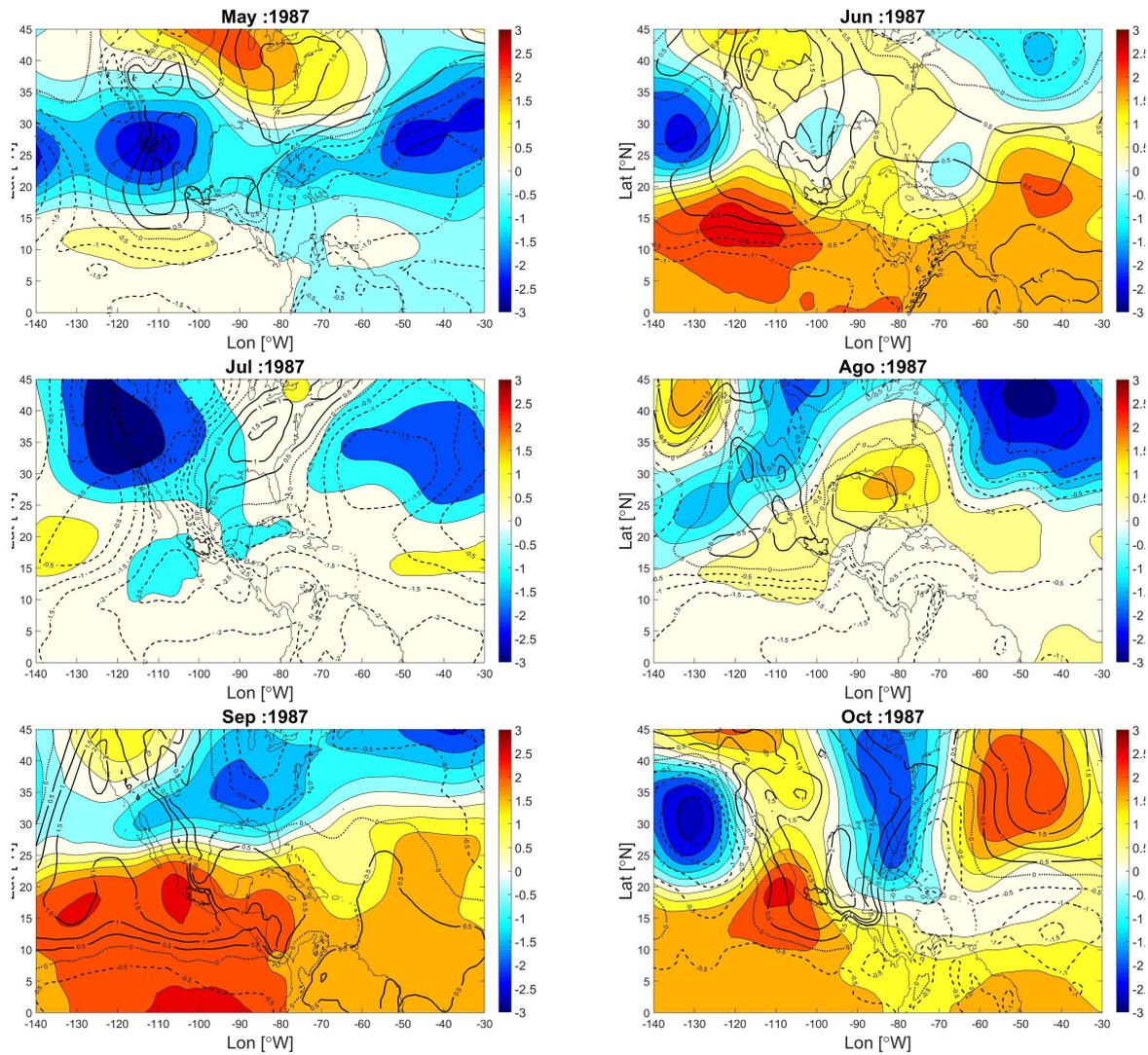


FIGURA B.3: Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1982.

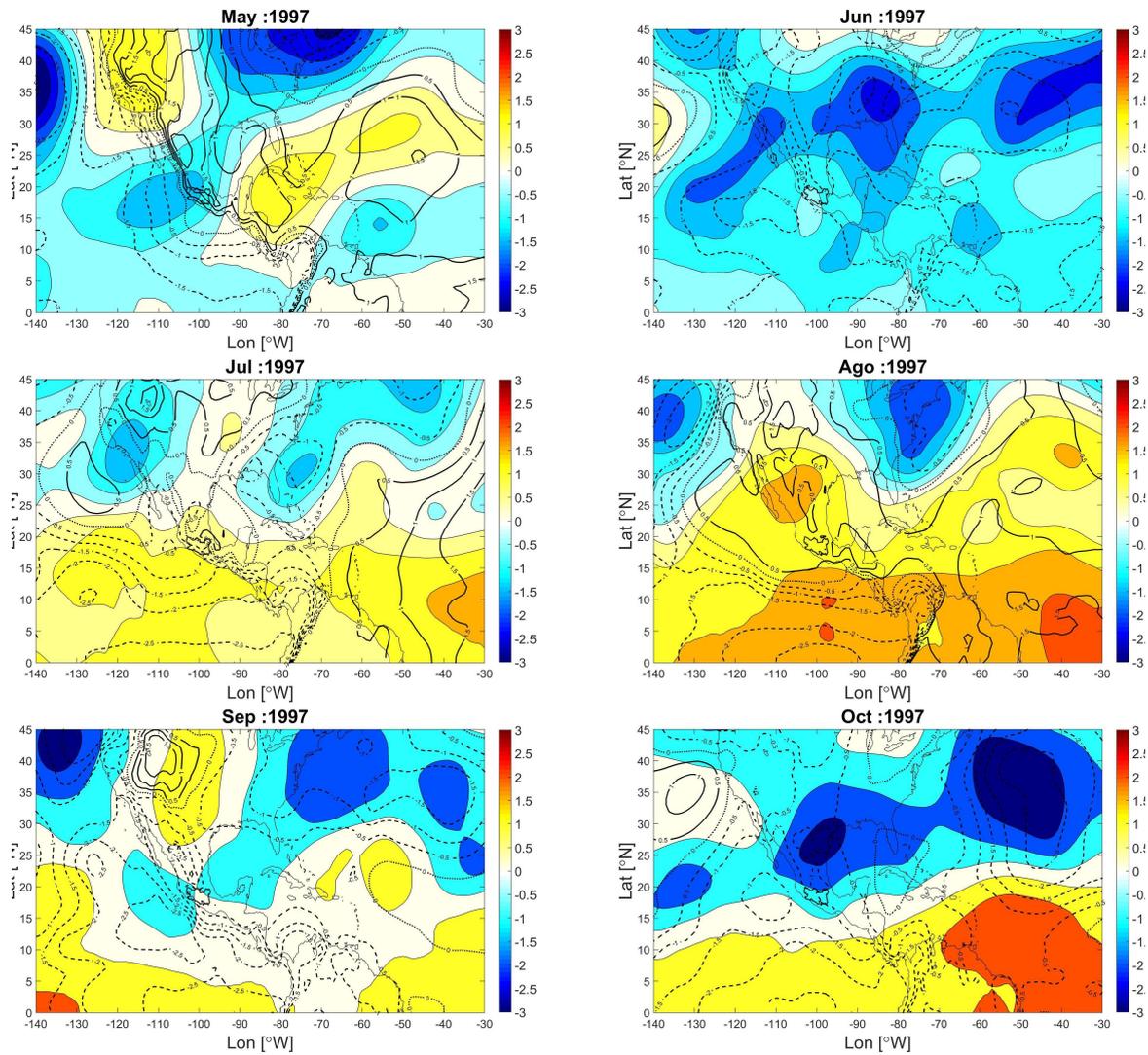


FIGURA B.4: Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 1997.

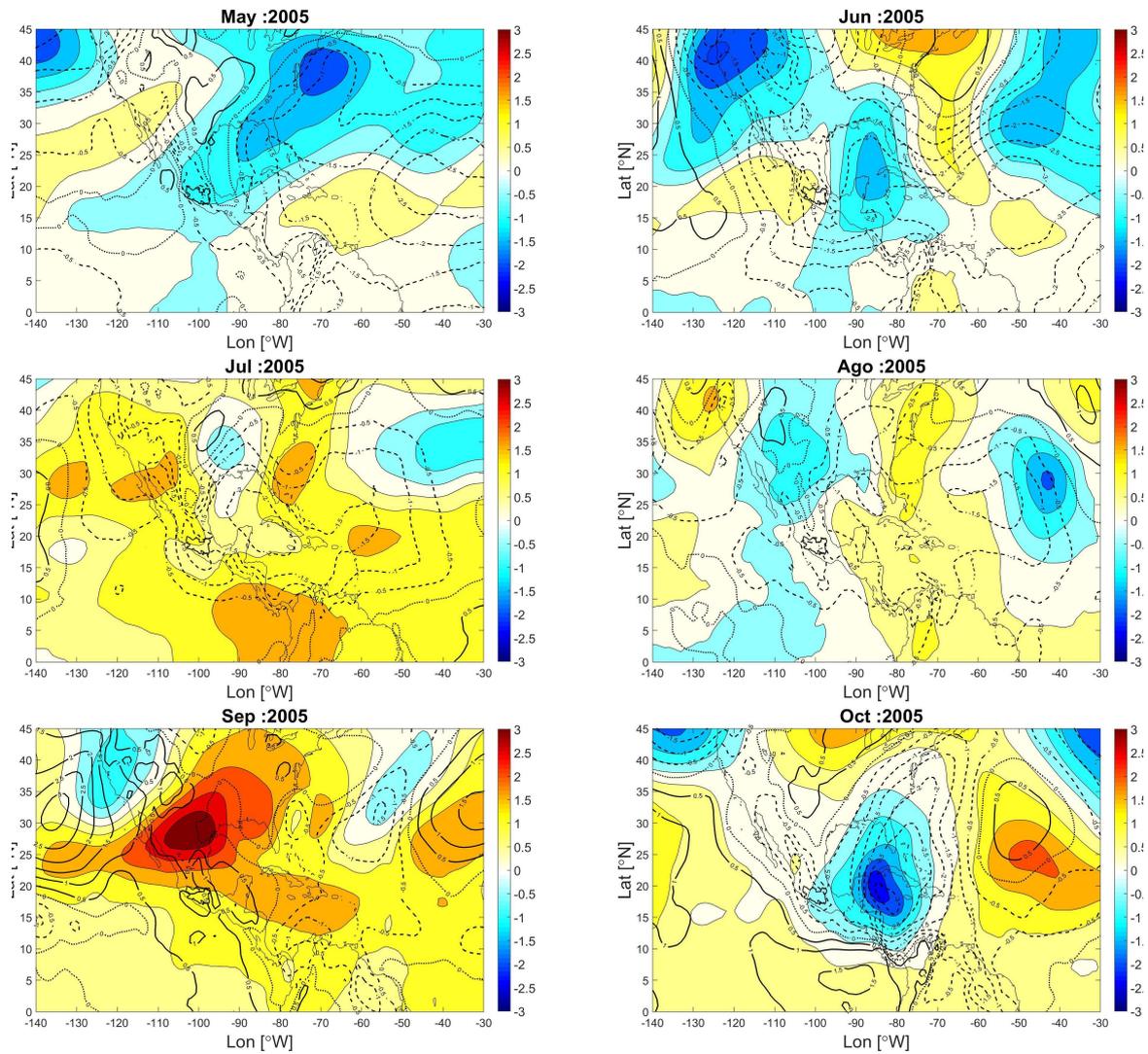


FIGURA B.5: Anomalías estandarizadas de altura geopotencial y presión a nivel del mar para todos los meses del episodio de sequía de 2005.